

33. Rumyantsev K.E., Rudinskiy E.A. Dvukhetapnyy vremennoy algoritm sinkhronizatsii v sisteme kvantovogo raspredeleniya klyucha s avtomaticheskoy kompensatsiyey polarizatsionnykh iskazheniy [Two-stage time synchronization algorithm in the system of quantum key distribution with automatic compensation of polarization distortions], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 5 (190), pp. 75-89.
34. Available at: <https://www.coming.com/ru/ru/products/communication-networks/products/fiber/smf-28e-.html>.
35. Available at: <https://www.coming.com/ru/ru/products/communication-networks/products/fiber/smf-28-ull.html>.
36. Available at: https://www.coming.com/media/worldwide/coc/documents/Fiber/PI1107_7-14rus.pdf.
37. Available at: <http://2m.spb.ru/rus/opticheskie-voлокna/opticheskoe-voлокno-g.652.d>.
38. Available at: <https://clck.ru/Hg8p2>.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.А. Обуховец.

Миронов Яков Константинович – Южный федеральный университет; e-mail: tmiyar117@gmail.com; 347922, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 19; тел.: 89185723456; аспирант.

Румянцев Константин Евгеньевич – e-mail: rke2004@mail.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Чехова, 2.; тел.: 89281827209; кафедра информационной безопасности телекоммуникационных систем; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

Mironov Yakov Konstantinovich – Southern Federal University; e-mail: tmiyar117@gmail.com; 19, Nekrasovsky, Taganrog, 347922, Russia; phone: +79185723456; graduate student.

Rumyantsev Konstantin Evgenievich – e-mail: rke2004@mail.ru; 2, Chekhov street, Taganrog, 347922, Russia; phone: +79281827209; the department of information security of telecommunication systems; head of department; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 621.396

DOI 10.23683/2311-3103-2019-5-16-25

Р.Р. Ибадов, В.П. Федосов, В.В. Воронин, С.Р. Ибадов

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА СИНТЕЗА ТЕКСТУР ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ*

Удаление изображений облаков с фотографий подстилающей поверхности является необходимым условием для применения наборов данных со спутников Земли, поскольку такие спутниковые снимки используются для анализа изменений почвенного покрова, связанного с расширением городов, восстановлением лесов на заброшенных сельскохозяйственных землях, оценкой площади лесов, выявлением типов лесов и классификацией земного покрова, а эти данные чаще всего загрязнены облаками. В статье исследован алгоритм выделения и удаления изображений облаков и разработана его программная реализация. Показана эффективность нового подхода на нескольких примерах для различных областей поверхности земли с облаками. Предметом исследования являются методы и алгоритмы детектирования и реконструкции объектов, скрывающих детали на изображениях, в частности изображений облаков. Объектом исследования является набор из тестовых изображений. Результатом исследования является разработка метода удаления изображений облаков с целью восстановления области, перекрытой облаками. Новизной работы является алгоритм, позволяющий повысить качество восстановления изображений на основе нейронной сети. Полученные результаты позволяют восстановить области, перекрытые облаками. Оценка эффективности метода восстановления изображений проводилась с помощью статистического критерия – среднеквадратического отклонения результата обработки

* Работа подготовлена при поддержке гранта Южного федерального университета № ВнГр-07/2017-25.

от истинного изображения. В результате решения поставленных задач можно сделать выводы: – разработан метод удаления изображений облаков и восстановления изображений на основе поиска похожих блоков с последующим их объединении нейронной сетью; – анализ результатов проведённого исследования показал, что предложенный метод позволяет улучшить качество реконструкции изображений.

Удаление изображений облаков; обнаружение облаков; реконструкция изображений; сегментация; предобработка.

