



<https://doi.org/10.36023/ujrs.2021.8.4.205>

УДК 528.8.04:519.25

Програмно-технологічний комплекс ідентифікації морських суден на базі використання радарних космічних знімків Sentinel 1

А. В. Кузьмін^{1*}, Г. Г. Верюжський², Л. Д. Греков², О. А. Петров

¹ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, вул. Володимирська, 64, Київ, 01017, Україна

² ООО НВП “Вектор”, пров. Лабораторний, 1, офіс 450, Київ, 01133, Україна

³ ООО НВП “Агроресурсисистеми”, пров. Лабораторний, 1, офіс 452, Київ, 01133, Україна

У статті розглядається завдання використання космічних знімків радарного діапазону для ідентифікації морських суден. Дається опис основних функцій програмно-технологічного комплексу автоматизованого моніторингу. Система реалізується за допомогою космічних знімків радарних супутників Sentinel 1A (B).

Детально описана алгоритмічна частина, яка реалізує виявлення на морській поверхні позначок, що асоціюються із суднами. Для зменшення впливу спекл-шуму знімок попередньо обробляється за допомогою покращеного Лі-фільтра. Подальша обробка полягає в застосуванні адаптивного порогового алгоритму, який забезпечує виявлення для кожного локального фонового фрагмента знімка незвичайно яскравих пікселів, при цьому алгоритм забезпечує постійну ймовірність помилок. Шляхом розв’язання нелінійного рівняння, для кожного положення фонового вікна алгоритм знаходить порогове значення яскравості, вище якого усі пікселі вважаються суднами. Попередньо для кожного положення фонового вікна оцінюються параметри статистичного розподілу яскравості пікселів. Як такий розподіл використовується К-розподіл. Виділені яскраві пікселі об’єднуються в компактні групи, визначається їх розмір та координати. Отримані результати порівнюються з даними Автоматичної ідентифікаційної системи суден AIS, а результати відображаються на картографічній основі.

Ключові слова: радарний космічний знімок, Sentinel 1, адаптивний пороговий алгоритм, спекл-шум, оцінка параметрів розподілу, К-розподіл.

© А. В. Кузьмін, Г. Г. Верюжський, Л. Д. Греков, О. А. Петров. 2021

1. Вступ

У сучасному світі морський транспорт відіграє провідну роль, зокрема це морські перевезення вантажів, номенклатура яких дуже різноманітна, починаючи від сировинного експорту нафти і нафтопродуктів, вугілля, руд, скрапленого газу, промислових товарів та устаткування, окрім того, це морські та прибережні пасажирські перевезення, включаючи круїзні маршрути, промисловий вилов риби і морепродуктів, видобуток корисних копалин з морських платформ, а також переміщення військових суден. Велике навантаження на основні морські шляхи часто призводить до нештатних ситуацій, які ускладнюють транспортування вантажів та завдають значних економічних збитків. Достатньо пригадати аварію 23 березня 2021 року в Суецькому каналі з контейнеровозом Ever Given, яка спричинила величезні економічні втрати, або численні аварії з танкерами та нафтовидобувними платформами, дії піратів із захоплення суден та вантажів.

Все це підвищує роль об’єктивної інформації про стан судноплавства в зонах найбільш активної економічної або військової діяльності.

Слід зазначити, що існують автоматичні системи ідентифікації суден, зокрема Автоматична ідентифікаційна система (AIS, англ. *Automatic Identification System*, AIS) – це система у судноплаванні, що служить для ідентифікації суден, їх габаритів, курсу та інших даних за допомогою радіохвиль діапазону високих частот УКХ, система FleetMon – відкрита база даних, яка надає інформацію про більш, ніж 500000 суден. Shipfinder – широко використовувана служба відстеження суден у режимі онлайн, Vesseltracker – база даних про більш, ніж 1 млн. суден, що надає актуальні і минулі дані про рейси в усьому світі, яка включає характеристики суден, інформацію про власників і менеджмент, умовно безкоштовні системи MarineTraffic і VesselFinder. Однак, усі ці системи базуються на добровільній згоді суден надавати інформацію у відповідну систему.

У разі нештатних ситуацій – аварія, екологічні порушення, військові дії на морі, піратство, незаконне видобування морських ресурсів, – інформація про такі судна в системі відсутня або викривлена. В таких випадках отримання об’єктивної, незалежної від власника судна, інформації набуває великого значення.

