

Использование спектральных ландшафтных индексов для детектирования препятствий в задачах навигации мобильных робототехнических платформ на сельскохозяйственных территориях

М.А. Астапова¹ ✉, Е.А. Аксаментов¹

¹ Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук 14-я линия В.О., 39, г. Санкт-Петербург 199178, Российская Федерация

✉ e-mail: marinaastapova55@gmail.com

Резюме

Цель исследования. Целью исследования является разработка алгоритма детектирования препятствий на ортофотоплане местности на основе анализа спектральных ландшафтных индексов для использования в задачах навигации мобильных робототехнических средств на сельскохозяйственных территориях.

Методы. В работе были рассмотрены следующие ландшафтные индексы, характеризующие объекты различного типа на карте, полученной методом спектральной аэрофотосъемки: нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI), нормализованный индекс различий застройки (NDBI), нормализованный разностный индекс воды (NDWI) и почвенный растительный индекс (SAVI). Данные индексы обеспечивают оценку четырех основных классов объектов на карте: растительный покров, постройки, водные объекты и почвенный покров. Был предложен алгоритм, обеспечивающий сегментацию зон на карте, являющихся непроходимыми для наземных робототехнических средств, с использованием мультиспектральных изображений и рассмотренных индексов.

Результаты. Каждое изображение представляется в виде цветовой карты на основе попиксельного расчета указанных индексов. При этом три индекса SAVI, NDWI, NDBI совмещаются (накладываются друг на друга), а затем из результирующего изображения вычитается NDVI слой, чтобы выделить проходимые зоны. Таким образом, была получена формула для получения маски препятствий на изображении. На выходе данный алгоритм позволяет обобщить результаты расчета всех выбранных индексов и построить маску препятствий на изображении. Для количественной оценки работы алгоритма был произведен расчет площади препятствий, найденной при помощи индексов на выборке размеченных вручную изображений. Эксперименты показывают, что разработанный алгоритм в среднем обеспечивает детектирование 85,47% от площади всех непроходимых зон на изображениях в вышеуказанных классах земного покрова.

Заключение. Разработан и протестирован алгоритм для автоматизированного детектирования препятствий на карте, полученной из спектрального ортофотоплана местности, для использования в задачах навигации мобильных робототехнических средств на сельскохозяйственных территориях. В дальнейшем для определения ровных грунтовых участков планируется модифицировать разработанное решение, используя улучшенный модифицированный почвенный индекс MSAVI.

Ключевые слова: мультиспектральные изображения; карты местности; сегментация неопределенных зон; индексы для обработки изображений.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Астапова М.А., Аксаментов Е.А. Использование спектральных ландшафтных индексов для детектирования препятствий в задачах навигации мобильных робототехнических платформ на сельскохозяйственных территориях // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(1): 66-81. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-66-81>.

Поступила в редакцию 23.12.2020

Подписана в печать 12.02.2021

Опубликована 31.03.2021

Use of Spectral Landscape Indices for Obstacle Detection in the Tasks of Mobile Robotic Platforms Navigation in Agricultural Areas

Marina A. Astapova ¹ ✉, Egor A. Aksamentov ¹

¹ St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS),
St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences,
39, 14th Line, St. Petersburg 199178, Russian Federation

✉ e-mail: marinaastapova55@gmail.com

Abstract

Purpose or research is to develop an algorithm for detecting obstacles on the orthophotomap based on the analysis of the spectral landscape indices in the tasks of mobile robotic equipment navigation in agricultural areas.

Methods. The following landscape indices characterizing objects of various types on a map obtained by spectral aerial photography have been considered in the paper: normalized difference vegetation index (NDVI), normalized building difference index (NDBI), normalized difference water index (NDWI), and soil-adjusted vegetation index (SAVI). These indices provide an assessment of the four main classes of objects on the map: vegetation, buildings, water bodies, and soil cover. An algorithm that provides the segmentation of zones on the map which are impassable for ground robotic means using multispectral images and the considered indices was proposed.

Results. Each image is presented in the form of a colour map based on the pixel-by-pixel calculation of the indicated indices. In this case, three indices, i.e. SAVI, NDWI, NDBI, are combined (superimposed on each other), and then the NDVI layer is subtracted from the resulting image to highlight the passable zones. Thus, a formula to obtain a mask of obstacles in the image was obtained. Hence, this algorithm allows generalizing the results of calculations for all selected indices and constructing a mask of obstacles in the image. For quantitative assessment of the algorithm execution, the area of obstacles was calculated using the indices on a sample of manually marked images. The experiments conducted show that the developed algorithm provides, on average, detection of 85.47 % of the area of all impassable zones in the images in the above classes of land cover.

Conclusion. An algorithm for the automated detection of obstacles on a map obtained from a spectral orthophotomap of the area for use in the tasks of mobile robotic equipment navigation in agricultural areas has been developed and tested. In the further research, to determine flat soil areas, it is planned to modify the developed solution using the improved modified soil-adjusted vegetation index (MSAVI).

Keywords: multispectral images; area maps; segmentation of undefined zones; indexes for image processing.

Conflict of interest. *The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

For citation: Astapova M. A., Aksamentov E. A. Use of Spectral Landscape Indices for Obstacle Detection in the Tasks of Mobile Robotic Platforms Navigation in Agricultural Areas. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(1): 66-81 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-66-81>.

