

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ КИЛЬВАТЕРНЫХ СЛЕДОВ НАДВОДНЫХ СУДОВ НА РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ КОСМИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАТОРОВ С СИНТЕЗИРОВАНИЕМ АПЕРТУРЫ

Д. А. Ясенцев, С. И. Елизаветина, М. С. Виноградов

Приведены результаты разработки технологии автоматического обнаружения кильватерных следов надводных судов на снимках морской поверхности, полученных космическими радиолокаторами с синтезированием апертуры. Приведены результаты исследования наиболее известных способов поиска прямых линий на изображениях, таких как преобразование Радона и преобразование Хафа. Проведено исследование методов улучшения исходного радиолокационного изображения для повышения точности работы алгоритмов поиска следов. Проведен анализ эффективности разработанной технологии автоматического обнаружения кильватерных следов на примерах радиолокационных изображений С-диапазона.

Ключевые слова: обработка радиолокационных изображений, кильватерные следы, преобразование Радона.

Введение

При обработке снимков морской поверхности, полученных космическими радиолокаторами с синтезированием апертуры (РСА), помимо определения таких характеристик, как географические координаты и размеры судов, существует возможность оценки их скорости и направления движения в случае наличия на снимке видимого кильватерного следа от корабля. Установка отметки от кильватерного следа на снимке может быть выполнена оператором вручную, однако при таком субъективном подходе в условиях наличия спекл-шума всегда существует вероятность ошибки. Кроме того, работа оператора требует определенных временных затрат, которые при увеличении объема поступающих данных от группировок космических РСА становятся критическими. Автоматическое определение направления кильватерных следов позволяет исключить возможные ошибки, обусловленные человеческим фактором, и существенно сократить трудозатраты при обработке, что делает разработку технологии автоматизации обнаружения довольно актуальной. Таким образом, становится возможным полная автоматизация процесса обработки радиолокационных изображений (РЛИ) морской поверхности, исключающая наличие оператора. Полная автоматизация касается решения таких задач, как обнаружение судов и вычисление их координат, поиск кильватерных следов, вычисление абсолютной скорости судна и направления движения, а также определения размеров судов.

Физические основы образования кильватерных следов на морской поверхности

Движение любого судна (надводного корабля) сопровождается возникновением сложной системы гидродинамических волн, сохраняющихся в течение длительного времени [1]. За кораблем образуется кильватерный след, видимый иногда на протяжении многих километров. Продолжительность

и протяженность кильватерного следа зависит от водоизмещения и скорости корабля (судна), а также состояния морской поверхности.

Применительно к радиолокационному зондированию сглаживание турбулентностью высокочастотных составляющих в спектре морского волнения приводит к увеличению зеркальных отражений и, как следствие, к ослаблению радиолокационных сигналов, отражаемых обратно в направлении на источник радиоволн. В результате турбулентный кильватерный след надводного корабля проявляется на РЛИ в виде темной полосы на фоне отражений от волн на морской поверхности. При благоприятных условиях опытными дешифровщиками РЛИ обнаруживаются следы находящихся далеко от текущего положения самих кораблей.

Надводные суда оставляют на водной поверхности не только отрицательно, но и положительно контрастные следы. Последние образуются в результате развития за судном поперечных и расходящихся гидродинамических волн, перемещающихся со скоростью 30 – 40 % от скорости судна [2].

Обобщенно можно сказать, что причиной проявления кильватерных следов на изображениях, полученных с помощью космических РСА, является неравномерный характер рассеяния электромагнитных волн от шероховатостей морской поверхности, обусловленных наличием кильватерных волн различного типа.

По своей структуре кильватерные следы делятся на четыре категории [3]:

1. Турбулентные следы, растянутые непосредственно за судном.
2. Волна Кельвина, образованная декаметровыми поверхностными гравитационными волнами.
3. Узконаправленный след, видимый через брэгговское рассеяние от коротких сантиметровых волн, генерируемых гидродинамическими процессами вдоль корпуса судна.
4. Внутренние волны.

Наиболее часто у судов наблюдается именно турбулентный след. Кроме него можно наблюдать и V-образный кильватерный след, в который может входить и турбулентный след.

Анализ эффективности методов поиска прямых на радиолокационных изображениях применительно к задаче обнаружения кильватерных следов

В основе алгоритма автоматического обнаружения следа надводных судов обычно лежат преобразования Радона или Хафа. Возможность автоматизировать с их помощью процесс обнаружения следа судов доказали многочисленные исследования [4 – 7].

Каждое из преобразований, несмотря на сходство, имеет свои особенности и недостатки, рассмотрев которые можно сделать выводы о том, какое из преобразований следует применять для решения данной задачи.