R.R. Ibadov, V.P. Fedosov, V.V. Voronin, S.R. Ibadov

RESEARCH OF THE TEXTURES SYNTHESIS METHOD OF THE SURFACE IMAGE OF THE EARTH BASED ON A NEURAL NETWORK

The removal of cloud images from photographs of the underlying surface is a prerequisite for the use of datasets from Earth satellites, since such satellite images are used to analyze changes in soil cover associated with urban expansion, restoration of forests on abandoned agricultural lands, estimation of forest area, identification of forest types and classification land cover, and this data is most often polluted by clouds. The article explores the algorithm for extracting and removing cloud images and develops its software implementation. The effectiveness of the new approach is shown using several examples for various areas of the earth's surface with clouds. The subject of research is the methods and algorithms for detecting and reconstructing objects that hide details on images, in particular cloud images. The object of study is a set of test images. The result of the study is the development of a method for removing cloud images in order to restore the area covered by clouds. The novelty of the work is an algorithm that improves the quality of image recovery based on a neural network. The results obtained make it possible to reconstruct areas covered by clouds. The effectiveness of the image restoration method was evaluated using a statistical criterion – the random mean square error of the processing result from the true image. As a result of solving the tasks, it can be concluded: – a method has been developed for removing cloud images and restoring images based on the search for similar blocks with their subsequent integration by a neural network; – an analysis of the results of the study showed that the proposed method can improve the quality of image reconstruction.

Cloud image deletion; cloud detection; reconstruction of images; segmentation; preprocessing.

Введение. Дистанционные методы исследования окружающей среды – это многосложная и разносторонняя область науки и техники, переживающая период бурного развития [1–8]. Современные дистанционные методы зондирования объектов, особенно космические, открыли качественно новый этап в информационном обеспечении исследований и разработок в науках о Земле и хозяйственной практике.

В настоящее время большую часть данных дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) получают с искусственных спутников Земли [9–11]. Обзор большой поверхности Земли с высоты полета спутника, высокая скорость движения спутниковых датчиков и возможность регистрировать сигналы в нескольких спектральных диапазонах позволяют получать огромные объемы данных [12–14]. Широта охвата территории является характерной чертой дистанционных методов исследования Земли. Организация работ по изучению поверхности Земли, основанная на сочетании аэрокосмических методов с небольшим объемом наземных исследований, которые проводятся на ограниченном числе опорных маршрутов и ключевых участков, позволяет значительно сократить сроки производства работ и снизить их стоимость. Данные ДЗЗ в настоящее время – это аэрокосмические снимки, которые представляются в цифровой форме в виде растровых изображений, поэтому проблематика обработки и интерпретации данных ДЗЗ тесно связана с цифровой обработкой изображений [3, 4].

В настоящее время съемка со спутников в большинстве случаев производится в ясную безоблачную погоду, что позволяет получить качественные снимки заданной местности и снизить объем работы на этапе предобработки. Но проведение съемки только при условии безоблачной погоды значительно понижает оперативность получения информации.

Предобработка изображения, заключающаяся в выделении облаков, т.е. формировании маски, позволяет повысить оперативность быстрой съемки и ускорить процесс получения изображения. Качество обработки изображений с удаленными облаками повышается в сравнении с обработкой снимка, на котором облака присутствуют. Например, это становится заметным при текстурной обработке. Реконструкция изображений является одной из важных тем в обработке изображений, которая может применяться во многих областях, от автоматического восстановления поврежденных фотографий до удаления нежелательных объектов на изображениях [15–17]. Методы восстановления используют информацию за пределами поврежденной области для интерполяции отсутствующих пикселей. Большинство методов реконструкции изображений можно разделить на следующие группы: методы на основе решения дифференциальных уравнений в частных производных (PDE) [15]; методы на основе ортогональных преобразований [16]; методы на основе синтеза текстур [17]. Основные недостатки известных методов объясняются тем, что большинство из них не могут восстановить кривые контура и более подходят для удаления царапин и небольших дефектов в структуре изображений. Следует также отметить, что эти методы часто размывают текстуру и структуру при восстановлении больших областей с поврежденными («пустыми») пикселями.

Цели и задачи. Целью исследований является повышение точности реконструкции изображений, которая заключается в выделении и удалении облаков.

Задачи исследования:

- ◆ Разработать метод удаления облаков и восстановления изображений.
- ◆ Провести анализ результатов предложенного метода.

Основная часть. В статье представлен двухэтапный подход, сочетающий алгоритмы обнаружения облаков и реконструкции со спутниковых изображений. Первый этап – алгоритм на основе гистограммы для обнаружения облаков. На втором этапе применяется модифицированный метод реконструкции изображений на основе поиска похожих областей (EBM) с использованием нейронной сети. Общая структура предлагаемого алгоритма представлена на рис. 1.