Received 23.12.2020

Accepted 12.02.2021

Published 31.03.2021

Введение

Методы сегментации непроходимых зон и препятствий на картах местности служат для решения задачи планирования движения мобильных робототехнических комплексов (РТК) на различных территориях [1,2]. Для построения маршрута навигационная система РТК должна заранее знать план местности с отмеченными на нем участками, являющимися непроходимыми зонами при его движении [3,4,5]. Данные дистанционного зондирования являются первичными источниками, широко используемыми для обнаружения различных типов земного покрова и препятствий [1]. Часто для картирования земного покрова применяется анализ спектральных характеристик спутниковых изображений или изображений, полученных при помощи беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Поскольку все объекты на изображении имеют определенный спектральный контур, то возможно их использовать для выделения определенных типов сегментов [6]. В исследованиях, посвященных дистанционному зондированию, часто используются соотношения различных полос. Наиболее известный и распространенный способ

оценки ландшафта местности основывается на различных мультиспектральных индексах. Для проведения такой оценки необходимо выбрать несколько видов индексов, чтобы сегментировать различные типы земного покрова для планирования движения РТК.

Материалы и методы

При движении РТК препятствиями могут являться различные объекты, водоемы, постройки, камни, и растительность. Нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI) [7], в основном, используется в аграрной отрасли для мониторинга растительности, оценки состояний почвы и т.д. В данной статье рассматривается применение индекса NDVI для поиска препятствий на аграрной местности для дальнейшего осуществления навигации РТК. Рассмотрим некоторые существующие решения в данной области.

В статье [8] предложен подход к локализации препятствий для решения задач навигации робототехнических комплексов на аграрных территориях. Разработанный подход основывается на комбинировании результатов расчета индексов NDVI и работы нейронной сети. Подход в среднем обеспечивает об-

наружение 88% общей площади всех препятствий. Для расчета NDVI используются красные и ближние инфракрасные полосы. В красной области спектра (0,6–0,7 мкм) лежит максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом, а в ближнем участке инфракрасной области (0,7–1,3 мкм) находится область максимального отражения энергии клеточной структурой листа. То есть высокая фотосинтетическая активность (связанная, как правило, с густой растительностью) ведет к более низким значениям коэффициентов отражения в красном спектре и большим значениям в ближней инфракрасной области [9]. Нездоровая или редкая растительность отражает больше видимого света и меньше ближнего инфракрасного света. С помощью индекса NDVI можно детектировать следующие типы препятствий для мобильных РТК – кустарники, деревья, высокая растительность. Нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI) выбран потому, что форма сравнения между инфракрасным диапазоном и красным диапазоном минимизирует условия освещенности, вызванные изменениями рельефа, атмосферных условий и облачного покрова, а также благодаря большому количеству исследований, посвященных данному индексу.

В исследовании [10] приведен эффективный анализ обнаружения водоемов с использованием показателей нормализованного разностного водного индекса (NDWI), полученных со спутника

Landsat-8 OLI. Водные объекты обладают высокой поглощающей способностью и низким уровнем излучения в диапазоне от видимого до инфракрасного диапазона длин волн. В индексе используются зеленые и ближние инфракрасные полосы изображений дистанционного зондирования. Растительность имеет гораздо меньшие значения, что позволяет легче отличать растительность от водоемов [11]. В работе был выбран именно этот индекс, так как он прост в использовании и один из немногих индексов воды, который сегментирует именно водоемы. В отличие от модифицированного нормализованного разностного индекса воды (MNDWI), индекса влагостойкости (MSI), индекса воды (WI) и водного стресса (WRI), которые позволяют количественно оценить физиологический стресс растений из-за потери воды, обнаруживая изменения относительного содержания воды в листьях.

Для мониторинга и обнаружения изменений земного покрова, которые часто в результате непрекращающейся урбанизации, также используются спутниковые снимки. Для решения задачи выявления городских построек был предложен нормированный разностный индекс (NDBI), который обеспечивает автоматизацию процесса картирования населенных пунктов [12]. В работе [13] предложены методы построения индекса и их применение для извлечения данных о строениях со спутниковых данных Sentinel 2A. Городские строения

часто путают с голой почвой и бесплодной землей, поэтому в работе анализировались некоторые индексы застройки (NDBI, IBI, NBI, NBAI, MBI, NDSV, BRBA, BAEI, NDISI, BCI, CBI) и их преимущества и ограничения. NDBI в отличие от остальных представленных индексов показал следующие преимущества: скорость вычисления, благодаря упрощенной формуле; высокие коэффициенты корреляции; эффективно увеличивает контраст интенсивности между голой почвой и городской поверхностью. NDBI индекс выделяет городскую застройку, в которой обычно наблюдается более высокая отражательная способность в коротковолновой инфракрасной (SWIR) области по сравнению с ближней инфракрасной (NIR) областью. Отрицательное значение NDBI представляет водные объекты, где в качестве более высокого значения представляют районы застройки. Значение NDBI для растительности низкое. NDBI применим к мультиспектральным изображениям с полосой SWIR между 1,55-1,75 мкм и полосой NIR между 0,76-0,9 мкм [14]. NDBI позволяет детектировать препятствия в виде городских застроек, искусственных объектов (дома, заборы, агропромышленная техника и т.п.). В исследовании [15] NDBI оказался наиболее эффективным, чем другие индексы застройки (EBBI, UI, NDBaI), при распознавании застроенных территорий. Точность сегментирования застройки составила в среднем 76,45%.