Преобразование Радона – это интегральное преобразование функции многих переменных, которое впервые ввел в 1917 году австрийский математик Иоганн Радон [8].

Рассмотрим преобразование Радона для функции двух переменных (именно данный случай наиболее важен на практике). Пусть $f(x, y)$ – функция двух действительных переменных, определенная на всей плоскости и достаточно быстро убывающая на бесконечности (так, чтобы соответствующие несобственные интегралы сходились). Тогда преобразованием Радона функции $f(x, y)$ называется функция:

$$R(s, a) = \int_{L=AA'} f(x, y) dL = \int_{-\infty}^{\infty} f(x \cos(a) - z \sin(a), s \sin(a)) dz \cdot (1)$$

Преобразование Радона (1) имеет простой геометрический смысл – это интеграл от функции $f(x, y)$ вдоль прямой AA' , перпендикулярной вектору $\mathbf{n} = \cos(a), \sin(a)$ и проходящей на расстоянии s (измеренном вдоль вектора \mathbf{n} с соответствующим знаком) от начала координат (рис. 1). Уравнение прямой AA' есть: $x \cos(a) + y \sin(a) - s = 0$.

Новые переменные (s, z) получены из переменных (x, y) путем поворота на угол α против часовой стрелки. В этих координатах уравнение прямой AA' будет $s = \text{const}$, где значение константы равно расстоянию от начала координат до прямой AA' . Из аналитической геометрии известно, что $x = s \cos(a) - z \sin(a)$, $y = s \sin(a) - z \cos(a)$, а обратное преобразование дает $s = x \cos(a) + y \sin(a) - z \cos(a)$, $z = -x \sin(a) + y \cos(a)$ [9].

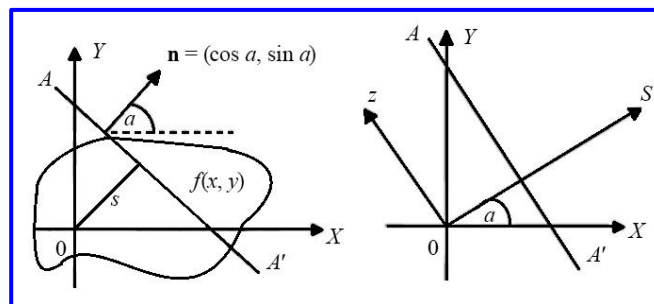


Рис. 1. Двумерное преобразование Радона

В 1962 году Поль Хаф запатентовал алгоритм, применяемый для извлечения элементов из изображения. Преобразование Хафа предназначено для поиска объектов, принадлежащих определенному классу фигур с использованием процедуры голосования. Процедура голосования применяется к пространству параметров, из которого и получаются объекты определенного класса фигур по локальному максимуму в так называемом накопительном пространстве, которое строится при вычислении трансформации Хафа [10].

Рассмотрим простейший случай преобразования Хафа для обнаружения прямых линий на изображениях. Прямая линия может быть задана уравнением $y = mx + b$ и может быть вычислена по любой паре точек (x, y) на изображении. Главная идея преобразования Хафа – учесть характеристики прямой не как уравнение, построенное по паре точек изображения, а в терминах ее параметров, то есть m – углового коэффициента и b – точки пересечения с осью ординат. Исходя из этого прямая, заданная уравнением $y = mx + b$, может быть представлена в виде точки с координатами (b, m) в пространстве параметров.

Однако прямые, параллельные оси ординат, имеют бесконечные значения для параметра m . Поэтому удобнее представить прямую с помощью других параметров, характеризующих прямую линию в полярной системе координат, а именно r и θ . Параметр r – это длина радиус-вектора ближайшей к началу координат точки на прямой (то есть нормали к прямой, проведенной из начала координат), а θ – это угол между этим вектором и осью абсцисс. При таком описании прямых не возникают бесконечные параметры.

Таким образом, уравнение прямой линии в полярной системе координат можно записать как:

$$r = x \cos \theta + y \sin \theta. \quad (2)$$

Поэтому возможно связать с каждой прямой на исходном изображении (в плоскости $X - Y$) точку с координатами r, θ в плоскости параметров, которая является уникальной при условии, что $\theta \in [0, 2\pi]$, $r \geq 0$.

Алгоритм преобразования Хафа использует массив, называемый аккумулятором, для определения присутствия прямой $y = mx + b$. Размерность аккумулятора равна количеству неизвестных параметров пространства Хафа. Например, для линейной трансформации нужно использовать двумерный массив, так как имеются два неизвестных параметра: m и b . Два измерения аккумулятора соответствуют квантованным значениям параметров m и b . Для каждой точки и ее соседей алгоритм определяет достаточен ли вес границы в этой точке. Если да, то алгоритм вычисляет параметры прямой и увеличивает значение в ячейке аккумулятора, соответствующей данным параметрам.

