Обнаружение объектов авиатехники методом выделения изменений по изображениям радиолокатора с синтезированной апертурой Sentinel-1

М. Ю. Достовалов, Р. В. Ермаков, А. А. Теплов

Научно-исследовательский институт точных приборов, Москва, 127490, Россия E-mail: kotik_55@mail.ru

В работе представлены результаты обнаружения объектов авиатехники по радиолокационным изображениям радиолокатора с синтезированной апертурой (PCA) Sentinel-1. Несмотря на то что для наблюдения авиатехники разрешение РСА является недостаточным, представленный пример обработки демонстрирует, что применение метода выделения изменений позволяет обеспечить надёжное выявление объектов авиатехники крупных размеров. При использовании данного метода необходимо принимать во внимание проблему, возникающую при обнаружении объектов, расположенных на одних и тех же местах на двух или нескольких изображениях. Эта проблема была решена применением опорного изображения, содержащего минимальные значения пикселей, выделенных по изображениям по всей серии. Результаты обработки набора радиолокационных снимков показывают, что для большей части изображений результаты автоматического обнаружения объектов авиатехники крупных размеров хорошо соответствуют результатам, получаемым при визуальном дешифрировании. Проведена оценка вероятности правильного обнаружения объектов, составившая 0,76 по итогам обработки серии из 15 изображений (стандартных амплитудных GRD-продуктов), полученных в одинаковых условиях наблюдения (проведения радиолокационной съёмки) в период с января по ноябрь 2017 г.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой, PCA, Sentinel-1, обнаружение объектов, метод выделения изменений

Одобрена к печати: 01.06.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-49-57

Введение

Радиолокаторы с синтезированной апертурой (PCA) Sentinel-1, запущенные в 2014 и 2016 гг., предназначены для глобального мониторинга земной поверхности. Для различных регионов планеты система из двух космических аппаратов (Sentinel-1A и Sentinel-1B) обеспечивает периодичность наблюдений от 1-3 до 30 сут, при этом формируемые радиолокационные (PЛ) изображения находятся в свободном открытом доступе (Geudtner et al., 2014; Potin et al., 2016). Разрешение РЛ-изображений PCA Sentinel-1 (для распространяемых информационных продуктов формата GRD) составляет порядка 10 м, т.е. они относятся к «среднему» уровню детальности. В сравнении с РЛ-системами предыдущего поколения — ERS-1/2, Envisat — для изображений Sentinel-1 характерен высокий уровень некогерентного накопления (радиометрическое разрешение лучше 1 дБ (3σ)), низкий уровень геометрических искажений (менее 1 пикселя) в сочетании с широкой полосой захвата (~300 км) (Schwerdt et al., 2016). Подобные свойства РЛ-данных обеспечивают благоприятные условия для наблюдения объектов различных типов, в первую очередь — распределённых естественных объектов.

Периодичная РЛ-съёмка одних и тех же участков позволяет использовать технологию выделения амплитудных или фазовых (когерентных) изменений на изображениях (в англоязычной терминологии — Change Detection) (Doerry, Dickey, 2004), полученных при совпадающих повторяющихся ракурсах наблюдения. Применение данных технологий обеспечивает значительное повышение эффективности систем РЛ-наблюдения (Достовалов и др., 2007).

Для наблюдения объектов авиатехники разрешение PCA Sentinel-1 в целом является недостаточным. Типичный самолёт среднего класса (Boeing-737) имеет характерные размеры 35—40 м и формирует на РЛ-изображениях отметку размером 2–3 пикселя, что недостаточно для его распознавания. Тем не менее, как демонстрируется в работе, в ряде случаев использование РЛ-изображений PCA Sentinel-1 позволяет эффективно обнаруживать объекты авиатехники крупных размеров.

Использование метода выделения изменений для обнаружения объектов

Практически все задачи тематического дешифрирования РЛ-данных сводятся к задачам обнаружения и распознавания объектов. В обеих задачах для объекта $X = \{x_1, x_2, ..., x_n\}$ используется анализ отношения правдоподобия (Ахманов и др., 1981):

$$l(X) = \frac{W_{\rm ob}(X/\upsilon_j)}{W_{\rm ob}(X/\upsilon_i)} \cdot \frac{P(\upsilon_i)}{P(\upsilon_j)} \to X \in \begin{cases} \upsilon_j \\ \upsilon_i \end{cases},\tag{1}$$

где и $W_{ob}(X/\upsilon_i)$ и $W_{ob}(X/\upsilon_j)$ — условные плотности вероятности, а $P(\upsilon_i)$ и $P(\upsilon_j)$ — априорные вероятности наблюдений объектов классов *i* и *j*.