Последний тип земного покрова – это почва. Для выделения почвы существует индекс растительности с поправкой на почву (SAVI) в некоторой степени схож с NDVI, но использует коэффициент L для корректировки воздействия шума почвы, который влияет на результаты обработки данных [16]. Этот индекс применяется для засушливых районов с редкой растительностью (менее 15% от общей площади) и открытых поверхностей почвы. SAVI позволяет детектировать голый грунт, почву (овраги, ямы).

Для выделения почвы также существует модифицированный индекс растительности с поправкой на почву (MSAVI) [17]. MSAVI можно использовать в качестве параметра для отражения степени опустынивания земли [18]. На данном этапе работы применение этого индекса невозможно из-за низкого качества мультиспектрального изображения.

На основе вышепроведенного обзора были выбраны четыре индекса для проведения дальнейшего исследования. Выбранные индексы: NDBI, NDWI, NDVI, SAVI, позволяют сегментировать на изображениях различные типы земного покрова и выделять следующие неопределимые зоны: постройки, водоемы, растительность, голый грунт или почва. Для объединения результатов применения различных индексов к мультиспектральным изображениям был разработан алгоритм, который рассматривается далее.

Для решения задачи сегментации непроходимых зон для наземных РТК с помощью индексов NDVI, NDWI, NDBI, SAVI был разработан алгоритм, представленный на рис. 1.

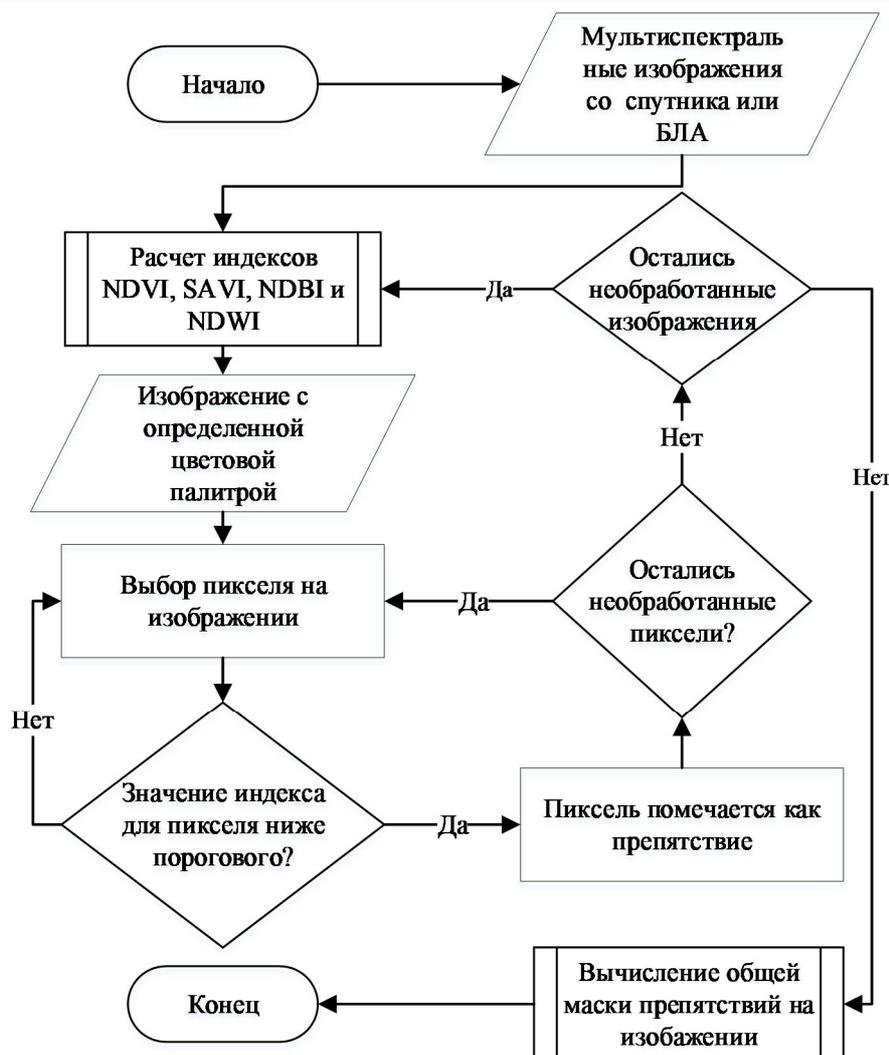


Рис. 1. Алгоритм детектирования препятствий при помощи вегетационных индексов

Fig. 1. Algorithm for detecting obstacles using vegetation indices

На вход алгоритма поступают мультиспектральные изображения со спутника или БПЛА. Для этих изображений рассчитываются выбранные индексы. Формула для расчета NDVI:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED},$$

где NIR – изображение в ближнем инфракрасном диапазоне (~833 нм), RED – изображение в красном диапазоне (~665 нм).

Значение индекса SAVI для пикселя принимаем $< 0,1$ [19]. Формула для расчета SAVI:

$$SAVI = (1 + L) \cdot \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED + L)},$$

где L – поправочный коэффициент яркости почвы, такой, что $0 \leq L \leq 1$, (рекомендованный коэффициент от Sentinel Hub $L = 0,48$).