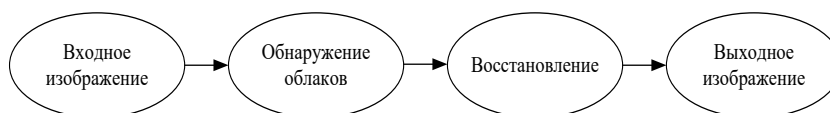


Рис. 1. Общая структура предлагаемого алгоритма

Успех большинства алгоритмов сегментации заключается в выборе пороговых уровней. Простейший метод сегментации объектов называется методом порогового значения. Методы порогового значения часто используются для сегментирования изображений, состоящих из ярких объектов на темном фоне или наоборот.

Глобальное пороговое значение использует один фиксированный пороговый уровень для всех пикселей на изображении и поэтому работает только в том случае, если гистограмма интенсивности входного изображения содержит отдельные пики, соответствующие желаемому предмету и фону. Следовательно, он не может обрабатывать изображения, содержащие, например, сильный градиент освещения. Кроме того, когда фон неравномерен в результате плохих или неравномерных условий освещения, пороговое значение глобального уровня не будет сегментиро-

вать изображение правильно. Способ рассмотрения таких случаев – использовать более сложный метод – это метод различных пороговых значений, который является адаптивным порогом. На рис. 2 показана гистограмма изображения, частично закрытого облаками (интервал минимальных значений).

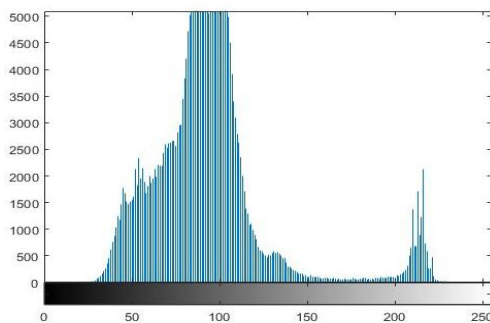


Рис. 2. Гистограмма исходного изображения

В данном случае такая гистограмма соответствует изображению со светлыми объектами на темном фоне. Можно видеть, что все пиксели сгруппированы вокруг нескольких основных центров. Очевидно, что для выделения этих областей, достаточно выбрать некоторое значение T и определить все точки, имеющие $f(x, y) \leq T$, как принадлежащие объекту, а в противном случае – принадлежащие фону.

Тогда получаемое на выходе изображение определяется выражением (1):

$$g(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{if } f(x, y) > T \\ 0, & \text{if } f(x, y) \leq T \end{cases} \quad (1)$$

где 1 – значение для пикселя, соответствующего объекту; 0 – значение для пикселя, соответствующего фону.

Если же T зависит от значения $f(x, y)$, то такой пороговый уровень называют адаптивным.

Как указано выше метод с глобальным пороговым уровнем эффективен до тех пор, пока изображение имеет контролируемое освещение. Как только освещение становится неравномерным, хорошо разделяемая гистограмма может превратиться в плохо разделяемую гистограмму, и эффективность метода уменьшается. В этом случае исходное изображение следует разделить на подобласти, в каждой из которых для сегментации ищется и используется свой пороговый уровень. Основной проблемой здесь является задача разбиения изображения на подобласти и выбор для каждой из них своего порогового значения.

В качестве критерия разбиения удобно использовать понятие дисперсии освещения. То есть изображение разбивается на области, освещенность которых приблизительно одинакова.

Дисперсия вычисляется по формуле (2):

$$\sigma^2(z) = \sum_{i=0}^{L-1} (z_i - m)^2 p(z_i), \quad (2)$$

где z – величина, соответствующая яркости элементов изображения; $p(z_i), i = 0, 1, 2, \dots, L-1$ – гистограмма z , L обозначает число различных уровней яркости.

На рис. 3 показан пример обнаружения облаков.



