

ОБРАБОТКА НА SAR ИЗОБРАЖЕНИЯ ЗА ОТКРИВАНЕ НА КОРАБИ ПО КИЛВАТЕРНАТА СЛЕДА

Чавдар Александров, Николай Колев, Мирослав Цветков, Йордан Сивков
ch.alexandrov@nvna.eu

*ВВМУ „Н. Й. Вапцаров“, кат. „Електроника“
ул. „Васил Друмев“ №73, Варна, България*

***Ключови думи:** Обработка на SAR изображения, CFAR откривател, Килвателна следа*

***Резюме:** В статията са описани методи за обработка на радиолокационни изображения от радари със синтезирана апертура (Synthetic Apperture Radar, SAR) и за автоматично откриване на обекти на морската повърхност, в т.ч. кораби и петна от нефтопродукти. Представени са резултати от обработката на SAR – изображения от сателитите Sentinel 1 A/B на Европейската космическа агенция и от алгоритмите за автоматично откриване на кораби и на нефтени разливи на морската повърхност с постоянна вероятност за лъжлива тревога. Представени са проблемите, свързани с откриването на малки неметални плавателни съдове, чийто размери са съизмерими с разрешаващата способност на радара (гумени, дървени или малки пластмасови моторни лодки и др.) и възможностите за използване на килватерната следа, която те оставят при движение по морската повърхност при определени хидрометеорологични условия. Предложени са възможности за прилагане на постигнатите резултати при обработката на SAR изображения и автоматичното откриване на обекти на морската повърхност за разрешаването на тези проблеми.*

ВЪВЕДЕНИЕ

Откриването на плавателни съдове и други обекти на морската повърхност е от изключителна важност за редица дейности, свързани с развитието на икономиката, опазването на човешкия живот на море и чистотата на околната среда, националната сигурност и др. [1, 2]. Управлението на корабния трафик в районите на големите морски и речни пристанища повишава безопасността на корабоплаването и създава по-добри условия за оптимизиране на пристанищните дейности и повишаване на тяхната ефективност. Наблюдението на районите за търсене и добив на полезни изкопаеми в офшорните зони повишава нивото на опазване на чистотата на морето и условията за развитие на морските растителни и животински видове. Наблюдението на риболовните кораби осъществява контрол по спазване на регламентите за промишлен улов на риба. Опазването на морските граници от различни нарушители, в т.ч. трафиканти на стоки, бежанци и др. оказва съществено влияние върху сигурността на държавата и опазването на критичната инфраструктура. Във връзка с това се изграждат различни системи,

базиран на използване на различни технологии и целящи своевременното решаване на изброените по-горе задачи [3, 4]. Ограниченията на използваните днес технологии са свързани най-вече с районите на тяхното действие. За преодоляване на тези ограничения все по-често се търсят възможности за комбиниране на бреговите системи за наблюдение със спътникови системи, осигуряващи глобално покритие. Европейската програма „Copernicus” предоставя достъп до такива системи, използващи различни технологии за наблюдение на повърхността на земята, в т.ч. радиолокационни станции със синтезирана апертура (Synthetic Aperture Radar, SAR).

Плавателните съдове (кораби, офшорни съоръжения и др. метални обекти на морската повърхност) се появяват в SAR изображенията като ярки петна на фона на отраженията от морето, които имат характер на смущения. Причината е наличието на множество метални ъглови отражатели, формирани от конструкцията на корпуса на корабите, надстройките, крановете и др. съоръжения по тях. За разлика от плавателните съдове разливите на петролни продукти се появяват в SAR изображението като тъмни петна. Причината за това е фактът, че те изглаждат повърхностните капилярни вълни, намалявайки по този начин нивото на отразения радиолокационен сигнал. Разликата в нивата на сигналите, отразени от нефтеното петно и от развълниваната морска повърхност зависят от дължината на вълната и използваната поляризация. Най-добър контраст осигуряват 3 сантиметровите радиовълни (X обхват), по-лош контраст осигуряват 5 см. (C обхват), а най-лош – 10 см. (L обхват). За всеки един от посочените обхвати най-добри резултати се получават при използване на сигнал, излъчен и приет с вертикална поляризация (VV поляризация). Силата на вятъра и вълнението на морето също оказват влияние върху възможността за откриване на нефтени разливи. Най-добрите резултати се получават при вятър със скорост 1,5m/s и 10,0m/s и вълнение на морето между 30cm и 3m [5].

Съществуват и явления, които променят вълнението на морето по начин, подобен на нефтените петна и изглеждат също като тях на SAR изображението, напр. ледени образувания, водорасли, валежи и др.