Значения индекса NDWI для пикселя принимаем $> 0,5$ [20]. Формула для расчета NDWI:

$$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR},$$

где $GREEN$ – изображение в видимом (зеленом) диапазоне (~560 нм).

Значения индекса NDBI принимаем от 0,1 до 0,3 (площадь застройки) [21].

Формула для расчета NDBI:

$$NDBI = \frac{SWIR_1 - NIR}{SWIR_1 + NIR},$$

где $SWIR_1$ – изображение в коротковолновом инфракрасном диапазоне (~1610 нм).

Далее выбирается значения индексов для пикселя. Значение индекса NDVI для пикселя принимаем $> 0,2$, так как растительные объекты лежат в диапазоне от 0,2 до 1 [22]. На основе полученных значений индекса выделяются

нерастительные участки, которые помечаются, как непроходимые зоны. NDVI индекс пиксель за пикселем вычитает значение красной полосы из значения NIR-полосы и делит на их сумму.

Результаты и их обсуждение

Для сегментирования препятствий в работе был использован открытый источник для получения мультиспектральных изображений [23]. На рис. 2 представлен пример изображения, который будет в дальнейшем использоваться для исследования.



Рис. 2. Изображение территории в истинном цвете

Fig. 2. The true colour image of the territory

Для вычисления индексов SAVI, NDVI, NDWI, NDBI извлекались различные части из изображения (рис. 2), для которых применялась обработка по алгоритму детектирования препятствий,

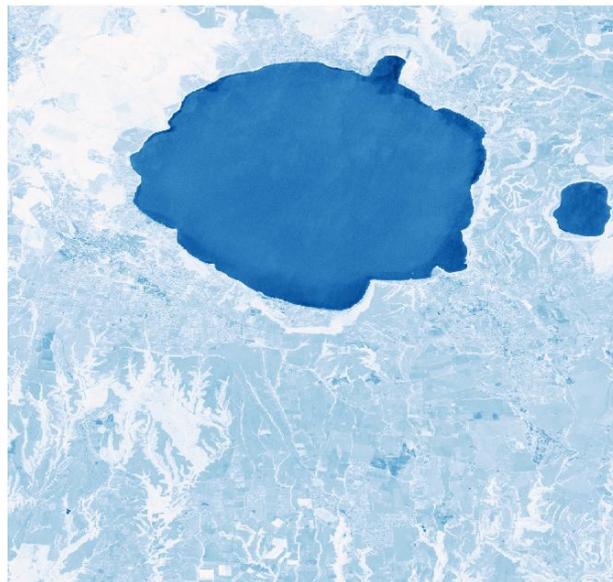
представленного на рис. 1. Рассчитанные индексы NDVI SAVI, NDWI, NDBI представлены в виде различных наборов цветовых карт (рис. 3). Для индекса NDVI использовалась цветовая карта –

«красно-зеленая», где зеленый цвет указывает на растительность, а красный – на нерастительные объекты [24]. Для SAVI была выбрана «бело-коричневая» цветовая карта, где коричневый цвет указывает на почву. Для представления

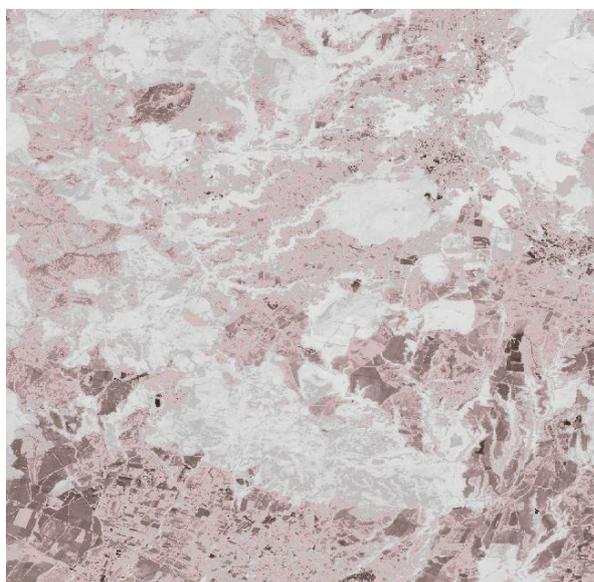
NDWI была выбрана цветовая «бело-синяя» карта, где синий – водоемы, а для NDBI применяли «черно-белую» карту, где черные оттенки указывают на зоны застройки.



а) NDVI-карта



б) NDWI-карта



в) SAVI-карта



г) NDBI-карта

Рис. 3. Пример расчета индексов**Fig. 3.** Example of index calculation

На рис. 3а представлена SAVI-карта местности, коричневые оттенки палитры указывают на голый грунт и

почву. На рис. 3б представлена NDVI-карта местности, на которой зеленый цвет указывает на наличие раститель-

ных объектов на ее территории. На рис. 3в представлена NDWI-карта местности, где темно-синий цвет явно различимы различные водоемы. На рис. 3г представлена NDBI-карта местности, где черный цвет указывает наличие городских застроек (домов, дорог и т.п.).