Рис. 3. Обнаружение облаков: а – спутниковое изображение, б – маска облаков

На этапе реконструкции предлагается использовать алгоритм восстановления для участков пикселей из маски изображения. Алгоритм основан на синтезировании участков с помощью геометрической модели [18]. Потерянные пиксели восстанавливаются путем копирования значений пикселей из приоритетной области с использованием критерия подобия [19]. Предлагается использовать обученную нейронную сеть для выбора «наиболее похожего» блока [20]. Процедура обучения было выполнено на 100 спутниковых снимках, а полученные 100 000 блоков использовались в качестве учебной последовательности для этой сети. Эта сеть содержит три слоя: первый слой из 20 нейронов, второй слой из 20 нейронов и третий из 10 нейронов. Сеть создает десять входов, 5 из них были снабжены только центральными пикселями, найденными в блоках, а остальные пять входов были поданы с MSE этих блоков. Архитектура нейронной сети для реконструкции изображений представлена на рис. 4.

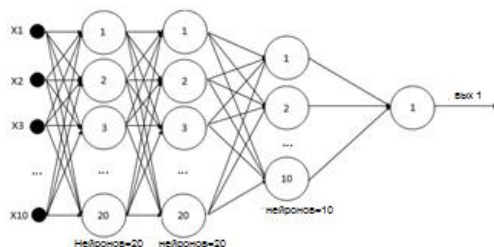


Рис. 4. Архитектура нейронной сети

Экспериментальные результаты. Эффективность представленного подхода реконструкции изображений проверялась на тестовых спутниковых изображениях с облаками. На рис. 5–7 показаны результаты реконструкции изображений (а – оригинальное изображение, б – изображение с облаками, в – маска изображения, г – изображение, восстановленное предложенным методом).

Предлагаемый метод позволяет эффективно восстановить значения пикселей. Стоит отметить, что метод не смазывает текстуру и структуру при восстановлении больших областей с потерянными пикселями. В качестве количественной меры эффективности работы предложенного метода оценивалось значение среднеквадратической ошибки (*RMSE*), которая представлена в табл. 1. Критерий качества *RMSE* является достаточно распространённым для определения различий между парой данных. В качестве входных данных используются наблюдаемое изображение и оригинальное изображение.

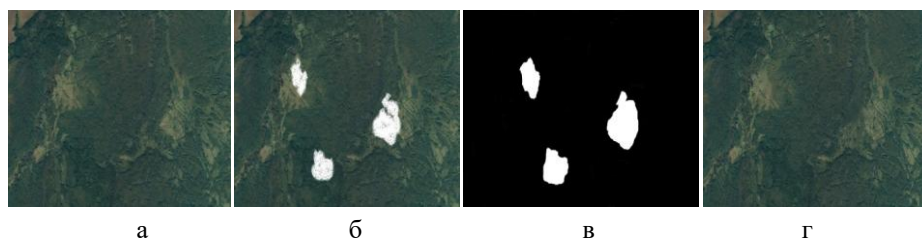


Рис. 5. Обработка спутниковых изображений поверхности Земли:
а – оригинальное изображение; *б* – изображение с облаками; *в* – изображение с маской облаков; *г* – изображение, восстановленное предлагаемым методом

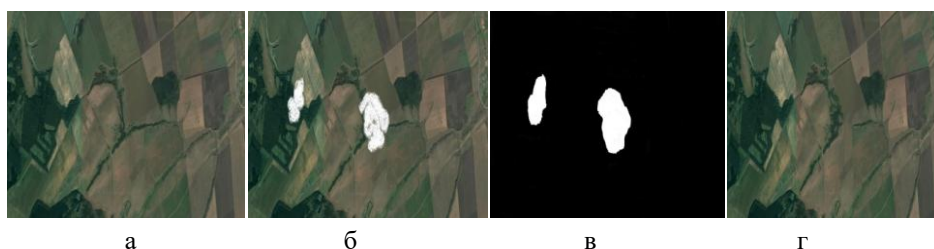


Рис. 6. Обработка спутниковых изображений поверхности Земли:
а – оригинальное изображение; *б* – изображение с облаками; *в* – изображение с маской облаков; *г* – изображение, восстановленное предлагаемым методом