При обнаружении объектов $W_{ob}(X/v_j)$ определяет плотность вероятности отсчётов фона. При реализации алгоритмов распознавания оцениваются апостериорные вероятности $P_{A\Pi}(v_j) = W_{ob}(X/v_j)P(v_j)$ наблюдения различных типов объектов.

При нормальном распределении плотности вероятности классов и известных «эталонных» значениях сигналов оптимальное решающее правило для распознавания (Фукунага, 1979) реализуется непосредственным вычислением корреляционных интегралов по радиолокационным портретам тестируемых и эталонных объектов. Соответственно, для распознавания авиатехники обычно используют РЛ-изображения с высоким пространственным разрешением — порядка одного метра (Chen et al., 2015).

На изображениях Sentinel-1 размеры наблюдаемых объектов интереса весьма малы. Распознавание их типов по РЛ-портретам становится малоэффективным, поэтому в рамках данной задачи рассматривается только этап обнаружения объектов. Однако непосредственное применение алгоритма обнаружения в соответствии с выражением (1) приводит к появлению большого числа ложных тревог, поскольку обычно рядом с объектами авиатехники располагается множество ярко отражающих стационарных объектов аэродромной инфраструктуры.

Для устранения помех, создаваемых стационарными объектами, при обнаружении авиатехники был применён метод выделения изменений, учитывающий различия амплитуды соответственных пикселей двух или нескольких изображений, зарегистрированных в разные моменты времени.

При выделении амплитудных изменений входной информацией являются два РЛ-изображения (РЛИ), полученные в моменты времени t_0 и t_1 . Предполагается, что оба РЛИ отображают один и тот же участок местности и получены при одном и том же ракурсе наблюдения.

При использовании РЛИ в форме мощности обычно принимают, что плотность распределения отсчётов описывается гамма-распределением (Rignot, van Zyl, 1993):

$$p(I_0/\langle I_0 \rangle) = \frac{N^N I_0^{(N-1)}}{\langle I_0 \rangle^N (N-1)!} \exp\left(-\frac{NI_0}{\langle I_0 \rangle}\right), \qquad (2)$$

где $< I_0 > -$ средняя мощность равномерного участка поверхности в момент времени t_0 ; N -- уровень (степень) некогерентного накопления.

Решаемой задачей является поиск областей, в которых между моментами времени t_0 и t_1 произошли изменения интенсивностей I_0 и I_1 . Эти интенсивности предполагаются независимыми величинами, поэтому их совместное распределение определяется на основе их частных

распределений, определяемых выражением (2). Совместное распределение отношения отсчётов изображений ($r = I_1/I_0$) вычисляется как:

$$p(r/\langle I_0 \rangle, \langle I_1 \rangle) = \frac{(2N-1)!}{(N-1)!^2} \cdot \frac{\overline{r}^N r^{N-1}}{(\overline{r}+r)^{2N}}.$$
(3)

В этом случае среднее значение и СКО отношения E(r) и $\sigma(r)$ определяются как:

$$E(r) = \frac{N}{N-1}\overline{r}, \quad \sigma(r) = \frac{N(2N-1)\overline{r}}{(N-1)^2(N-2)}.$$
(4)

Распределение отношения, определяемое выражением (3), зависит только от относительного изменения средней мощности отражённого сигнала, и возможность выделения изменений не зависит от уровня отражённого сигнала.

При наличии серии из нескольких изображений для выделения изменений используются не только отношения амплитуд последовательных изображений, но также для всех пикселей всех изображений формируется «матрица выделенных изменений» (Change Detection Matrix) (Le et al., 2014) или вычисляется OLRT-статистика (Omnibus Likehood Ratio Test Statistics) (Conradsen et al., 2003). Практическое приложение использования данного подхода для обнаружения объектов в аэропорту г. Франкфурт-на-Майне по изображениям PCA Sentinel-1 представлено в работе (Nielsen et al., 2017). Результаты, показанные в работе, демонстрируют, что метод выделения изменений позволяет обнаруживать области, в которых объекты «появляются», «исчезают» или изменяют своё состояние. При этом эффективно подавляются многочисленные «стационарные» объекты, в том числе высококонтрастные. Однако обнаружение непосредственно объектов авиатехники наталкивается на серьёзные проблемы.