Для количественной оценки работы алгоритма был произведен расчет площади препятствий, найденной при помощи индексов. Для этого вручную были размечены 35 изображений. Размеченные вручную данные были взяты в качестве эталонных значений. Для того чтобы определить процентное соотно-

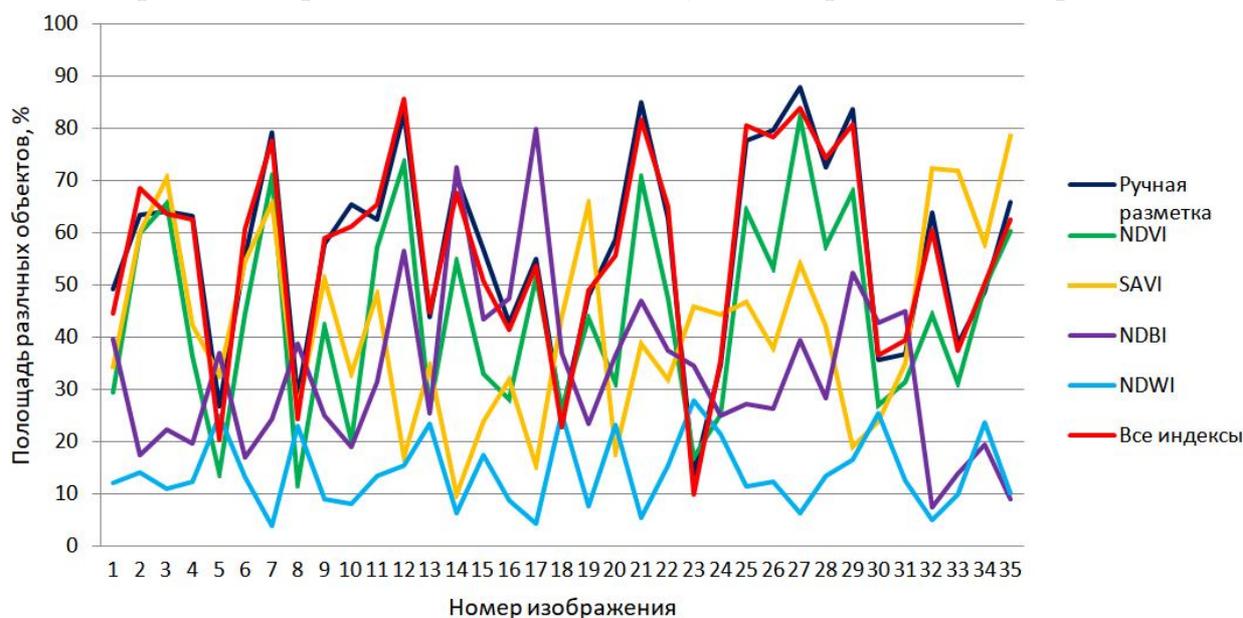


Рис. 4. Сравнение площадей препятствий, найденных при помощи различных индексов, с эталонным значением

Fig. 4. Comparison of the areas of obstacles found using different indices with a reference value

На рис. 4 отдельно показаны четыре исследуемых индекса (зеленая, желтая, фиолетовая и синяя линии). Ручная разметка сегментирует все препятствия, в то время как индексы определяют только определенный тип местности (NDVI-растительность, NDWI-водоемы, NDBI-за-

шение территории занятой препятствиями к свободной был произведен расчет отношения суммарной площади, занимаемой препятствиями, ко всей площади изображения. Затем для исходных изображений был произведен поиск препятствий в отдельности каждым индексом.

Для сравнения площадей найденных неопределимых зон, посредством каждого из индексов, были вручную размечены изображения, которые представляют собой эталонные значения площади препятствий. Полученные результаты представлены на рис. 4.

стройки и SAVI-голый грунт/горная местность). Разработанный ранее алгоритм позволяет обобщить результаты расчета всех индексов и построить маску препятствий на изображении (*Mask*). NDVI индекс выделяется на графике среди остальных, так как он был ис-

пользован для того, чтобы движение РТК осуществлялось по траве, то есть растительности. В итоге, получается следующая последовательность действий: три обработанных индекса с определенным диапазоном пикселей SAVI, NDWI, NDBI совмещаются (накладываются друг на друга), а затем отнимается NDVI слой, чтобы выделить проходимые зоны. Полученная формула для получения маски *Mask* выглядит так:

$Mask = 100 - (SAVI + NDWI + NDBI - NDVI)$.
На рис. 5 представлены примеры полученной карты местности. Использование индекса SAVI позволило определить в среднем 34%, NDBI – 26%, NDWI – 8%, а разработанный подход в среднем обеспечивает детектирование 85,47% от общей площади всех препятствий на изображении.