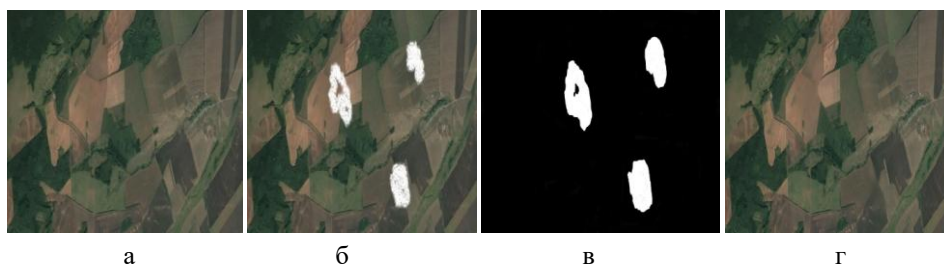


Рис. 7. Обработка спутниковых изображений поверхности Земли:
а – оригинальное изображение; *б* – изображение с облаками; *в* – изображение с маской облаков; *г* – изображение, восстановленное предлагаемым методом

Таблица 1

Зависимость *RMSE* для различных областей изображений

Изображения	Восстановленное изображение	
	RMSE	(%)
Изображение 1	3,7435	1,73
Изображение 2	2,1974	0,99
Изображение 3	3,7117	1,87
Изображение 4	2,7435	1,01
Изображение 5	5,7393	2,71
Изображение 6	3,9487	1,28
Изображение 7	2,5942	0,91
Изображение 8	2,8099	1,04
Изображение 9	3,9022	1,41
Изображение 10	2,6898	1,15
Усредненная оценка	3,4075	1,41

Следующее выражение RMSE показывает, как получить числовое значение данного критерия качества восстановления карты местности

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{n,i} - X_{o,i})^2}{n-1}}$$

В этой формуле $x_{n,i}$ – наблюдаемое изображение, которое сравнивается с оригиналом. Вторая компонента $x_{o,i}$ – яркости оригинального изображения. Параметр n указывает на количество пикселей, участвующих в формировании карты местности. То есть для определения оценки RMSE используется попиксельная разница яркостей. Если изображение цветное, то оно разбивается на цветовые компоненты (обычно RGB).

Большее значение среднеквадратического отклонения показывает больший разброс значений в представленном множестве относительно средней величины множества. Меньшее значение, соответственно, показывает, что значения в множестве сгруппированы вокруг среднего значения. Исследование значений погрешности показывает, что использование предложенного метода позволяет существенно увеличить эффективность восстановления изображений.

Заключение. В статье представлен двухэтапный подход, сочетающий алгоритмы обнаружения изображений облаков и реконструкции спутниковых изображений поверхности Земли. Первый этап – алгоритм обнаружения облаков на основе анализа гистограммы яркости. На втором этапе применяется модифицированный метод реконструкции изображений на основе поиска похожих блоков с использованием нейронной сети. Несколько примеров, представленных в этой статье, демонстрируют эффективность алгоритма при восстановлении различных областей спутниковых изображений для удаления облаков. Различие восстановленного изображения от оригинального в среднем составляет 1,41 %, что является высоким показателем сходства изображений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Singh M., Kaur A.P.H. A Survey on Image Inpainting for Remotely Sensed Images // IRACST-International Journal of Computer Science and Information Technology & Security. – Vol. 6. – P. 487-490.
2. Sophia D.L., Lalitha K., Chandar J.P. Reconstruction of cloud contaminated remote sensing images using inpainting strategy // International Journal of Electronics Communication and Computer Technology. – 2013. – Vol. 3, No. 3. – P. 407-411.
3. Sunuprpto H., Hussin Y.A. A Comparison Between Optical and Radar Satellite Images for Detecting Tropical Forest Fires in South Sumatra, Indonesia // Geomedica. – 2013. – Vol. 11, No. 2. – P. 129-138.
4. Sun W., Xu G., Gong P., Liang S. Fractal Analysis of Remotely Sensed Images: A Review of Methods and Applications // International Journal of Remote Sensing. – 2006. – Vol. 27, No. 22. – P. 4963-4990.
5. Sarogu E., Bektas F., Musaoglu N., Goksel C. Fusion of Multisensor Remote Sensing Data: Assessing the Quality of Resulting Images // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2004. – Vol. XXXV-B4. – P. 575-579.
6. Riccio D. Fractal Dimension Images from SAR Images / D. Riccio, G.D. Martino, A. Iodice, G. Ruello, I. Zinno // 2014 IEEE International Conference on Image Processing, ICIP 2014. – 2014.
7. Lysenko T.M. An Adaptive Algorithm of Edge Detection in Radar Images // 2015 25th International Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo, 2015). September 6-12, 2015. Sevastopol, Conference Proceedings. In Two Volumes – Sevastopol. – 2015. – Vol. 2. – P. 1234-1235.