Изменения, наблюдаемые на изображениях, во многих случаях формируются объектами аэродромной инфраструктуры: выдвижными посадочными выходами, аэродромной техникой, используемой для загрузки/разгрузки самолётов, и т. д. Кроме того, крупные аэропорты характеризуются интенсивным трафиком, который в значительной степени ежедневно повторяется. В то же время использование солнечно-синхронных орбит для космических PCA приводит к тому, что съёмки участков также повторяются в одно и то же время. В результате возникает ситуация, когда самолёт, выполняющий ежедневный рейс, в момент следующей съёмки находится у того же выхода на посадку и, таким образом, изменения в сюжете не наблюдаются.

Для обнаружения объектов на серии из нескольких изображений целесообразно предварительное формирование «маски», т. е. изображения, на которых объекты интереса отсутствуют. В работе (Baessler et al., 2012) для этой цели было предложено использование комбинированного изображения, каждый пиксель которого формировался следующим образом:

- для каждого отсчёта (*i*, *j*) строилась гистограмма его значений по используемой серии из 11 изображений;
- по гистограмме вычислялось значение «1-го квартиля» отсчётов, которое использовалось в качестве значения отсчёта (*i*, *j*) изображения-маски.

Суммирование по 1-му квартилю в (Baessler et al., 2012) позволило снизить уровень шума РЛ-изображений, определяемый распределением Рэлея (так как в работе использовались изображения PCA TerraSAR-X с максимальным разрешением без накопления), что также снизило уровень ложных тревог в выражении (4) при обнаружении объектов.

При использовании для обнаружения объектов изображений PCA Sentinel-1 проблема снижения уровня шума становится менее значимой, поскольку некогерентное накопление в отдельных изображениях уже реализовано. Поэтому для формирования «маски» возможно использование «минимального» изображения (из пикселей с минимальным значением по всей серии) или изображения, сформированного суммой двух «минимальных» пикселей.

Данным способом в настоящей работе было подготовлено опорное изображение, на котором отсутствовали объекты интереса, появляющиеся на отдельных изображениях, в том числе на одних и тех же местах.

Участок съёмки и анализ радиолокационных изображений

Для обнаружения объектов авиатехники на РЛ-изображениях Sentinel-1 был выбран аэродром ВВС США Майнот (Minot US Air Force Base), предназначенный для постоянного базирования бомбардировщиков B-52. Детальное оптическое изображение расположения авиатехники на стоянке было получено из программы Google Earth. Дополнительная информация об авиабазе доступна в открытых источниках (Wikipedia, Minot Air Force Base). Обрабатываемая серия РЛ-изображений включала 15 наборов данных формата GRD, полученных в одинаковых условиях наблюдения за период январь – ноябрь 2017 г.

На *рис. 1* показано совмещение оптического и радиолокационного изображений (VV-поляризация) стоянки авиатехники. На открытой бетонной стоянке представлены объекты авиатехники одного типа, наблюдаемые в двух ракурсах: приблизительно 45° и 135° от направления «с носа». По отношению к фону объекты формируют устойчивые перепады контраста, которые могут быть обнаружены. Для ряда объектов на РЛ-изображении прослеживаются геометрические размеры и менее выражено — общий силуэт. Однако в целом можно сделать вывод, что для распознавания типов объектов разрешения РЛ-снимка недостаточно.

Изображения PCA Sentinel-1 представлены в поляризациях VV и VH. Сравнение изображений стоянки авиатехники в поляризациях VV и VH приведено на *рис. 2* (см. с. 53). Анализ *рис. 2* показывает, что часть самолётов формирует мощные отражённые сигналы на обеих поляризациях, в то время как уровень отражения от других самолётов существенно ниже. В ряде случаев силуэт объекта лучше просматривается в VH-поляризации, однако по большей части в VV-поляризации контрасты между объектами и окружающим фоном выше.

На *рис. 3* показаны результаты анализа (проведённого по нескольким изображениям) уровней отражённого сигнала от объектов и окружающих фоновых поверхностей (бетон и трава). На диаграмме представлены средние значения амплитуды отражённых сигналов объектов и фонов в поляризациях VV (по горизонтальной оси) и VH (по вертикальной оси) в линейном масштабе. Рисунок 3 демонстрирует, что условия наблюдения объектов заметно отличаются в зависимости как от используемой поляризации, так и от ориентации объекта. В VV-поляризации контраст практически всех объектов с фоном (бетон) превышает 6 дБ. В то же время в VH-поляризации многие объекты, наблюдаемые в ракурсе 135°, имеют аналогичные контрасты с фоном порядка 3–4 дБ. На основе проведённого анализа для обнаружения объектов были выбраны изображения VV-поляризации.