Откриването на малки неметални плавателни съдове, чийто размери са съизмерими с разрешаващата способност на радара (гумени, дървени или малки пластмасови моторни лодки и др.) не е възможно при използване на описаните по-горе способности. Една от възможностите за тяхното откриване е по килватерната следа, която те оставят при движение по морската повърхност при определени хидрометеорологични условия. Вятърът напр. трябва да бъде достатъчно силен, за да предизвика вълнение, което да бъде модулирано от килватерната следа, но не трябва да бъде прекалено силен, за да не я размие и промени нейния първоначален вид [6].

Целта на настоящето изследване е на базата на постигнатите резултати при откриване на кораби и разливи на нефтопродукти да се търсят ефективни методи за откриване и на малки неметални плавателни съдове по килватерната им следа.

ОТКРИВАНЕ НА ПЛАВАТЕЛНИ СЪДОВЕ С ИЗПОЛЗВАНЕ НА SAR ИЗОБРАЖЕНИЯ

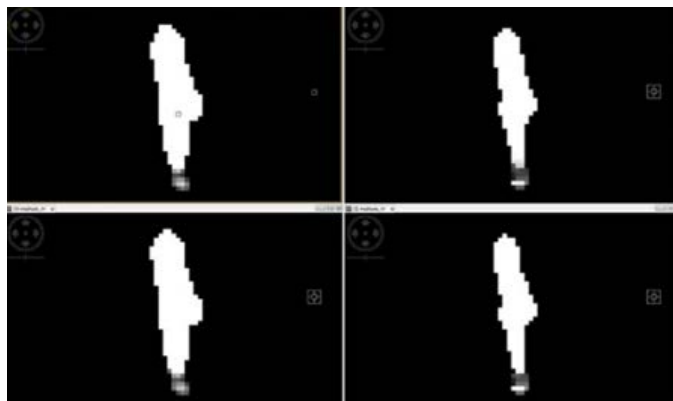
За по-надежно откриване на обектите на морската повърхност и с цел подобряване на отношението „Сигнал – шум“, най-напред изображението се обработва с подходящи програмни средства. Един от най-често използваните алгоритми за предварителна обработка е реализиран с помощта на т. нар. „Подвижен (плъзгащ) прозорец, “Moving (sliding) window”. Обработката с плъзгащ прозорец е базова операция за филтриране на изображения от различен вид. В настоящата работа се използват два вида обработки – с линеен/осредняващ филтър и с медианен филтър. Осредняващият

филтър подменя стойността на текущия пиксел с осреднената стойност на всички пиксели, попадащи в рамките на плаващия прозорец. При тази обработка се допуска и използване на теглови коефициенти. Ако всички коефициенти са равни на 1, филтрацията е линейна.

Медианният филтър подменя стойността на текущия пиксел със средния по стойност пиксел в рамките на прозореца. Тази обработка изисква повече време поради нуждата от сортировка на всяка стъпка от работата на алгоритъма, но запазва в много висока степен границите на контура на обектите, подлежащи на откриване.

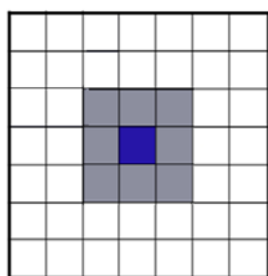
Размерът на прозореца зависи от целта на обработката, разрешаващата способност на изображението и минималният брой пиксели в изображението на отделните цели. Възможно е използването на прозорци с размери 5X5, 7X7 or 9X9 пиксела, итерационни и диференциални процедури [7].

На фиг. 1. са показани SAR изображения от спътниците Sentinel – 1 A/B, обработени с линейен и медианен филтър с размери 5X5 and 7X7 пиксела. Размерът на прозореца и видът на обработката оказват влияние върху формата и размера на наблюдавания кораб (радиолокационна цел). Медианните филтри напр. изчистват импулсните смущения, като запазват формата на целта, докато линейните я променят в една или друга степен, в зависимост от размера на прозореца.



Фиг. 1. SAR изображение на кораб, обработено с плъзгащ прозорец с размери 5X5 и 7X7, с линейен филтър (в ляво) и с медианен (в дясно)

За откриване на обекти на морската повърхност след предварителната обработка на SAR изображенията се използва детектор с постоянна вероятност за лъжлива тревога (Constant False Alarm Rate, CFAR detector). Основното предимство на този откривател е, че адаптира прага на откриване на целта към средното ниво на смущенията, предизвикани при отражение на радиолокационния сигнал от морската повърхност. При обработка на SAR изображения обикновено се използва детектор с 3 вградени (гнездови) прозореца – сигнален, защитен и фонен, както е показано на фиг. 2 [8, 9, 10].