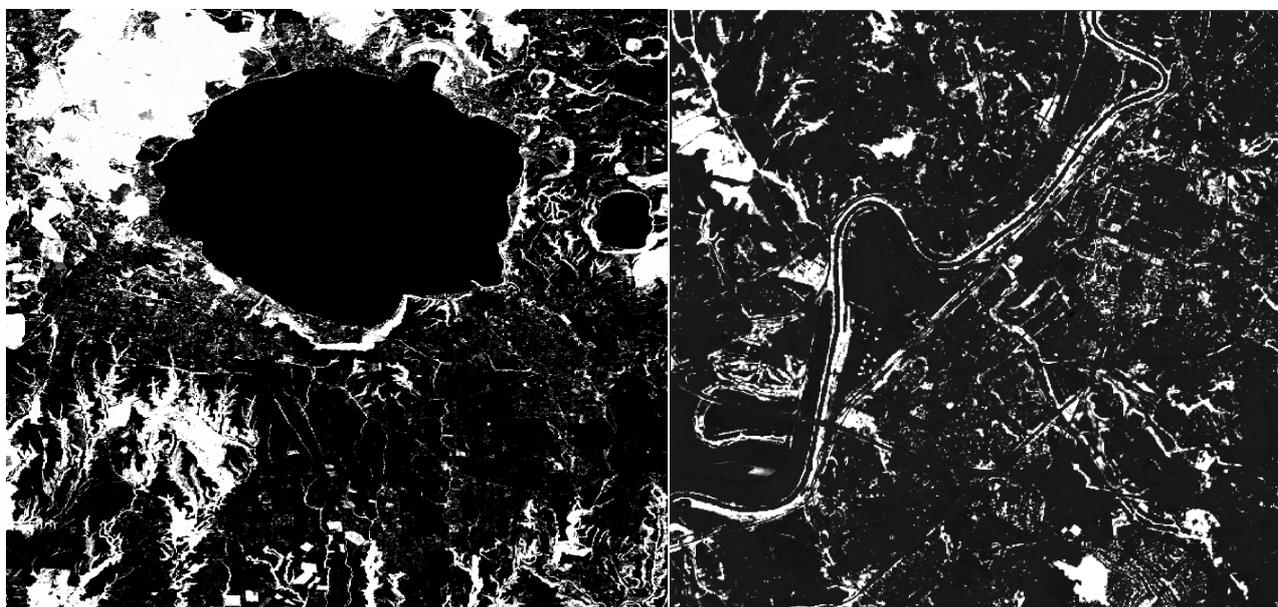


Рис. 5. Пример карты местности и маска препятствий

Fig. 5. Example of a map and an obstacle mask

В результате, объединение полученной информации позволяет представить карту местности в виде бинарного изображения, где черным отмечены возможные препятствия, а белым участки, где движение РТК разрешено. Преимуществом разработанного подхода является возможность сегментировать большую часть потенциальных типов препятствий еще до момента движения РТК. К недостаткам данного подхода

можно отнести случаи, когда NDVI индекс относит к растительности деревья, которые являются преградой для РТК. А также на аграрных территориях дороги не должны считаться препятствиями для движения РТК. Таким образом, возникает необходимость внедрения дополнительных методов для сегментации растительных объектов и дорог, к примеру, использование свёрточных нейронных сетей и высококачественных

снимков. Данный алгоритм можно улучшить, используя индекс SAVI для определения ровных грунтовых участков, так же, как и траву для движения РТК, но на данном этапе работы это невозможно из-за низкого качества мультиспектрального изображения.

Выводы

В данной статье предложен алгоритм локализации препятствий в задаче навигации робототехнических комплексов. Основная идея заключается в использовании четырех индексов растительности, которые выделяют конкретные типы местности. Для поиска растительных типов препятствий использовался индекс NDVI, для водных препятствий – индекс NDWI, для застроенных участков индекс NDBI и для определения голого грунта или гористой местности индекс SAVI. Одновременное использование рассмотренных индексов позволило увеличить качество нахождения препятствий. Такой подход позволяет обобщить результаты расчета индексов и построить маску препятствий на изображении (*Mask*) и получить формулу. NDVI индекс был использован для того, чтобы движение РТК осуществлялось по траве, то есть растительности. В итоге, получается

следующая последовательность действий: три индекса SAVI, NDWI, NDBI совмещаются (накладываются друг на друга), а затем отнимается NDVI слой, чтобы выделить проходимые зоны. Разработанный алгоритм в среднем обеспечивает детектирование 85,47% от общей площади всех препятствий, в то время как индексы по отдельности определяют препятствия намного ниже, так как использование индекса SAVI позволило определить около 34% от общей площади препятствий, NDBI – 26%, NDWI – 8%. К недостаткам данного подхода можно отнести случаи, когда NDVI индекс относит к растительности деревья, которые являются преградой для РТК. Также на аграрных территориях дороги не должны считаться препятствиями. Таким образом, возникает необходимость внедрения дополнительных методов для сегментации некоторых классов растительных объектов и дорог. Для этих целей могут использоваться, к примеру, свёрточные нейронные сети. Данный алгоритм можно улучшить, используя индекс MSAVI для определения ровных грунтовых участков, однако для этого требуются мультиспектральные изображения более высокого качества.

Список литературы

1. Approach to robotic mobile platform path planning upon analysis of aerial imaging data / E. Aksamentov, K. Zakharov, D. Tolopilo, E. Usina // Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics" Zavalishin's Readings". Springer, Singapore 2020. P. 93-103. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5580-0_7.