8. *De I., Chanda B.* A simple and efficient algorithm for multifocus image fusion using morphological wavelets // *Signal Processing*. – 2006. – Vol. 86. – P. 924-936.
9. *Gomathi R., Kumar A.* Inpainting for satellite imagery using thin plate spline radial basis function neural networks in shearlet domain // *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*. – 2014. – Vol. 27, No. 5. – P. 2391-2398.
10. *Шовенгердт Р.А.* Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. – М.: Техносфера, 2010. – 560 с.
11. *Коберниченко В.Г.* Радиоэлектронные системы дистанционного зондирования Земли. – Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2016. – 220 с.
12. *Shen H., Zhang L.* A MAP-based algorithm for destriping and inpainting of remotely sensed images // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2008. – Vol. 47, No. 5. – P. 1492-1502.
13. *Коберниченко В.Г., Тренхин В.А.* Анализ и разработка методов повышения информативности космических радиолокационных и мультиспектральных изображений // *Научные труды XII отчетной конференции молодых ученых УГТУ-УПИ*. – 2007. – С. 227-230.
14. *Semenishchev E.A., Voronin V.V., Marchuk V.I.* Image denoising and deblurring using multispectral data // *Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XXIII*. – International Society for Optics and Photonics, 2017. – Vol. 10198. – P. 101981G.
15. *Bertalmio M., Bertozzi A.L., Sapiro G.* Navier-stokes, fluid dynamics, and image and video inpainting // *Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR 2001*. – IEEE, 2001. – Vol. 1. – P. I-I.
16. *Guleryuz O.G.* Nonlinear approximation based image recovery using adaptive sparse reconstructions and iterated denoising-part I: theory // *IEEE Transactions on image processing*. – 2006. – Vol. 15, No. 3. – P. 539-554.
17. *Ибадов Р.П., Ибадов С.П., Воронин В.В., Федосов В.П.* Модифицированный метод реконструкции изображений на основе поиска подобных областей // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2017. – № 6 (191). – С. 179-189.
18. *Voronin V.V., Marchuk V.I., Sherstobitov A.I., Semenishchev E.A., Frantc V.A.* Image reconstruction on the basis of a textural geometrical model // *Pattern Recognition and Image Analysis*. – 2015. – Vol. 25, No. 3. – P. 553-562.
19. *Fedosov V.P., Ibadov R.R., Ibadov S.R., Voronin V.V.* Restoration of the Blind Zone of the Image of the Underlying Surface for Radar Systems with Doppler Beam Sharpening // *2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*. – IEEE, 2019. – P. 424-427.
20. *Gapon N., Ponomorenko M., Pismenskova M., Tokareva O.* Image inpainting using a neural network // *MATEC Web of Conferences*. – EDP Sciences, 2017. – Vol. 132. – P. 05015.

REFERENCES

1. *Singh M., Kaur A.P.H.* A Survey on Image Inpainting for Remotely Sensed Images, *IRACST-International Journal of Computer Science and Information Technology & Security*, Vol. 6, pp. 487-490.
2. *Sophia D.L., Lalitha K., Chandar J.P.* Reconstruction of cloud contaminated remote sensing images using inpainting strategy, *International Journal of Electronics Communication and Computer Technology*, 2013, Vol. 3, No. 3, pp. 407-411.
3. *Sunuprpto H., Hussin Y.A.* A Comparison Between Optical and Radar Satellite Images for Detecting Tropical Forest Fires in South Sumatra, Indonesia, *Geomedia*, 2013, Vol. 11, No. 2, pp. 129-138.
4. *Sun, W., Xu G., Gong P., Liang S.* Fractal Analysis of Remotely Sensed Images: A Review of Methods and Applications, *International Journal of Remote Sensing*, 2006, Vol. 27, No. 22, pp. 4963-4990.
5. *Sarogu E., Bektas F., Musaoglu N., Goksel C.* Fusion of Multisensor Remote Sensing Data: Assessing the Quality of Resulting Images, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2004, Vol. XXXV-B4, pp. 575-579.
6. *Riccio D.* Fractal Dimension Images from SAR Images / D. Riccio, G.D. Martino, A. Iodice, G. Ruello, I. Zinno, *2014 IEEE International Conference on Image Processing, ICIP 2014*.