Фиг. 2. Гнездови прозорци за откриване на цели с постоянна вероятност за лъжлива тревога (CFAR)

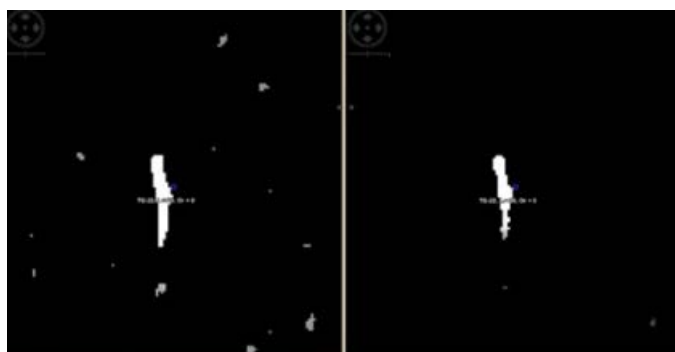
За определяне на прага на откриване се използва фоновия прозорец и коригиращ коефициент. Ако статистиката на фоновият шум съответства на нормално (Гаусово) разпределение, откриването на целта се извършва по критерия:

$$(1) \quad y \geq \mu_B + T \cdot \sigma_B + E_0$$

където μ_B е средната стойност на пикселите във фоновия прозорец,
 σ_B е средноквадратичното отклонение,
 E_0 е начална стойност, а T – теглови коефициент.

За да се избегне влиянието на други цели, разположени в непосредствена близост се включват и защитни интервали. По този начин детекторът определя праг на откриване, който осигурява оптимално подтискане на смущенията и надеждно откриване на целта. Размерите на гнездовите прозорци зависят от резолюцията на изображението. Според [8] за изображения с ниска резолюция се използват съответно 3X3, 5X5 и 13X13 пиксела. За изображения с висока резолюция размерите са 5X5, 7X7 и 25X25.

Фиг. 3 показва резултатите от използването на CFAR откривател в комбинация с линейна и медианна филтрация. След допълнителна обработка на изображението е възможно да се определят дължината и ориентацията (курса) на откритата цел.



Фиг. 3. Откриване на цел след обработка на изображението с линеен филтър (в ляво) и с медианен филтър (в дясно)

ОТКРИВАНЕ НА НЕФТЕНИ РАЗЛИВИ

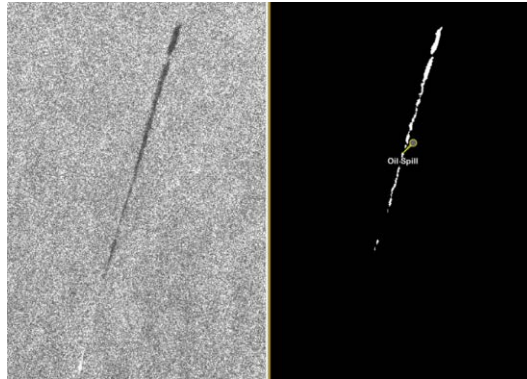
Откриването на нефтени разливи по морската повърхност с помощта на SAR изображение може да бъде направено или от оператор, или автоматично, на базата на резултатите от неговата обработка. Първата стъпка в тази обработка е инвертиране на изображението по амплитуда и преместване до нивото на най-яркия пиксел:

$$(2) \quad UFlippI(i, j) = MaxVal - I(i, j), \text{ за всяко } i, j,$$

където $I(MXN)$ е SAR изображението с размери MXN пиксела,
 $UFlippI(MXN)$ – инвертираното изображение,

а $MaxVal = \max(I(i, j))$, за всяко i, j ,
 е максималната стойност на пикселите в SAR изображението $I(M \times N)$.

След инвертиране нефтеният разлив се появява като светло петно на морската повърхност, а отраженията от корабите – като по-тъмни петна. В същото време статистическият характер на фона (отраженията от морската повърхност) не се променя, тъй като обикновено има нормално (Гаусово) разпределение. За да се намали нивото на импулсните смущения в изображението се прилага същата процедура, както при откриването на кораби – линеен или медианен филтър с определени размери на прозореца и CFAR откривател.