Серед методів об’єктивного контролю судноплавства широко використовується метод

* E-mail: kuzmin_a_b@ukr.net

космічного дистанційного зондування за допомогою супутників радарного діапазону середнього просторового розрізнення, які здатні забезпечити велике територіальне покриття та спостерігати морські акваторії, незалежно від стану атмосфери.

Розглянемо програмно-технологічний комплекс ідентифікації суден (ПТКІС), який побудовано за даними космічних знімків вільного доступу радарного супутника Sentinel 1. Використовуються

знімки, отримані в режимі Interferometric Wide, продукт Level-1 GRDH, з подвійною поляризацією VV, VH (режим LSDV).

На Рис. 1 зображено фрагмент космічного знімка Sentinel 1 поляризації VH, на якому червоними рамками виділені групи суден в акваторії Одеського морського порту.

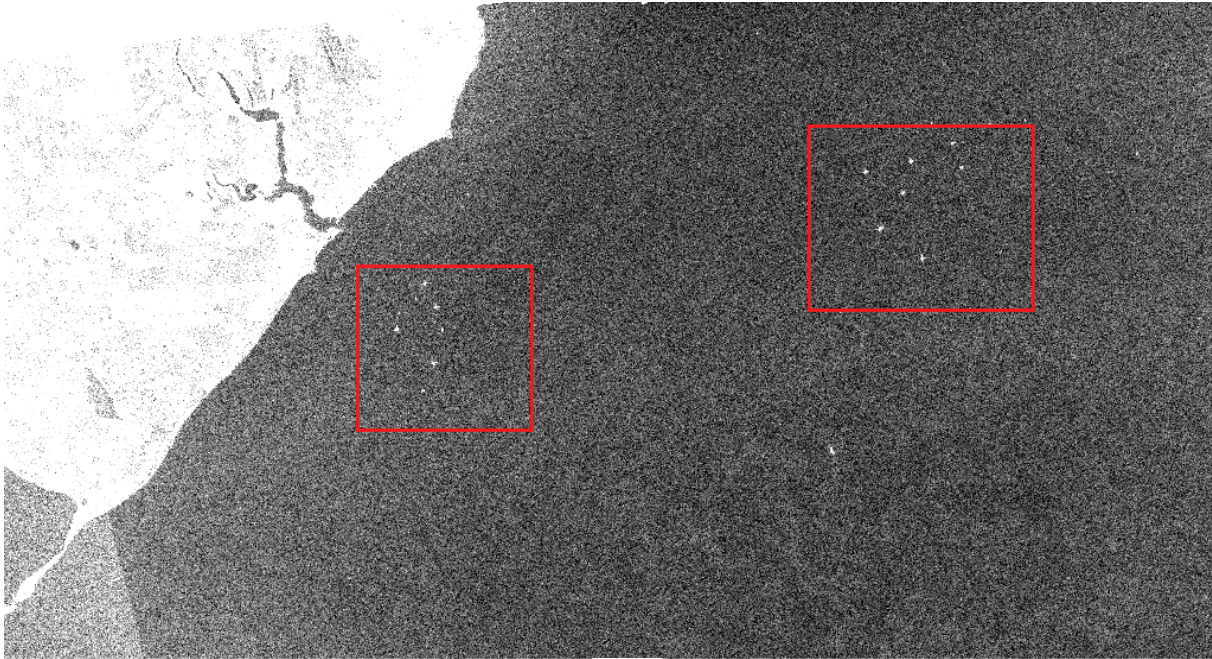


Рис. 1.

2. Основні характеристики і функції ПТКІС

✓ Розрахована на спостереження за фіксованою частиною морської акваторії, яка задається у вигляді полігона (шейп-файл) і є параметром комплексу. Тестовий варіант комплексу аналізує стан судноплавства в акваторії чорноморських портів України загальною площею близько 300 км².

✓ Працює в автоматичному режимі пошуку, отримання, каталогізації та архівації космічних знімків Sentinel 1A (1B) з ресурсу Європейського космічного агентства Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu>) за допомогою розробленої програми-робота.

✓ Здійснює маскуванню отриманих знімків за допомогою полігона шейп-файлу досліджуваної акваторії, формує фрагменти космічних знімків.

✓ Здійснює попередню обробку фрагментів космічних знімків, яка включає:

- фільтрацію спекл-шуму за допомогою покращеного фільтра Лі з вікном усереднення 5X5 пікселів;
- виділення інформативної частини знімка (видалення розташованих з боків чорних смуг);
- зміну проєкції растра та приведення його до цілочислового вигляду.