7. *Lysenko T.M.* An Adaptive Algorithm of Edge Detection in Radar Images, *2015 25rd International Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo, 2015). September 6-12, 2015. Sevastopol, Conference Proceedings. In Two Volumes – Sevastopol, 2015, Vol. 2, pp. 1234-1235.*
8. *De I., Chanda B.* A simple and efficient algorithm for multifocus image fusion using morphological wavelets, *Signal Processing*, 2006, Vol. 86, pp. 924-936.
9. *Gomathi R., Kumar A.* Inpainting for satellite imagery using thin plate spline radial basis function neural networks in shearlet domain, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2014, Vol. 27, No. 5, pp. 2391-2398.
10. *Shovengerdt R.A.* Distantionnoe zondirovanie. Modeli i metody obrabotki izobrazheniy [Remote sensing. Models and methods of image processing]. Moscow: Tekhnosfera, 2010, 560 p.
11. *Kobernichenko V.G.* Radioelektronnye sistemy distantionnogo zondirovaniya Zemli [Radio-electronic systems of remote sensing of the Earth]. Ekaterinburg: Izd-vo Ural'skogo universiteta, 2016, 220 p.
12. *Shen H., Zhang L.* A MAP-based algorithm for destriping and inpainting of remotely sensed images, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, Vol. 47, No. 5, pp. 1492-1502.
13. *Kobernichenko V.G., Trenikhin V.A.* Analiz i razrabotka metodov povysheniya informativnosti kosmicheskikh radiolokatsionnykh i mul'tispektral'nykh izobrazheniy [Analysis and development of methods for increasing the information content of space radar and multispectral images], *Nauchnye trudy XII otchetnoy konferentsii molodykh uchenykh UGTU-UPI* [Scientific works of the XII reporting conference of young scientists of USTU-UPI], 2007, pp. 227-230.
14. *Semenishchev E.A., Voronin V.V., Marchuk V.I.* Image denoising and deblurring using multi-spectral data, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XXIII. International Society for Optics and Photonics, 2017, Vol. 10198, pp. 101981G.
15. *Bertalmio M., Bertozzi A.L., Sapiro G.* Navier-stokes, fluid dynamics, and image and video inpainting, *Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR 2001.* IEEE, 2001, Vol. 1, pp. I-I.
16. *Guleryuz O.G.* Nonlinear approximation based image recovery using adaptive sparse reconstructions and iterated denoising-part I: theory, *IEEE Transactions on image processing*, 2006, Vol. 15, No. 3, pp. 539-554.
17. *Ibadov R.R., Ibadov S.R., Voronin V.V., Fedosov V.P.* Modifitsirovannyi metod rekonstruktsii izobrazheniy na osnove poiska podobnykh oblastey [A modified method of image reconstruction based on the search for such areas], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 6 (191), pp. 179-189.
18. *Voronin V.V., Marchuk V.I., Sherstobitov A.I., Semenishchev E.A., Frantc V.A.* Image reconstruction on the basis of a textural geometrical model, *Pattern Recognition and Image Analysis*, 2015, Vol. 25, No. 3, pp. 553-562.
19. *Fedosov V.P., Ibadov R.R., Ibadov S.R., Voronin V.V.* Restoration of the Blind Zone of the Image of the Underlying Surface for Radar Systems with Doppler Beam Sharpening, *2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*. IEEE, 2019, pp. 424-427.
20. *Gapon N., Ponomorenko M., Pismenskova M., Tokareva O.* Image inpainting using a neural network, *MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences, 2017, Vol. 132, pp. 05015.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Д.А. Безуглов.