2. Endo T., Maeda R., Matsuno F. Stability Analysis of Swarm Heterogeneous Robots with Limited Field of View // Информатика и автоматизация. 2020. Vol. 19. №. 5. P. 942-966.
3. Zakharov K., Saveliev A., Sivchenko O. Energy-Efficient Path Planning Algorithm on Three-Dimensional Large-Scale Terrain Maps for Mobile Robots // International Conference on Interactive Collaborative Robotics. Springer, Cham. 2020. P. 319-330.
4. Levonevskiy D., Karasev E., Aksamentov E. Architecture and Algorithms of Geospatial Service for Navigation of Robotic Complexes // Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics" Zavalishin's Readings". Springer, Singapore, 2020. P. 433-442.
5. Saveliev A., Aksamentov E., Karasev E. Automated terrain mapping based on mask R-CNN neural network // International Journal of Intelligent Unmanned Systems. 2020.
6. Szabó S., Gacsi Z., Balázs B. Specific features of NDVI, NDWI and MNDWI as reflected in land cover categories // Acta Geographica Debrecina Landscape & Environment. 2016. Vol. 10. №3-4. P. 194-202.
7. Paper A 20 / Jr J. W. Rouse, R. H. Haas, J. A. Schell, D. W. Deering // Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium: The Proceedings of a Symposium Held by Goddard Space Flight Center at Washington, DC on December 10-14, 1973: Prepared at Goddard Space Flight Center. Scientific and Technical Information Office, National Aeronautics and Space Administration. 1974. Vol. 351. P. 309.
8. Aksamentov E., Astapova M., Usina E. Approach to Obstacle Localization for Robot Navigation in Agricultural Territories // International Conference on Interactive Collaborative Robotics. Springer, Cham, 2020. P. 13-20.
9. Ganie M. A., Nusrath A. Determining the vegetation indices (NDVI) from Landsat 8 satellite data // International Journal of Advanced Research. 2016. Vol. 4. №8. C. 1459-1463.
10. Özelkan E. Water body detection analysis using NDWI indices derived from Landsat-8 OLI // Polish Journal of Environmental Studies. 2020. Vol. 29. №2. P. 1759-1769.
11. Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // International journal of remote sensing. 2006. Vol. 27. № 14. P. 3025-3033.
12. Zha Y., Gao J., Ni S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery // International journal of remote sensing. 2003. Vol. 24. №3. P. 583-594.
13. Built-up index methods and their applications for urban extraction from Sentinel 2A satellite data: discussion / J. C. Valdiviezo-N, A. Téllez-Quiñones, A. Salazar-Garibay, A. A. López-Caloca // JOSA A. 2018. Vol. 35. №1. P. 35-44.

14. Karanam H. K., Neela V. B. Study of normalized difference built-up (NDBI) index in automatically mapping urban areas from Landsat TN imagery // *Int J Eng Sci Math*. 2017. Vol. 8. P. 239-48.

15. Analysis for Mapping of Built-Up Area Using Remotely Sensed Indices—A Case Study of Rajarhat Block in Barasat Sadar Sub-Division in West Bengal (India) / K. D. Ghosh, A. Ch Mandal, R. Majumder, P. Patra, S. G. Bhunia // *Journal of Landscape Ecology*. 2018. Vol. 11. №2. P. 67-76.

16. Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images / S. Candiago, F. Remondino, M. De Giglio, M. Dubbini, M. Gattelli // *Remote sensing*. 2015. Vol. 7. №4. P. 4026-4047.

17. A modified soil adjusted vegetation index / J. Qi, A. Chehbouni, A. R. Huete, Y. H. Kerr, S. Sorooshian // *Remote sensing of environment*. 1994. Vol. 48. №2. P. 119-126.

18. Study of the desertification index based on the albedo-MSAVI feature space for semi-arid steppe region / Z. Wu, S. Lei, Z. Bian, J. Huang, Y. Zhang // *Environmental Earth Sciences*. 2019. Vol. 78. №6. P. 232.

19. Ahwan Z., Hasyim M., Sunarno H. Pendampingan Pemuda Suku Tengger dalam Pengembangan Wisata Kawasan Hinterland Gunung Bromo Sebagai Wisata Alam Dan Budaya melalui Penguatan Skill Komunikasi Kepariwisata di Kabupaten Pasuruan // *Engagement: Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*. 2019. Vol. 3. №2. P. 173-193.

20. Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with modified normalized difference water index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the SWIR band / Y. Du, Y. Zhang, F. Ling, Q. Wang, W. Li, X. Li // *Remote Sensing*. 2016. Vol. 8. №4. P. 354.

21. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes / X. L. Chen, H. M. Zhao, P. X. Li, Z. Y. Yin // *Remote sensing of environment*. 2006. Vol. 104. №2. P. 133-146.

22. Hashim H., Abd Latif Z., Adnan N. A. Urban vegetation classification with NDVI threshold value method with very high resolution (VHR) PLEIADES Imagery // *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2019. P. 237-240.

23. ESA Earth Observation. 2020 [обновлено 10 декабря 2020; процитировано 14 декабря 2020]. URL: <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>.

24. Genik, Warren. Case Study: Wild Oat control efficiency using UAV imagery – Green Aero Tech. 2015 [обновлено 10 ноября 2020; процитировано 14 декабря 2020]. URL: <https://www.greenaerotech.com/case-study-wild-oatcontrol-efficiency-using-uav-imagery/>.