Преобразование Хафа эффективно только при значительном количестве «попаданий» в соответствующий элемент пространства Хафа, что дает возможность с уверенностью определить фигуру, пренебрегая фоновым шумом. Это значит, что размер элемента не должен быть очень маленьким, иначе некоторые значения попадут в соседние элементы, уменьшая видимость нужного элемента. Это ограничение и другие, описанные ранее, говорят о том, что преобразование Хафа проигрывает по эффективности использованию преобразованию Радона, в котором зашумленность РЛИ играет меньшую роль [11]. Таким образом, для решения задачи автоматического нахождения кильватерных следов целесообразно выбирать именно преобразование Радона.

Оценка необходимости предварительного улучшения радиометрического качества радиолокационных изображений кильватерных следов

При нахождении кильватерных следов на РЛИ возникают некоторые ограничения, обусловленные особенностями снимков водной поверхности, не позволяющие оперировать моделью обнаруже-

ния объектов при отсутствии дестабилизирующих искажений (рис. 2). К таким искажениям можно отнести шумы, возникающие из-за волнений на водной поверхности, рифы, проявляющиеся на снимке как затемненные участки, более старые следы других кораблей, случайно попавшие в зону обработки, а также высокий уровень спекл-шума. Волны могут быть как капиллярные, так и гравитационные, они делают синопамму на выходе функции преобразования Радона сложно читаемой и, как следствие, увеличивается вероятность ложного обнаружения кильватерного следа.

Для решения проблемы ухудшения качества обнаружения, обусловленного наличием на реальных снимках разнородных шумов и помех, предлагается использование дополнительных этапов обработки, улучшающих как полученные амплитудные изображения, так и синопаммы.

В качестве меры по улучшению исходного изображения предлагается использование фильтрации спекл-шума. При рассеянии когерентного излучения на шероховатой поверхности образуются пятнистые дифракционные картины, называемые спекл-полями [12]. РЛИ, полученные когерентными РСА, содержат спекл-структуры, называемые спекл-шумом.

Таким образом, процесс автоматического поиска кильватерных следов необходимо дополнить этапом подавления спекл-шумов, и шумов, вносимых волнами и рябью на водной поверхности (рис. 2, а). Для оценки влияния процедуры низкочастотной фильтрации на качество обнаружения было рассмотрено применение фильтра Ли. Фильтр Ли основан на формировании локальных статистик, значения которых связаны с характеристиками обрабатываемого фрагмента изображения.

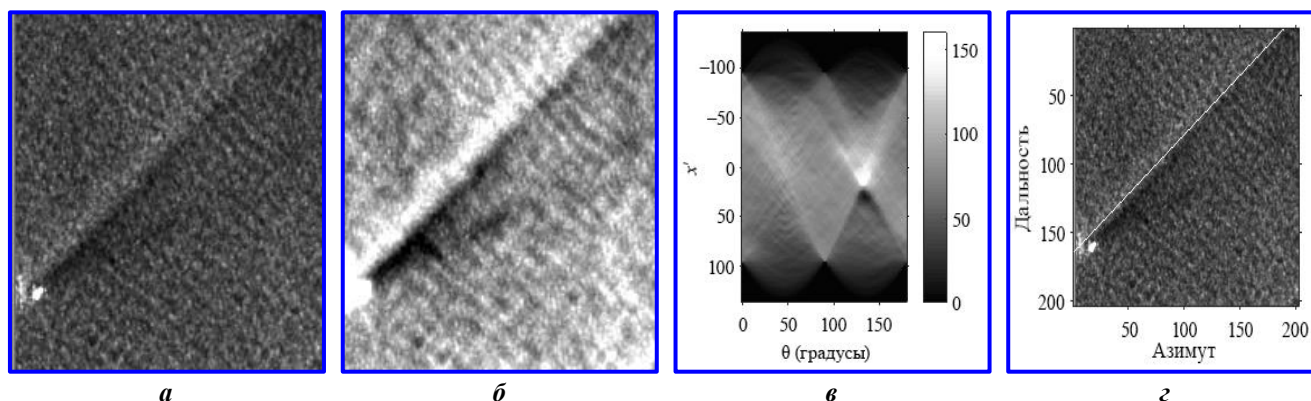


Рис. 2. Нахождение кильватерного следа при фильтрации спекл-шума: а – исходное изображение; б – изображение, полученное в результате фильтрации спекл-шума; в – полученная синопамма; г – результат обнаружения кильватерного следа