✓ Використовує адаптивний алгоритм попиксельного сканування фрагмента досліджуваної частини акваторії з метою виявлення і виділення пікселів підвищеної яскравості порівняно з

фоновими значеннями яскравості поверхні моря. Кращий результат такого виділення дають знімки з поляризацією VH порівняно зі знімками VV поляризації. Відомо, що металеві об'єкти мають високу відбивальну здатність в С-діпазоні порівняно з відбивальною здатністю морської поверхні. І тому металеві морські судна на радарних космічних знімках виглядають як яскраві позначки (Рис. 1). Судна виготовлені з композитних матеріалів, невеликих розмірів, мають значно нижчу відбивальну здатність і тому виглядають менш яскравими на знімках.

✓ Суміжні пікселі підвищеної яскравості, виділені на попередньому етапі, об'єднуються в групи зв'язних пікселів, навколо них формується мінімальна опукла оболонка у вигляді полігона (шейп-файл). Визначається максимальний розмір кожного полігона, просторові координати його центроїда. Результати дослідження записуються і зберігаються в базі даних виявлених об'єктів. Виявлені об'єкти з високою ймовірністю являють собою судна, а координати центроїда полігона асоціюються з положенням судна на момент супутникової зйомки. Максимальний розмір асоціюється з довжиною судна.

✓ Результати даних дистанційного зондування акваторії порівнюються з динамічними даними автоматичної ідентифікаційної системи АІС суден на кожний найближчий момент часу щодо часу космічної зйомки. Координатні позначки з АІС

порівнюються з координатами центрів, в результаті формуються три категорії об'єктів:

- позначка ϵ на космічному знімку і в системі АІС (координати позначок задовольняють задану умову близькості);
- позначка ϵ на космічному знімку, однак, її немає в системі АІС. Цей випадок потребує додаткового експертного аналізу. Можливо, позначки знаходяться на відстані більший, ніж заданий параметр близькості. Тоді порівнюється різниця в часі між часом космічного знімка та часом надходження даних АІС, аналізується швидкість і курс суден, позначки яких є найближчими до позначки на космічному знімку. За результатами такого аналізу експерт ідентифікує об'єкт або робить висновок, що об'єкт не відображається в системі АІС, однак, реально існує;
- позначка ϵ в АІС, однак, на космічному знімку об'єкт не ідентифікується. Така ситуація можлива у разі, якщо судно має дуже малу відбивальну здатність, передусім на фоні сильно неоднорідної поверхні моря.

✓ Приведений до псевдовізуального вигляду космічний знімок, відібраний для аналізу дані АІС і результати проведеного аналізу розміщуються у геопросторовій базі даних, візуалізуються в настільних ГІС, геопорталах та іншому спеціалізованому програмному забезпеченні.

3. Обчислювальні процедури ПТКІС

Враховуючи, що космічний знімок радарного діапазону є джерелом отримання об'єктивної інформації, його тематична обробка з метою пошуку позначок суден на фоні неоднорідної морської поверхні становить найважливіший і найбільш витратний за кількістю обчислень модуль ПТКІС. Для виділення позначок суден необхідна частина супутникового знімка сканується з метою пошуку найбільш яскравих пікселів на фоні більш темних пікселів поверхні моря. Однак, враховуючи суттєву неоднорідність морської поверхні, навіть в межах одного знімка (морські хвилі, забруднення частини поверхні, різна концентрація солі, температура), а також неоднорідність, спричинену станом атмосфери та умовами космічної зйомки, для різних знімків поріг віднесення окремого пікселя до яскравого не може бути обраним постійним, навіть в межах аналізу окремого знімка, а тим більше, для різних знімків. Для розв'язання задачі використовується підхід побудови адаптивного порогового алгоритму, який обирає порогове значення для кожної локальної зони аналізу з урахуванням стану морської поверхні. Тобто, локальна зона поверхні моря використовується для аналізу статистичного розподілу яскравості пікселів всередині цієї зони, після чого обирається порогове значення, і усі пікселі поділяються на яскраві (вище порогового значення) і звичайні, тобто віднесені до поверхні моря. Статистичний аналіз вибору порогового значення здійснюється з припущення, що розподіл яскравості пікселів усередині локальної зони

(фонового вікна) задовольняє деякий параметричний статистичний розподіл, параметри якого оцінюються за даними фонового вікна.