Рис. 1. Совмещение оптического и радиолокационного изображений (VV-поляризация) стоянки авиатехники. Объекты формируют устойчивые перепады контраста по отношению к фону, которые могут быть обнаружены. Для ряда объектов на изображении прослеживаются геометрические размеры и менее выражено — общий силуэт



Рис. 2. Сравнение изображений стоянки авиатехники в поляризациях VV и VH



Рис. 3. Результаты сравнения уровней отражённого сигнала от объектов и окружающих фоновых поверхностей (бетон и трава). Представлены средние значения амплитуды отражённых сигналов объектов и фонов в поляризациях VV (по горизонтальной оси) и VH (по вертикальной оси) в линейном масштабе

Обработка изображений и результаты обнаружения объектов

Для обнаружения объектов авиатехники было обработано 15 кадров VV-поляризации из сформированной серии РЛ-снимков. Обработка проводилась по совмещённым фрагментам изображений с разрешением 10 м. В качестве «маски» использовалось изображение, каждый отсчёт которого формировался усреднением двух «минимальных» пикселей из всей серии снимков.

При обнаружении вначале для каждого пикселя обрабатываемого изображения вычислялось отношение с соответствующим пикселем изображения «маски». Затем полученное отношение анализировалось детектором с пороговым значением $P_1 = 5$ дБ. Это позволило эффективно

обнаруживать объекты авиатехники, имеющие контраст, превышающий P_1 в сравнении с фоном. Однако выявляемая форма области изменения плохо соответствовала форме объекта. Также в некоторых случаях фиксировались «двойные» срабатывания детектора на одном объекте. Поэтому детектор был модифицирован следующим образом:

- задавалось нижнее пороговое значение P₂ = 3 дБ;
 после «срабатывания» на пикселе с пороговым значением P₁ вокруг него строилась связанная область, включающая примыкающие пиксели со значениями, превышающим порог P_2 .

Значение порога P_2 было выбрано по результатам экспериментальной обработки нескольких изображений так, чтобы улучшить соответствие области изменения формам реальных объектов, не допуская при этом ошибочных срабатываний детектора на изменяющихся отсчётах фоновой поверхности.



Рис. 4. Результаты обнаружения объектов авиатехники по шести изображениям. Для каждого изображения представлены дата проведения съёмки, фрагмент исходного изображения (левый фрагмент пары) и результаты обнаружения объектов (правый фрагмент пары). Результаты обнаружения — выделенные области изменений — отображены светлыми отметками на правых фрагментах каждой пары. Область стоянки на фрагментах выделена прямоугольной рамкой

При обнаружении объектов авиатехники рассматриваемые альтернативы наличия или отсутствия объекта интереса относятся именно к классу «объекты авиатехники», т. е. задачи обнаружения и распознавания являются тесно связанными. Кроме задачи обнаружения объекта должна решаться задача распознавания: относится ли данный объект к классу авиатехники.

Данная задача решалась в ограниченном объёме на основе различий в значениях $P(v_i)$ и $P(v_j)$, используемых в выражении (1). Объектами авиатехники считались объекты, обнаруженные в пределах фиксированной области аэродромной стоянки и имеющие размеры, лежащие в пределах заданного диапазона (обнаруженные области изменений больших размеров считались объектами помехи).

Примеры результатов обнаружения объектов представлены на *рис.* 4 (см. с. 54). Рисунок демонстрирует результаты обнаружения объектов авиатехники, полученные по шести РЛ-снимкам. Для каждого изображения представлены дата проведения съёмки, фрагмент исходного изображения (левый фрагмент пары) и результаты обнаружения объектов (правый фрагмент пары). Результаты обнаружения — выделенные области изменений — представлены светлыми отметками на правых фрагментах каждой пары. Область стоянки на всех фрагментах выделена прямоугольной рамкой.

Анализ *рис. 4* показывает, что результаты автоматического обнаружения хорошо соответствуют числу объектов, которое может быть выделено по результатам визуального анализа. Использование метода выделения изменений обеспечивает низкий уровень ложных тревог, создаваемый близко расположенными стационарными, ярко отражающими объектами.