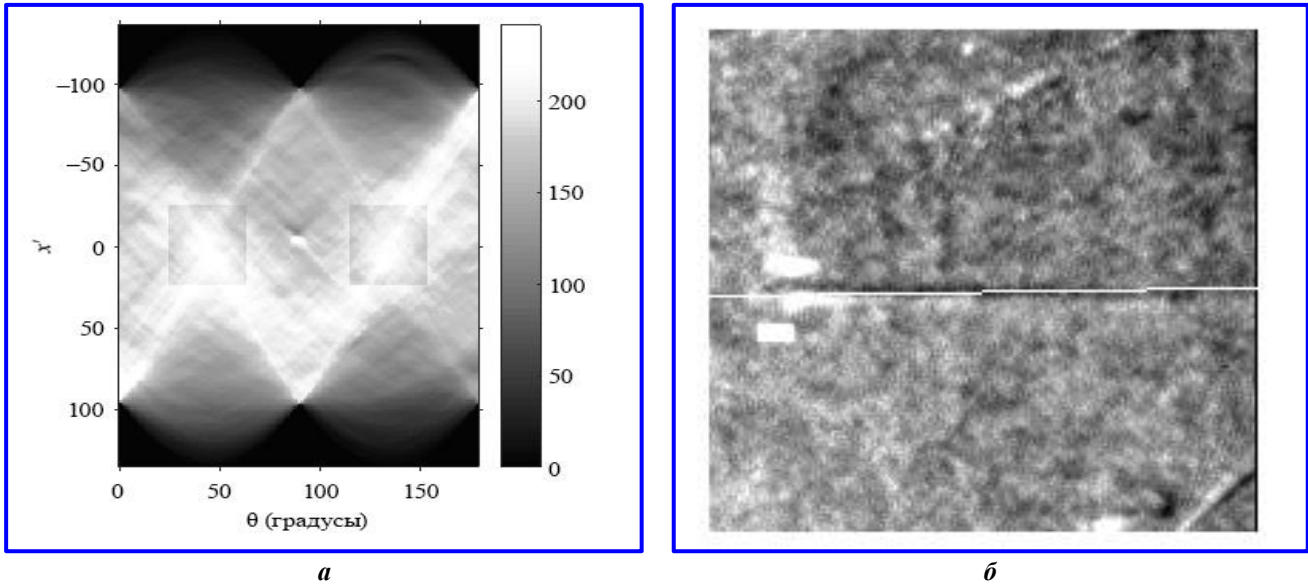


Рис. 3. Пример обработки синограммы: *a* – измененная синограмма; *b* – результат обнаружения кильватерного следа

Пусть имеет место мультипликативная модель:

$$g(x, y) = f(x, y) \cdot n(x, y), \quad (3)$$

где $g(x, y)$ – наблюдаемое, искаженное шумом изображение; $f(x, y)$ – неискаженное шумом изображение, локально являющееся стационарным; $n(x, y)$ – шумовая составляющая, распределенная по нормальному закону с параметрами $(1, \sigma_n^2)$ и некоррелированная с изображением $f(x, y)$.

Тогда, имеем:

$$m_g = m_f m_n = m_f, \quad (4)$$

$$\sigma_g^2 = M[f^2]M[n^2] - m_f^2 m_n^2 = m_f^2 (M[n^2] - m_n^2) = m_f^2 \sigma_n^2. \quad (5)$$

Для оценки поля изображения в точке используется статистика:

$$\hat{f} = m_g + \frac{\sigma_f^2}{m_g^2 \sigma_n^2 + \sigma_f^2} (g - m_g), \quad (6)$$

где σ_f^2 – дисперсия неискаженного шумами изображения в локальной области, оценка которой формируется в соответствии с равенством:

$$\sigma_f^2 = \frac{\sigma_g^2 + m_g^2}{\sigma_n^2 + 1} - m_g^2, \quad (7)$$

$$\sigma_n^2 = \frac{\sigma_g^2}{m_f^2} = \frac{\sigma_g^2}{m_g^2}. \quad (8)$$

Статистика (6) особенно эффективна при подавлении спекл-шума на РЛИ однородных и изотропных поверхностей. При этом она обладает адаптивными свойствами к характеру наблюдаемой сцены, достаточно проста в реализации и обеспечивает сохранение контуров, границ и контрастных объектов на РЛИ.

Кроме фильтрации спекл-шума были рассмотрены и другие способы улучшения исходного изображения, такие, как выделение границ на исходном полутоновом изображении и повышение контрастности, однако они не дали удовлетворительных результатов или решали поставленные задачи только частично.

При выделении границ на исходном полутоновом изображении результат положителен лишь в том случае, если на РЛИ у отметки от судна отсутствуют боковые лепестки, а также на водной поверхности нет капиллярных волн.