Ибадов Рагим Рауфевич – Южный федеральный университет; e-mail: ragim_ibadov@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 89298184480; аспирант.

Федосов Валентин Петрович – e-mail: vpfed@mail.ru; тел.: 89525601246; д.т.н.; профессор.

Воронин Вячеслав Владимирович – Донской государственный технический университет; e-mail: vgonin_sl@mail.ru; г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1; тел.: 89885343459; к.т.н.; заведующий лабораторией.

Ибадов Самир Рауфевич – Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) Донской государственный технический университет; e-mail: кууууууууууууу@yandex.ru; г. Шахты, ул. Шевченко, 147; тел.: 89518463738; аспирант.

Ibadov Ragim Raufevich – Southern Federal University; e-mail: ragim_ibadov@mail.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79298184480; graduate student.

Fedosov Valentin Petrovich – email: vpfed@mail.ru; phone: +79525601246; dr. of eng. sc.; professor.

Voronin Viacheslav Vladimirovich – Don State Technical University; e-mail: voronin_sl@mail.ru; 1, Gagarina sq., Rostov-on-Don, Russia; phone: +79885343459; cand. of eng. sc.; head of laboratory.

Ibadov Samir Raufevich – Institute of Service and Entrepreneurship (branch) Don State Technical University; e-mail: kyuyuyuyuyuyuyuy@yandex.ru; 147, Shevchenko street, Shakhty, Russia; phone: +79518463738; graduate student.

УДК 004.023

DOI 10.23683/2311-3103-2019-5-25-33

В.М. Курейчик, Ю.А. Логунова

ГИБРИДНЫЙ ПОДХОД ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КОММИВОЯЖЁРА С ПОМОЩЬЮ ОБЛАЧНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В СЕТИ ИНТЕРНЕТ*

Данная работа относится к области искусственного интеллекта. В ней рассматривается задача коммивояжёра, которая активно используется на практике в логистике, социологии, интеллектуальном проектировании, робототехнике, для решения задач поисковой оптимизации и во многих многих других областях научной деятельности. Задача коммивояжёра (ЗК) является фундаментальной, ввиду её теоретической и практической важности. Поскольку она является NP-полной, поиск решения ведётся в пространстве, растущем от n экспоненциально. Разработка новых методов её решения и модификация существующих по-прежнему остается актуальной задачей для исследователей. При решении ЗК большой размерности целесообразно использовать различные приближенные методы поиска её решения. Целью данного исследования является разработка гибридного меметического алгоритма решения ЗК и проверка его эффективности на современных бенчмарках. Меметические алгоритмы относятся к классу эволюционных методов решения, которые в общем случае доказывают свою эффективность при решении сложных оптимизационных задач. Основной методологической базой для проведения исследования является общая теория эволюционных вычислений. Особенностью данной работы является то, что проверка гибридного меметического алгоритма проводилась с использованием облачных вычислений в сети Интернет, что позволило увеличить вычислительную мощность и сократить время обработки данных. Время работы алгоритма составило $O(n^2)$, где n – количество городов (вершин графа). Была разработана специальная программа и проведен вычислительный эксперимент на современных бенчмарках: Pr76, kroD100, Pr152, Pr439, Pr1002. Для задачи Pr 76 и Pr152 результаты решения совпали с лучшими известными решениями. Разработанный алгоритм показал свою эффективность для решения задачи коммивояжёра до 1000 вершин. Результаты исследования практически совпали с теоретическими предположениями.

Меметический алгоритм; задача коммивояжёра; облачные вычисления; мутация; репликация; инверсия; процедура локального поиска.

V.M. Kureichik, Y.A. Logunova

THE HYBRID APPROACH FOR THE TRAVELLING SALESMAN PROBLEM SOLVING USING CLOUD COMPUTING IN THE INTERNET

This work relates to the field of artificial intelligence solving problems. It considers the traveling salesman problem, which is actively used in practice in logistics, sociology, intellectual design, robotics, to solve search engine optimization problems and many other areas of engineering activity. The traveling salesman problem is fundamental, in view of its theoretical and practi-

* Работа выполнена за счет частичного финансирования по гранту РФФИ №18-29-22019/18.