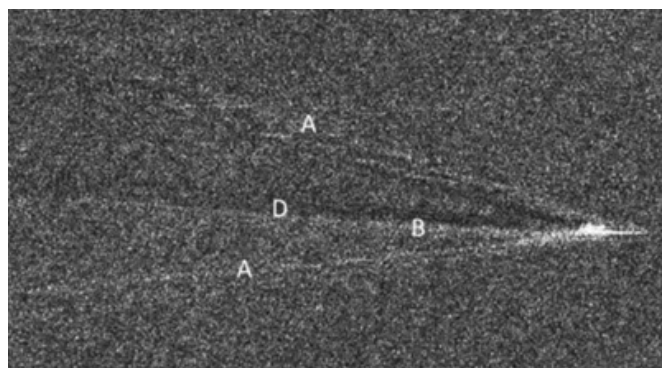


Фиг. 4. Необработено SAR изображение на нефтено петно (в ляво) и резултатът от работата на CFAR откривателя (в дясно)

На фиг. 4 е показан резултатът от работата на CFAR откривателя в комбинация с предварителната обработка с медианен филтър с размери на прозореца 5X5 пиксела. Вижда се, че отраженията от морската повърхност са практически премахнати, което прави автоматичното откриване на нефтеното петно много по-надеждно [11].

ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА ОТКРИВАНЕ НА МАЛКИ СЪДОВЕ ПО КИЛВАТЕРНАТА ИМ СЛЕДА

Движейки се по повърхността на водата всеки плавателен съд оставя килватерна следа, както е показано на фиг. 5 [6]. Носът на кораба формира V-образна следа, наречена „Kelvin – следа“, а кърмата – по-слабо изразена кърмова следа с подобна форма. Винтът на кораба формира турбулентна следа с формата на права линия. В SAR в изображения с висока резолюция може да бъде открита и т.нар. трансверзална следа, както и малък турбулентен район в непосредствена близост до корпуса на кораба.



Фиг. 5. SAR изображение на кораб и килватерната следа с нейните разновидности - носова V-образна Kelvin – следа (A), кърмова (B) и турбулентна следа (D) [6]

Освен от оператора, килватерната следа може да бъде открита и автоматично с помощта на някои преобразувания на SAR изображението. Едно от тях е преобразуванието на Radon, което представлява двоен интеграл на функцията на изображението по посоката φ :

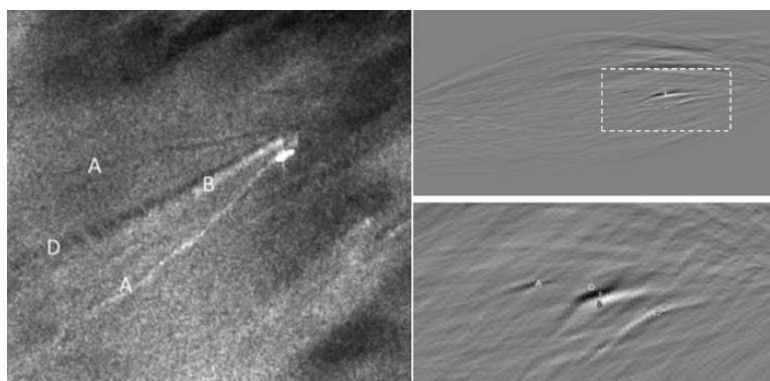
$$(3) \quad p_{\varphi}(x') = \int_{-\infty-\infty}^{+\infty \infty} f(x, y) \delta(x \cdot \cos(\varphi) + y \cdot \sin(\varphi) - x') dx dy$$

където $f(x, y)$ е SAR изображението на килватерната следа на кораба.

Когато посоката φ и променливата x' имат дискретни стойности, преобразуванието на Radon се трансформира в преобразувание на Hough. В резултат на това преобразувание всяка точка от двумерното пространство се преобразува в линия в пространството на Hough/Radon.

По този начин точките от една килватерна следа в SAR изображението се преобразуват в набор от линии, пресичащи се в определен район от пространството на Hough/Radon и показващи наличието на следата. На фиг. 6 е показан резултатът от преобразуванието на Radon/Hough върху изображението на кораб с ясно изразена килватерна следа. Резултатът илюстрира наличието на носови, кърмови и турбулентни следи A, B и D под формата на възвишения и вдлъбнатини върху повърхността в пространството на Hough/ Radon.

Прилагането на описаните по-горе обработки за откриване на кораби и нефтени разливи в SAR изображенията ще позволи автоматичното откриване на килватерни следи.