Если же у отметки от судна есть боковые лепестки, а на водной поверхности есть капиллярные волны или любые другие яркие точки, то на синограмме точка максимума не будет соответствовать отметке кильватерного следа и след не обнаружится. Это связано с тем, что боковые лепестки на РЛИ имеют однородную структуру и более ярко выраженные, нежели кильватерные, следы.

Некоторые волны выделяются функцией как короткие четкие линии, которые в совокупности в дальнейшем интерпретируются на синограмме так, что область, соответствующая им, становится слишком яркой, а область, соответствующая следу судна, теряется на их фоне.

Кроме функции выделения границ была исследована совокупность двух методов коррекции, в результате работы которых повышалась контрастность изображения. Это контрастирование с гамма-коррекцией и поиск границ областей, где проводилось повышение контраста изображения.

Однако только этого преобразования изображения оказалось недостаточно, так как, кроме кильватерного следа, на снимке более яркими становятся и помехи, создаваемые на водной поверхности, препятствующие правильной интерпретации. При рассмотрении результатов коррекции одного и того же изображения тремя способами (фильтрация спекл-шума, выделение границ функцией, повышение контрастности изображения) было выяснено, что наиболее эффективным способом обнаружения, с точки зрения повышения качества, является фильтрация спекл-шума.

Однако, как показывает опыт обработки снимков с кильватерными следами, одной только фильтрации спекл-шума не всегда достаточно, поскольку не удается устранить яркие области на водной поверхности, не принадлежащие кильватерному следу [13]. В связи с такими явлениями, как неоднородность глубины водной толщи, наличие рифов, наличие гравитационных волн и т. д., на синограмме появляются яркие области, соответствующие двум прямым, проходящим через центр изображения и имеющим углы 45 и -45 градусов.

Ни один из рассмотренных выше способов коррекции изображения не может решить эту проблему. Для ее решения необходима обработка непосредственно синограммы, полученной в результате преобразования Радона. Так как известны координаты области помех, то, внося определенные изменения в алгоритм заполнения массива синограммы, можно сделать их менее яркими, что даст возможность наблюдать искомый след корабля на фоне неоднородной водной поверхности.

Автоматический обнаружитель следа, алгоритм его функционирования и оценка эффективности

При реализации автоматического определения кильватерных снимков на РЛИ была использована технология, работу которой можно проиллюстрировать на примере обработки тестового изображения. На РЛИ предварительно обнаружены два корабля и вычислены их координаты. Изображение получено с помощью канадского спутника Radarsat-1 с радиолокатором C -диапазона. Разрешение радиолокатора составляет 9×9 м, сигнал имеет горизонтальную поляризацию.

Алгоритм автоматического поиска кильватерного следа включает в себя следующие основные этапы:

1. Выполняется амплитудная коррекция исходного радиолокационного амплитудного изображе-

ния. Как было отмечено ранее, для подавления спекл-шумов исходного изображения целесообразно использовать фильтрацию спекл-шума с помощью фильтра Ли (рис. 4).

2. Вокруг корабля выбирается квадрат размера 400×400 пикселей. Это происходит автоматически при работе функции. В дальнейшем в этой области строится прямая, соответствующая кильватерному следу выбранного судна.

3. Вычисляется преобразование Радона по каждому градусу от 0 до 180 для обеих областей. В результате формируется две синограммы, соответствующие выбранным участкам изображения (рис. 5).

4. На полученных синограммах находится точка максимума.

5. По координатам точки максимума вычисляются коэффициенты искомой прямой.

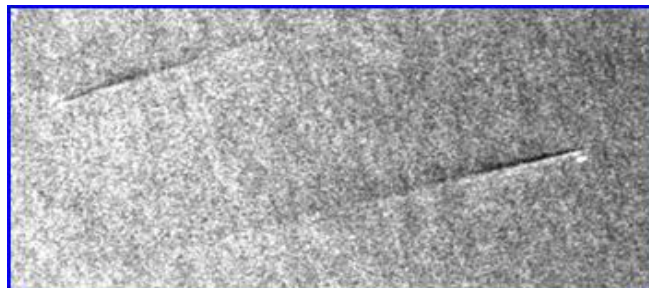
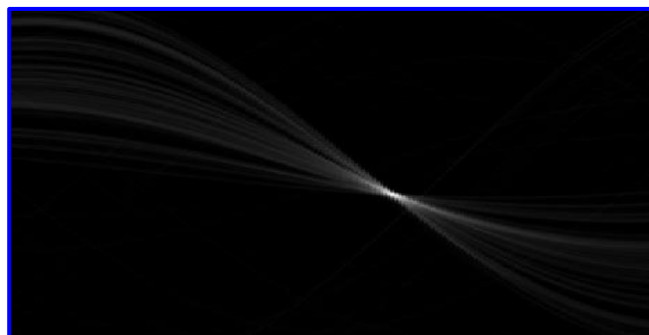
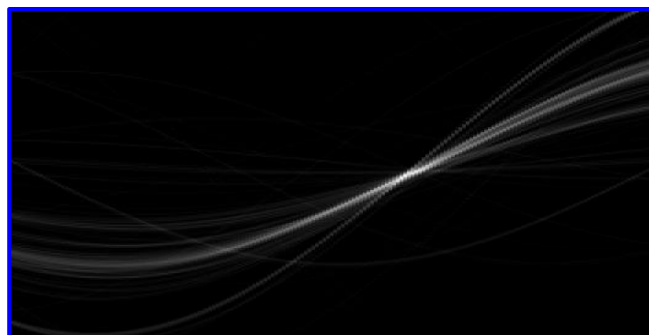