Для оценки вероятности правильного обнаружения объектов было проведено детальное визуальное дешифрирование области аэродрома на всех радиолокационных изображениях серии. При визуальном анализе для каждого изображения определялось N_{ϕ} — число объектов, обнаруженных при визуальном дешифрировании. Затем оно сравнивалось со значением $N_{\rm oбh}$ — числом объектов, обнаруженных в процессе автоматической обработки. $N_{\rm oбh}$ определялось как число объектов (участков изменений), выделенных детектором в области аэродрома, за вычетом участков, размер которых составлял более 40 пикселей. Вероятность правильного обнаружения объектов определялась как $P_{\rm oбh} = N_{\rm oбh}/N_{\phi}$.

Итоговые результаты оценки вероятности правильного обнаружения объектов авиатехники представлены в *таблице*. В колонках *таблицы* для каждого изображения представлены значения $N_{\rm ofh}$, $N_{\rm d}$, $P_{\rm ofh}$, а также итоговые результаты оценки.

Дата съёмки	N _{обн}	N_{Φ}	Р _{обн}
07.01.2017	11	16	0,68
31.01.2017	13	14	0,93
24.02.2017	10	12	0,84
07.05.2017	3	6	0,5
06.07.2017	7	9	0,77
10.10.2017	7	8	0,87
03.11.2017	15	17	0,88
27.11.2017	9	12	0,75
19.01.2017	9	10	0,9
12.02.2017	14	16	0,87
08.03.2017	6	14	0,43
19.05.2017	5	9	0,55
30.07.2017	4	6	0,67
22.10.2017	7	10	0,7
15.11.2017	10	12	0,83
Итого:	130	171	0,76

Вероятность правильного обнаружения объектов авиатехники

Данные *таблицы* демонстрируют, что объекты авиатехники могут правильно обнаруживаться с относительно высокой вероятностью (до уровня 0,8–0,9). При обработке данных съёмки 07.01.2017 и 08.03.2017 снижение вероятности обнаружения произошло в результате существенного возрастания уровня отражения от снежного покрова у границ стоянки. В двух других случаях при съёмке 07.05.2017 и 19.05.2017 пропущенные объекты формировали аномально низкие уровни отражения. Тем не менее итоговая вероятность правильного обнаружения, усреднённая по всем изображениям серии, составила 0,76.

Заключение

В работе представлены результаты обнаружения объектов авиатехники по радиолокационным изображениям радиолокатора с синтезированной апертурой Sentinel-1. Несмотря на то что для наблюдения авиатехники разрешение PCA является недостаточным, представленный пример обработки демонстрирует, что применение метода выделения изменений с дополнительной селекцией объектов по пространственному положению и геометрическим размерам позволяет обеспечить в целом надёжное выделение крупных объектов авиатехники. Вероятность их правильного обнаружения составила 0,76 по результатам обработки серии из 15 изображений, полученных за период с января по ноябрь 2017 г.

Литература

- 1. *Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С.* Введение в статистическую радиофизику и оптику. М.: Наука, 1981. 640 с.
- 2. Достовалов М. Ю., Лифанов А. С., Мусинянц Т. Г. Обнаружение объектов по изменениям на радиолокационных изображениях РСА // Исследование Земли из космоса. 2007. № 4. С. 15–26.
- 3. Фукунага К. Введение в статистическую теорию распознавания образов. М.: Наука, 1979. 367 с.
- 4. *Baessler M., Runge H., Suchandt S., Zhang Y.* Change detection for traffic measurement in multi-temporal TerraSAR-X SpotLight images // Proc. EUSAR-2012. Nurnberg. 2012. P. 328–331.
- 5. *Chen J., Zhang B., Wang C.* Backscattering Feature Analysis and Recognition of Civilian Aircraft in TerraSAR-X Images // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2015. V. 12. No. 4. P. 796–800.
- 6. *Conradsen K.*, *Nielsen A.*, *Schou J.*, *Skriver H.* A test statistic in the complex Wishart distribution and its application to change detection in polarimetric SAR data // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2003. V. 41. No. 1. P. 4–19.
- 7. Doerry A., Dickey F. Synthetic Aperture Radar // Optics and Photonics News. 2004. V. 15. No. 11. P. 28–33.
- 8. Geudtner D., Torres R., Snoeij P., Bibby D. Sentinel-1 System // Proc. EUSAR-2014. Berlin. 2014. P. 1–3.
- 9. Le T., Atto A., Trouve E., Nicolas J. Adaptive multitemporal SAR image filtering based on the change detection matrix // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2014. V. 11. No. 10. P. 1826–1830.
- 10. *Nielsen A.*, *Conradsen K.*, *Skriver H.*, *Canty M.* Change detection in a series of Sentinel-1 SAR data // 9th Intern. Workshop on the Analysis of Multitemporal Remote Sensing Images (MultiTemp). 2017.
- 11. Potin P., Rosich B., Grimont P. Sentinel-1 Mission Status // Proc. EUSAR-2016. Hamburg. 2016. P. 59-64.
- 12. *Rignot E., van Zyl J.* Change detection techniques for ERS-1 SAR data // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1993. V. 31. P. 896–906.
- 13. Schwerdt M., Schmidt K., Tous-Ramon N., Castellanos G., Döring A. Sentinel-1B Independent in Orbit System Calibration First Results // Proc. EUSAR-2016. Hamburg. 2016. P. 55–58.