Природною метою при проектуванні адаптивних порогових детекторів є забезпечення постійної ймовірності помилкової тривоги P_{al} . У такому разі порогове значення T вибирається таким чином, щоб відсоток значень фонових пікселів, що лежать вище порога, був постійним. Якщо це зроблено, то частота помилкових тривог (кількість помилкових тривог на одиницю площі зображення) також буде постійна. Детектори такого класу називають CFAR (constant false alarm rate) детекторами (Qingshan Jiang et al., 2000; Wackerman C. et al., 2001).

Якщо вигляд параметричної функції розподілу $f(x, \xi)$ яскравості пікселів відомий, а значення параметрів ξ у фоновому вікні оцінено, то процедура знаходження порогового значення T полягає у розв'язанні рівняння:

$$P_{al} = 1 - \int_{-\infty}^T f(x, \xi) dx = \int_T^{\infty} f(x, \xi) dx = F(T), \quad (1)$$

де P_{al} – задане, а T – шукане значення.

У практичних розрахунках використовуються різні параметричні моделі розподілу, зокрема Гаусса, експоненціальний, гамма-розподіл. У роботі (Friedman K. S. et al., 2001) відмічається, що розподіл Гаусса та експоненціальний розподіл доволі грубо моделюють відбиття радарного сигналу від морської поверхні на радарних знімках, а відповідні детектори, побудовані на таких розподілах, мають значні вади. Найкращі практичні результати дають CFAR-детектори, побудовані за К-розподілом (Vachon et al., 1997; Blacknell et al., 1994) із функцією розподілу:

$$f(x) = \frac{2}{x} \left(\frac{Lvx}{\mu} \right)^{\frac{L+v}{2}} \frac{K_{v-L} \left[2 \left(\frac{Lvx}{\mu} \right)^{0.5} \right]}{\Gamma(L)\Gamma(v)}, \quad (2)$$

де L – кількість статистично незалежних переглядів поверхні, які формують знімок, v – параметр порядку, що моделює інтенсивність поверхневих хвиль, μ – середнє значення, K_{v-L} – функція Бесселя уявного аргументу другого роду порядку $v-L$. Параметр L вважається відомим та визначається виключно режимом сканування поверхні сканером супутника. Використовувані знімки радарного супутника Sentinel 1 у режимі Interferometric Wide продукт Level-1 формують знімок за один перегляд поверхні, тобто параметр $L = 1$.

Таким чином, для подальшого обчислення порогового значення необхідно оцінити параметри розподілу (2) μ та v за даними фонового вікна за методом моментів. Використовуючи вибіркоче середнє та вибіркочову дисперсію отримаємо оцінки:

$$\tilde{\mu} = \langle x \rangle \quad (3)$$

$$\left(1 + \frac{1}{v} \right) \left(1 + \frac{1}{L} \right) = \frac{\langle x^2 \rangle}{\langle x \rangle^2}. \quad (4)$$

Альтернативний підхід полягає у використанні вибіркового середнього та вибіркового середнього

логарифму (Campbell J. W. et al., 1997), що приводить до наступного методу оцінювання параметрів:

$$\tilde{\mu} = \langle x \rangle \quad (5)$$

$$\ln(\tilde{\mu}) - \ln(\tilde{\nu}) = \ln(\langle x \rangle) - \langle \ln(x) \rangle + \psi(L) - \ln(L). \quad (6)$$

Тут x – сукупність випадкових значень яскравості фонового вікна, $\langle \rangle$ – оператор середнього значення, ψ – логарифмічна похідна Г функції.

Порогове значення знаходиться шляхом наближеного розв’язання нелінійного рівняння (1) із функцією розподілу (2) та знайденими значеннями параметрів $\tilde{\mu}$ та $\tilde{\nu}$. Монотонне спадання функції $F(T)$ забезпечує єдиний розв’язок рівняння, точність знаходження розв’язку визначається дискретним поданням яскравості пікселів у діапазоні від 0 до 512. Після визначення локального порогового значення T , серед множини пікселів фонового вікна відбираються усі пікселі, яскравість яких перевищує знайдений поріг.

На Рис. 2 надані числові значення яскравості пікселів фрагмента типового фонового вікна, за даними якого визначені параметри розподілу $\mu = 59,058$, $\nu = 2,860$, порогове значення $T = 152$ при $P_{al} = 0.01$ та виділені яскраві пікселі.