Фиг. 6. SAR изображение на килватерни следи на кораб (в ляво) и резултатът от преобразуванието на Radon/Hough (в дясно) [6]

На фигурата се вижда още, че мястото на кораба е отместено от върха на следата, което се дължи на промяната на честотата на отразения радиолокационен сигнал в резултат на ефекта на Доплер. Оценката на това отместване позволява да се определят сравнително точно параметрите на движение на наблюдаваната цел (курс и скорост) [12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представените в статията резултати от обработка на SAR изображения за откриване на кораби и нефтени разливи по морската повърхност могат да бъдат използвани успешно за откриване на малки плавателни съдове по техните килватерни следи. Изследователският кораб „Тодор Каблешков“, собственост на ВВМУ „Н. Й. Вапцаров“, който има пластмасов корпус, подходящи размери и оборудване ще бъде използван в детайлно-планиран експеримент при различни хидрометеорологични условия, с различни скорости и курсове с цел доказване на възможностите и подобряване на ефективността на алгоритмите за откриване на малки неметални съдове на морската повърхност.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Mednikarov B., Dimitrov N., Vasilev V., Security analysis of the national maritime transportation system as part of maritime critical infrastructure, AGA 2018 – 19th Annual General Assembly of the International Association of Maritime Universities, 2018, pp. 344 – 351.
- [2] Dimitrakiev D., Dachev Y., Milev, D., Response organizations and control strategies during oil spills, International Journal of Scientific and Technology Research, 2020, 9(4), pp. 1825 – 1828.
- [3] Todorov M., Substance, Structure and Performance of the Vessel Traffic System in the Territorial Waters and the Responsible Areas of Republic of Bulgaria, 20-th International Scientific Conference, Stara Zagora, Bulgaria, May 2010, Volume V, Nautical and Environmental Studies, pp. 71 - 77
- [4] Alexandrov Ch., Bulgarian vessel traffic management and information system and education and training of VTS personnel in Bulgaria, Proceedings - 16th Annual General Assembly and Conference of the International Association of Maritime Universities, IAMU AGA, Rieka, pp. 13 – 20.
- [5] Papila, I., Sertel, E., Kaya, S. and Gazioglu, C., Oil spill detection using remote sensing technologies – SAR, Chapter, Turkish marine research foundation, Publication 47, Istanbul 2018.
- [6] Hajduch G., A Statistical Approach of Wake Detection based on a priori Information Provided by AIS data, SeaSAR 2018 conference, 7-10 may, Rome Frascati (Rome) Italy, 2018.
- [7] Alexandrov, Ch., Kolev, N., Tsvetkov, M., Sivkov J. and Hristov, A., Sentinel - 1 SAR image processing for target detection and evaluation by using bulgarian VTMISS, 16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems, ELMA 2019.
- [8] Wackerman C. C., K. S. Friedman, W. G. Pichel, P. Clemente-Colon and X. Li, Automatic detection of ships in Radar-1 SAR imagery, Canadian journal of remote sensing, Vol. 27, No. 5, pp. 568 – 577, 2001.
- [9] Pelich R., N. Longepe, G. Mercier, G. Hajduch, R. Garello, AIS based evaluation of target detectors and SAR sensors characteristics for marine surveillance, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observation and Remote Sensing, May 2014, PP(8): 1- 10
- [10] Iliev, I., Wideband signal detection with software DSP processor implemented on a microcontroller, 21st International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, SIELA 2020 - Proceedings, 2020
- [11] Alexandrov, Ch., Kolev, N., Tsvetkov, M., Sivkov J. and Hristov, Oil Spills Detection on Sea Surface by using Sentinel-1 SAR Images, 21st International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, SIELA 2020 - Proceedings, 2020

[12] Kolev, N., Hristov A., Tsvetkov, M. and Alexandrov, Ch., AIS Assisted Sentinel-1 SLC Image Ship Detection, Motion and Displacement Estimation, 21st International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, SIELA 2020 - Proceedings, 2020.

SAR IMAGE PROCESSING FOR SHIP WAKE DETECTION

Chavdar Alexandrov, Nikolai Kolev, Miroslav Tsvetkov, Yordan Sivkov
ch.alexandrov@nvna.eu

Nikola Vaptsarov Naval Academy – Varna, Dept. of Electronics
73 Vassil Drumev str. Varna, Bulgaria

Key words: *SAR Image processing, CFAR, Ship detection, Wake detection*

Abstract: *In this paper some methods for image processing of Synthetic Aperture Radar images (SAR images) and some algorithms for automatic detection of different objects on the sea surface, including ships and oil spills, are described. Results are demonstrated based on the processing of SAR images, provided by Sentinel 1 A/B satellites of European Space Agency ESA, as well as on using algorithms for automatic detection with constant false alarm rate (CFAR Detection). Some problems are shown related to detection of small non-metal vessels with sizes, comparable with SAR image resolution, i.e. rubber, wooden or small plastic motor boats and possibilities to use their wakes on the sea surface in some specific weather conditions for detection of these vessels. Some possibilities to use results achieved in SAR image processing and object detection for solving these problems are proposed.*