Detection of aircraft using change detection method on Sentinel-1 synthetic aperture radar images

M. Yu. Dostovalov, R. V. Ermakov, A. A. Teplov

Scientific Research Institute of Precise Instruments, Moscow 127490, Russia E-mail: kotik_55@mail.ru

The work demonstrates the results of aircraft detection using Sentinel-1 synthetic aperture radar (SAR) images. The resolution of Sentinel-1 images is, in general, insufficient for aircraft monitoring. Nevertheless, the presented examples of processing show that in some cases large airplane types can be detected applying change detection technique. While using change detection methods we need to take into account the problem of detection of objects that are located at the same places in two or several images. This problem was eliminated using a reference image formed by minimum pixels of entire image series. The results of processing in many cases clearly correspond to the number of targets that can be detected in the image manually. The estimated probability of correct detection of an aircraft located in the airfield was about 0.76 using a series of 15 Sentinel-1 SAR images (GRD products) acquired in the same observation conditions within the period from January to November 2017.

Keywords: synthetic aperture radar, SAR, Sentinel-1, SAR images, change detection, object detection

Accepted: 01.06.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-49-57

References

- 1. Akhmanov S.A., Dyakov Y.E., Chirkin A.S., *Vvedenie v statisticheskuyu radiofiziky i optiku* (Introduction to statistical radiophysic and optic), Moscow: Nauka, 1981, 640 p.
- Dostovalov M. Y., Lifanov A. S., Moussiniants T. G., Obnaruzhenie ob"ektov po izmeneniyam na radiolokatsionnykh izobrazheniyakh RSA (Object monitoring using SAR images change detection), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2007, No. 4, pp. 15–26.
- 3. Fukunaga K., *Vvedenie v statisticheskuyu teoriyu raspoznavaniya obrazov* (Introduction to statistical pattern recognition), Moscow: Nauka, 1979, 367 p.
- 4. Baessler M., Runge H., Suchandt S., Zhang Y., Change detection for traffic measurement in multi-temporal TerraSAR-X SpotLight images, *Proc. EUSAR-2012*, Nurnberg, 2012, pp. 328–331.
- 5. Chen J., Zhang B., Wang C., Backscattering Feature Analysis and Recognition of Civilian Aircraft in TerraSAR-X Images, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, Vol. 12, No. 4, pp. 796–800.
- 6. Conradsen K., Nielsen A., Schou J., Skriver H., A test statistic in the complex Wishart distribution and its application to change detection in polarimetric SAR data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, Vol. 41, No. 1, pp. 4–19.
- 7. Doerry A., Dickey F., Synthetic Aperture Radar, *Optics and Photonics News*, 2004, Vol. 15, No. 11, pp. 28–33.
- 8. Geudtner D., Torres R., Snoeij P., Bibby D., Sentinel-1 System, Proc. EUSAR-2014, Berlin, 2014, pp. 1–3.
- 9. Le T., Atto A., Trouve E., Nicolas J., Adaptive multitemporal SAR image filtering based on the change detection matrix, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, Vol. 11, No. 10, pp. 1826–1830.
- 10. Nielsen A., Conradsen K., Skriver H., Canty M., Change detection in a series of Sentinel-1 SAR data, 9th Intern. Workshop on the Analysis of Multitemporal Remote Sensing Images (MultiTemp), 2017.
- 11. Potin P., Rosich B., Grimont P., Sentinel-1 Mission Status, *Proc. EUSAR-2016*, Hamburg, 2016, pp. 59–64.
- 12. Rignot E., van Zylv J., Change detection techniques for ERS-1 SAR data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1993, Vol. 31, pp. 896–906.
- Schwerdt M., Schmidt K., Tous-Ramon N., Castellanos G., Döring A., Sentinel-1B Independent in Orbit System Calibration — First Results, *Proc. EUSAR-2016*, Hamburg, 2016, pp. 55–58.