45,45,66,53,57,64,60,63,63,60,70,175,208,365,404,404,332,133,130,87,51,49,49,54,69,67,54,60,56,56,53,64,132,378,347,201,201,229,242,131,90,67,58,58,49,42,46,54,56,63,63,63,70,78,188,346,482,424,424,262,153,116,91,62,49,49,48,42,41,48,58,73,73,80,61,76,279,248,348,348,429,341,132,74,74,64,64,50,47,42,40,39,3,49,58,58,68,92,254,281,311,242,242,251,284,86,86,59,59,52,49,43,41,40,39,39,3,49,67,67,125,423,342,184,184,195,193,154,83,56,59,59,53,49,44,41,39,39,39,38,100,140,146,414,492,492,332,201,176,110,112,73,73,70,53,48,46,42,40,40,39,38,37,312,528,397,423,423,371,228,263,118,66,68,68,55,54,47,45,43,43,42,40,39,38,37,560,645,645,512,390,222,76,63,51,51,47,47,47,46,45,44,44,43,41,40,39,38,37,37,382,382,537,500,365,138,59,59,47,46,44,43,43,44,44,43,42,42,41,41,40,40,38,37,65,157,297,199,176,76,76,49,45,45,42,41,42,42,42,41,41,41,41,40,40,39,39,38,49,58,62,104,104,102,57,48,42,41,40,40,40,40,40,40,41,41,41,40,39,38,37,36,43,46,57,57,87,91,54,46,42,42,39,38,39,39,39,40,40,40,40,40,38,37,37,37,36,41,41,45,51,67,65,48,45,45,41,39,38,39,38,38,38,38,38,38,38,37,37,36,35,40,42,45,48,48,48,48,45,42,40,38,38,38,38,38,38,37,37,37,37,37,35,34,40,43,45,46,46,46,46,47,45,39,37,37,37,37,37,36,36,36,36,36,36,35,34,32,40,43,45,45,44,44,43,44,40,37,37,36,35,35,35,36,36,36,35,35,35,34,34,33,33,41,44,44,44,43,42,39,39,39,39,37,35,35,35,36,36,35,35,35,33,34,34,34,34,33,40,42,44,44,42,40,39,39,39,35,37,36,35,35,35,36,35,35,35,34,34,34,33,32.

Рис. 2.

Слід зазначити, що фонове вікно покровоно зміщується, скануючи весь знімок, і для кожного його положення необхідно визначити порогове значення. Водночас, переважно більша частина знімка не містить шуканих об’єктів. Із метою підвищення швидкості обробки, перед знаходженням локального порогового значення перевіряється нерівність:

$$F(x_{\max}) > P_{al}, \quad (7)$$

де x_{\max} – максимальна яскравість пікселя в межах

поточного положення фонового вікна. Розв’язання нерівності (7) гарантує відсутність яскравих пікселів для цього положення фонового вікна і не потребує розв’язання рівняння (1).

4. Висновок

Наведена методика, реалізована у вигляді програмно-технологічного комплексу ПТКІС, дає змогу в повністю автоматичному режимі ефективно ідентифікувати морські судна за даними космічної зйомки (радарних знімків Sentinel 1) та зпівставляти з даними Автоматичної ідентифікаційної системи (AIS), визначати фізичні розміри та координати суден. Ефективність використаного підходу підтверджується результатами дослідної експлуатації протягом поточного року, за час якої здійснена обробка близько 300 космічних знімків Sentinel 1. Подальша модернізація системи може проводитися в напрямі використання радарних знімків інших комерційних супутників, зокрема, при більш високому просторовому розрізненні та з більшим числом поляризацій, що в свою чергу, потребуватиме модифікації алгоритму порогового детектора.

References (Література)