Рис. 4. Тестовое радиолокационное изображение с двумя судами

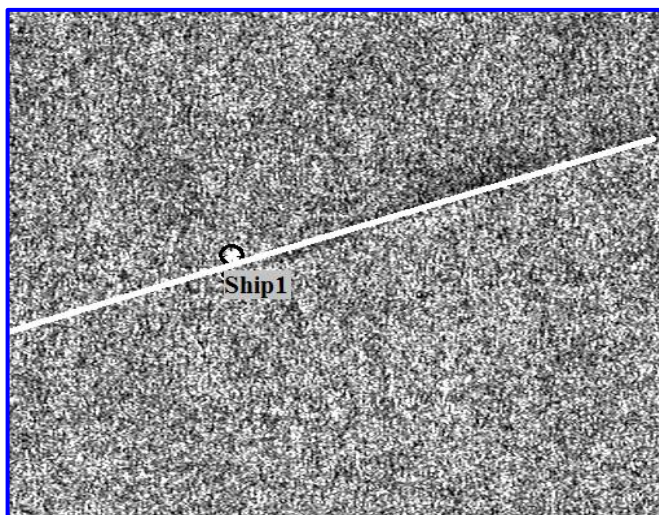


а

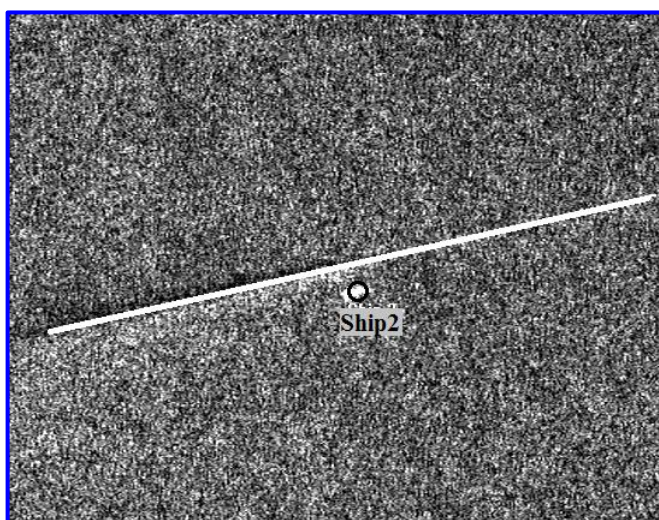


б

Рис. 5. Синограммы, соответствующие изображениям с первым и вторым судном: *а* – синограмма первой области с судном; *б* – синограмма второй области с судном



а



б

Рис. 6. Кильватерные следы, построенные автоматически:
а – кильватерный след первого судна;
б – кильватерный след второго судна

После завершения обработки представленного изображения можно наблюдать исходное изображение, на котором отмечены найденные корабли и их следы (рис. 6).

В процессе анализа работы программы автоматического обнаружения кильватерных следов были обработаны радиолокационные снимки, полученные европейскими РСА С-диапазона Sentinel-1A, Sentinel-1B. Тестирование проводилось на 20-ти изображениях Гибралтарского пролива, Желтого, Южно-Китайского и Боханьского морей. На 20-ти снимках было обнаружено 16 следов кораблей из 22 (72%). Это подтверждает эффективность предложенной технологии обработки.

Для проверки эффективности предварительной фильтрации были обработаны те же самые изображения, но без использования фильтра Ли. Процент обнаружения следа в этом случае составил 9% (правильно построены следы двух кораблей, в том числе след, непостроенный при использовании предварительной фильтрации). Таким образом, была подтверждена целесообразность предварительной фильтрации спекл-шума изображения при поиске кильватерных следов.

Оценка направления движения судна и его скорости

На РЛИ кильватерные следы пространственно смещены относительно отметок от судов в направлении линии пути (азимута) РСА. Это дает возможность по величине смещения определить радиальную скорость судна, по положению отметки от кильватерного следа определить направление движения судна и, как следствие, рассчитать абсолютную скорость судна.