References

1. Aksamentov E., Zakharov K., Tolopilo D., Usina E. Approach to robotic mobile platform path planning upon analysis of aerial imaging data. *Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics" Zavalishin's Readings"*. Springer, Singapore, 2020, pp. 93-103. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5580-0_7.
2. Endo T., Maeda R., Matsuno F. Stability Analysis of Swarm Heterogeneous Robots with Limited Field of View. *Informatika i avtomatizacija = Informatics and Automation*, 2020, vol. 19, no. 5, pp. 942-966 (In Russ.).
3. Zakharov K., Saveliev A., Sivchenko O. Energy-Efficient Path Planning Algorithm on Three-Dimensional Large-Scale Terrain Maps for Mobile Robots. *International Conference on Interactive Collaborative Robotics. Springer, Cham*. 2020, pp. 319-330.
4. Levonevskiy D., Karasev E., Aksamentov E. Architecture and Algorithms of Geospatial Service for Navigation of Robotic Complexes. *Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics" Zavalishin's Readings"*. Springer, Singapore, 2020, pp. 433-442
5. Saveliev A., Aksamentov E., Karasev E. Automated terrain mapping based on mask R-CNN neural network. *International Journal of Intelligent Unmanned Systems*, 2020.
6. Szabó S., Gacsi Z., Balázs B. Specific features of NDVI, NDWI and MNDWI as reflected in land cover categories. *Acta Geographica Debrecina Landscape & Environment*, 2016, vol. 10, no.3-4, pp. 194-202.
7. Rouse Jr J. W., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W. Paper A 20. Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium: The Proceedings of a Symposium Held by Goddard Space Flight Center at Washington, DC on December 10-14, 1973: Prepared at Goddard Space Flight Center. – Scientific and Technical Information Office, National Aeronautics and Space Administration. 1974, vol. 351, pp. 309.
8. Aksamentov E., Astapova M., Usina E. Approach to Obstacle Localization for Robot Navigation in Agricultural Territories. *International Conference on Interactive Collaborative Robotics. Springer, Cham*, 2020, pp. 13-20.
9. Ganie M. A., Nusrath A. Determining the vegetation indices (NDVI) from Landsat 8 satellite data. *International Journal of Advanced Research*, 2016, vol. 4, no.8, pp. 1459-1463.
10. Özelkan E. Water body detection analysis using NDWI indices derived from Landsat-8 OLI. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2020, vol. 29, no.2, pp. 1759-1769.
11. Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International journal of remote sensing*, 2006, vol. 27, no. 14, pp. 3025-3033.

12. Zha Y., Gao J., Ni S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International journal of remote sensing*, 2003, vol. 24, no.3, pp. 583-594.

13. Valdiviezo-N J. C., Téllez-Quiñones A., Salazar-Garibay A., López-Caloca, A. A. Built-up index methods and their applications for urban extraction from Sentinel 2A satellite data: discussion. *JOSA A*, 2018, vol. 35, no. 1, pp. 35-44.

14. Karanam H. K., Neela V. B. Study of normalized difference built-up (NDBI) index in automatically mapping urban areas from Landsat TN imagery. *Int J Eng Sci Math*, 2017, vol. 8, pp. 239-48.

15. Ghosh K. D., Ch Mandal A., Majumder R., Patra P., Bhunia S. G. Analysis for Mapping of Built-Up Area Using Remotely Sensed Indices—A Case Study of Rajarhat Block in Barasat Sadar Sub-Division in West Bengal (India). *Journal of Landscape Ecology*, 2018, vol. 11, no.2, pp. 67-76.

16. Candiago S., Remondino F., De Giglio M., Dubbini M., Gattelli M. Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images. *Remote sensing*, 2015, vol. 7, no.4, pp. 4026-4047.

17. Qi J., Chehbouni A., Huete A. R., Kerr Y. H., Sorooshian, S. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote sensing of environment*, 1994, vol. 48, no.2, pp. 119-126.

18. Wu Z., Lei S., Bian Z., Huang J., Zhang Y. Study of the desertification index based on the albedo-MSAVI feature space for semi-arid steppe region. *Environmental Earth Sciences*, 2019, vol. 78, no.6, pp. 232.

19. Ahwan Z., Hasyim M., Sunarno H. Pendampingan Pemuda Suku Tengger dalam Pengembangan Wisata Kawasan Hinterland Gunung Bromo Sebagai Wisata Alam Dan Budaya melalui Penguatan Skill Komunikasi Kepariwisata di Kabupaten Pasuruan. *Engagement: Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 2019, vol. 3, no.2, pp. 173-193.

20. Du Y., Zhang Y., Ling F., Wang Q., Li W., Li X. Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with modified normalized difference water index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the SWIR band. *Remote Sensing*, 2016, vol. 8, no.4, pp. 354.

21. Chen X. L., Zhao H. M., Li P. X., Yin, Z. Y. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. *Remote sensing of environment*, 2006, vol. 104, no.2, pp. 133-146.

22. Hashim H., Abd Latif Z., Adnan N. A. Urban vegetation classification with NDVI threshold value method with very high resolution (VHR) PLEIADES Imagery. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2019. pp. 237-240.

23. ESA Earth Observation. 2020. Available at: <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>.

24. Genik Warren. Case Study: Wild Oat control efficiency using UAV imagery – Green Aero Tech. 2015. Available at: <https://www.greenaerotech.com/case-study-wild-oat-control-efficiency-using-uav-imagery/>.

Информация об авторах / Information about the Authors

Астапова Марина Алексеевна, программист лаборатории автономных робототехнических систем, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: marinaastapova55@gmail.com

Marina A. Astapova, Programmer of Laboratory of Autonomous Robotic Systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: marinaastapova55@gmail.com

Аксаментов Егор Алексеевич, младший научный сотрудник лаборатории технологий больших данных социокиберфизических систем, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: egor.aksamentov.96@mail.ru

Egor A. Aksamentov, Junior researcher of Laboratory of Big Data Technologies in Socio-Cyberphysical Systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: egor.aksamentov.96@mail.ru