- Blacknell, D. (1994). Comparison of parameter estimators for K-distribution. Radar, Sonar and Navigation, *IEE Proceedings*. 141 (1). 45–52. doi: 10.1049/ip-rsn:19949880.
- Campbell, J. W., Vachon, P. W., Dobson, F. W. (1997, May 25–30). *The extraction of ocean surface information from SAR imagery*. In International Symposium “Geomatics in the Era of RADARSAT (GER’97)”. Ottawa, Canada.
- Friedman, K. S., Wackerman, C., Funk, F., Pichel, W. G., Clemente-Colon, P., Xiaofeng, Li. (2001). *Validation of a CFAR vessel detection algorithm using known vessel locations*. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS’01). In IEEE. Vol. 4. P. 1804–6.
- Qingshan, Jiang, Aitnouri, E., Wang, S., Ziou, D. (2000). Automatic detection for ship target in SAR imagery using PNN-model. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 26 (4). 297–305.
- Vachon, P. W., Campbell, J. W. M., Bjerkelund, C. A., Dobson, F. W., Rey, M. T. (1997). Ship detection by the RADARSAT SAR: Validation of detection model predictions. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 23 (1). 48–59. doi: 10.1080/07038992.1997.10874677.
- Wackerman, C., Friedman, K. S., Pichel, W. G., Clemente-Colon, P., Li, X. (2001). Automatic detection of ships in RADARSAT-1 SAR imagery. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 27 (5). 568–577.

ПРОГРАМНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ИДЕНТИФИКАЦИИ МОРСКИХ СУДОВ НА БАЗЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАДАРНЫХ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ SENTINEL 1

А. В. Кузьмин¹, Г. Г. Верюжский², Л. Д. Греков², А. А. Петров³

¹ Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, ул. Владимирская, 64, Киев, 01017, Украина

² ООО НПФ “Вектор”, пер. Лабораторный, 1, офис 450, Киев, 01133, Украина

³ ООО НПФ “Агроресурсистемы”, пер. Лабораторный, 1, офис 452, Киев, 01133, Украина

В статье рассматривается задание использования космических снимков радарного диапазона для идентификации морских суден. Представлено описание основных функций программно-технологического комплекса автоматизированного мониторинга. Система реализуется с помощью космических снимков радарных спутников Sentinel 1A (B).

Детально описана алгоритмическая часть, которая реализует обнаружение на морской поверхности отметок, которые ассоциируются с судами. Для уменьшения влияния спекл-шума снимок предварительно обрабатывается с помощью

улучшенного Ли-фильтра. Дальнейшая обработка заключается в применении адаптивного порогового алгоритма, который обеспечивает обнаружение для каждого локального фонового фрагмента снимка необычно ярких пикселей, при этом алгоритм обеспечивает постоянную вероятность ошибок. Путем решения нелинейного уравнения, для каждого положения фонового окна алгоритм находит пороговое значение яркости, выше которого все пиксели признаются судами. Предварительно для каждого положения фонового окна оцениваются параметры статистического распределения яркости пикселей. В качестве такого распределения используется К-распределение. Выделенные яркие пиксели объединяются в компактные группы, определяется их размер и координаты. Полученные результаты сравниваются с данными Автоматической идентификационной системы судов AIS, а результаты отображаются на картографической основе.

Ключевые слова: радарный космический снимок, Sentinel 1, адаптивный пороговый алгоритм, спекл-шум, оценка параметров распределения, К-распределение.

SOFTWARE AND TECHNOLOGICAL COMPLEX OF IDENTIFICATION OF SEA VESSELS BASED ON THE USE OF RADAR SPACE IMAGES SENTINEL 1

A. V. Kuzmin¹, G. G. Veriuzhskiy², L. D. Grekov², O. A. Petrov³

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

²Scientific Production Enterprise “Vector” Ltd, Kyiv, Ukraine

³Scientific Production Enterprise “Agroresurssystems” LLC, Kyiv, Ukraine

The paper considers the problem of using images from SAR satellites for the identification of seagoing vessels. It describes the main functions of software and technological complex of the automated monitoring. The system is operated with utilizing space images of SAR satellites Sentinel 1A (B).

The algorithmic part, which implements the detection on the sea surface the marks associated with ships, is described in details. To reduce the impact of speckle-noise, the image is pre-processed with the improved Lee-filter. Further processing lies in using an adaptive threshold algorithm that provides detection for each local background fragment of the image the unusually bright pixels, at the same time the algorithm provides a constant probability of error. By solving a nonlinear equation, for each position of the background window the algorithm finds the threshold brightness value and then all pixels above this value are considered vessels. In advance the evaluation of parameters of statistical distribution of pixels' brightness is performed for each position of the background window. K-mean is used for such distribution. The selected bright pixels are combined into compact groups and their size and coordinates are being determined. The obtained results are compared with the data of the AIS, Automatic Identification System of ships, and the results are displayed on a cartographic basis.

Keywords: Radar space image, Sentinel 1, adaptive threshold algorithm, speckle-noise, estimation of distribution parameters, K-distribution.

Рукопис статті отримано 03.12.2021