Смещение отметки корабля на снимке определяется непосредственно из снимка и пересчитывается из количества пикселей на снимке в расстояние через известное значение межпиксельного расстояния по линии пути. Наклонная дальность и угол наблюдения рассчитываются из геометрии обзора по параметрам из служебной информации снимка. По этим же параметрам рассчитывается путевая скорость РСА.

Положение на снимке отметки от кильватерного следа позволяет определить угол между вектором скорости корабля и проекцией вектора скорости РСА на поверхность. Таким образом, точность установки отметки от кильватерного следа оказывает непосредственное влияние на достоверность определения скорости и направления движения судна.

При оценивании характеристик надводных судов по РЛИ выполняются следующие этапы обработки: загрузка и импорт РЛИ из какого-либо внешнего формата данных во внутренний формат процессора обнаружения судов; выделение интересующего участка; обнаружение надводных судов; обнаружение кильватерных следов; вычисление абсолютных скоростей; определение линейных размеров судов. При использовании технологии автоматического обнаружения кильватерных следов процесс оценивания характеристик надводных судов по РЛИ становится полностью автоматическим.

После определения кильватерного следа необходимо соотнести их с имеющимся списком судов. Далее можно вычислять параметры кораблей по методике, представленной ниже.

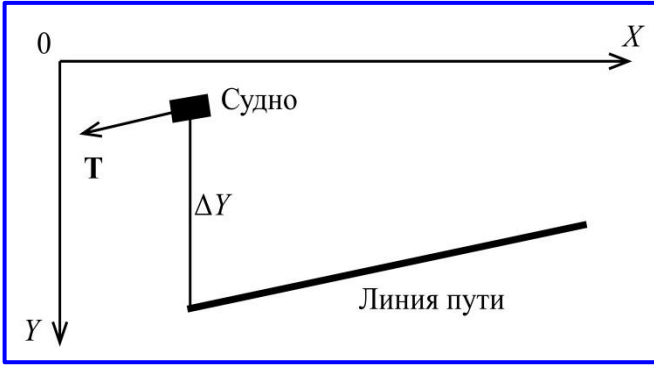


Рис. 7. Определение азимутального смещения ΔY судна относительно его кильватерного следа и вектора скорости \mathbf{T} судна в антенной системе координат

Алгоритм оценки абсолютной скорости судна:

1. Вычисление эфемерид $\{\mathbf{R}_{SAT}, \mathbf{V}_{SAT}\}$ платформы на момент траверса судна методом интерполяции полиномами Лагранжа по опорным точкам орбиты.

2. Вычисление наклонной дальности R_{SL} от платформы до судна на момент траверса судна.

3. Вычисление радиальной скорости судна $V_{r_{SHIP}}$ относительно платформы по формуле:

$$V_{r_{SHIP}} = \frac{V_{SAT} \Delta Y}{R_{SL}}, \quad (9)$$

где ΔY – азимутальное смещение судна на РЛИ (рис. 7), выраженное в тех же единицах измерения длины, что и наклонная дальность R_{SL} .

4. Вычисление радиус-вектора судна \mathbf{R}_{SHIP} в гринвичской вращающейся системе координат методом прямого геокодирования на нулевую высоту.

5. Вычисление угла скольжения β радиолокационного сигнала по теореме косинусов:

$$\beta = \arccos \left(\frac{R_{SHIP} R_{SHIP} + R_{SL} R_{SL} - R_{SAT} R_{SAT}}{2 R_{SHIP} R_{SL}} \right) - \frac{\pi}{2}. \quad (10)$$

6. Вычисление проекции \mathbf{V} радиальной скорости судна $V_{r_{SHIP}}$ на плоскость, локально аппроксимирующую поверхность Земли, называемую далее рабочей плоскостью:

$$V = \frac{V_{r_{ship}}}{\cos \beta}. \quad (11)$$

7. Определение локального орта \mathbf{e}_N , лежащего в рабочей плоскости и направленного на северный географический полюс (локального направления меридиана). В гринвичской вращающейся системе

координат единичный вектор, направленный вдоль оси вращения Земли, имеет компоненты:

$$\mathbf{e}_{ON} = [0; 0; 1]^T;$$

$$OP = \frac{OS}{\cos \varphi} = R_{SHIP} \frac{R_{SHIP}}{\mathbf{R}_{SHIP} \mathbf{e}_{ON}}; \quad (12)$$

$$\mathbf{e}_N = \frac{a \mathbf{e}_{ON} - \mathbf{R}_{SHIP}}{|a \mathbf{e}_{ON} - \mathbf{R}_{SHIP}|}. \quad (13)$$

8. Определение локального орта \mathbf{e}_I , лежащего в рабочей плоскости и направленного на восток (локального направления параллели):

$$\mathbf{e}_I = \mathbf{e}_N \frac{\mathbf{R}_{SHIP}}{R_{SHIP}}. \quad (14)$$

9. Вычисление проекции \mathbf{V} вектора радиальной скорости судна относительно платформы на рабочую плоскость:

$$\mathbf{V} = V \left(\frac{\mathbf{R}_{SHIP}}{R_{SHIP}} \cdot \frac{\mathbf{V}_{SAT}}{V_{SAT}} \right). \quad (15)$$

10. Вычисление орта \mathbf{e}_W кильватерного следа на рабочей плоскости путем геокодирования вектора кильватерного следа \mathbf{T} (рис. 6) и его нормирования.

11. Вычисление угла γ между ортом \mathbf{e}_W кильватерного следа и проекцией \mathbf{V} вектора радиальной скорости $\mathbf{V}_{r_{SHIP}}$ судна относительно платформы на рабочую плоскость:

$$\gamma = \arccos \left[\frac{\mathbf{V}}{V} \mathbf{e}_W \right]. \quad (16)$$

12. Вычисление вектора \mathbf{V}_{SHIP} абсолютной скорости судна:

$$\mathbf{V}_{SHIP} = \frac{V}{\cos \gamma} \mathbf{e}_W. \quad (17)$$

13. Вычисление углов образуемых вектором \mathbf{V}_{SHIP} с ортами базиса $\{\mathbf{e}_I, \mathbf{e}_N\}$:

$$C1 = \arccos \left[\frac{\mathbf{V}_{SHIP}}{V_{SHIP}} \mathbf{e}_I \right], \quad C2 = \arccos \left[\frac{\mathbf{V}_{SHIP}}{V_{SHIP}} \mathbf{e}_N \right]. \quad (18)$$

14. Вычисление азимутального угла ψ , отсчитываемого по направлению хода часовой стрелки от локального направления на север \mathbf{e}_N :

$$\psi = \begin{cases} C1, & C1 \leq \frac{\pi}{2}; \\ 2\pi - C1, & C1 > \frac{\pi}{2}. \end{cases} \quad (19)$$

Выводы

1. Предложенная технология автоматического обнаружения кильватерных следов была успешно реализована и работает с погрешностью 27%, что дает преимущество перед ручным определением следа и помогает качественнее оценивать направление движения судна и его скорость за счет исключения ошибок, связанных с человеческим фактором. По сравнению с работой оператора, примерно в 10 раз уменьшается время поиска и установки линии кильватерного следа. Это позволяет повысить эффективность решения таких задач, как сбор данных и общий контроль акватории по результатам съемок большим количеством аппаратов в составе группировок космических РСА.

2. С целью повышения процента обнаружения кильватерных следов необходимо рассмотреть модификацию алгоритма обнаружения, предусматривающую поиск не только темных турбулентных следов, но и светлых кильватерных следов на контрастном темном фоне. Решение этой задачи сопряжено с необходимостью устранения неоднородности фона, которая влияет на качество обнаружения более остро, нежели в случае поиска исключительно темных турбулентных следов.

Литература

- Трасология в навигации / А. Г. Сергушев, И. Ф. Шишкин // Судостроение. – 2010. – № 1 (788). – С. 53–56.
- Сергушев А. Г. Трасология в военно-морском искусстве / А. Г. Сергушев // Морской сборник. – 2009. – № 8 (1950). – С. 28–33.
- Монин А. С. Явления на поверхности океана / А. С. Монин, В. П. Красицкий. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1985. – 375 с.
- An Evaluation of Current Ship Wake Detection Algorithms in SAR Images / Andreas Arnold-Bos, Ali Khenchaf, Arnaud Martin // Characterisation marine envir. – Brest, France, 2006. – URL: https://www.researchgate.net/publication/47503987_An_evaluation_of_current_ship_wake_detection_algorithms_en_SAR_images.
- Wake Component Detection in X-Band SAR Images for Ship Heading and Velocity Estimation / Maria Daniela Graziano, Marco D’Errico, Giancarlo Rufino // Remote Sens. – 2016. – 8 (6), 498. – DOI : 10.3390/rs8060498. – URL : <https://www.mdpi.com/2072-4292/8/6/498>.
- Karakuş O. Ship Wake Detection in SAR Images via Sparse Regularization / O. Karakuş, I. Rizaev, A. Achim // Transac. Geosc. and Remote Sens. – 2020. – Vol. 58. – No. 3. – P. 1665–1677.
- Tunaley J. K. The estimation of ship velocity from SAR imagery / J. K. Tunaley // Conference: Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS '03. Proceedings. IEEE International ; IEEE Xplore. – 2003. – P. 191 – 193. – DOI: 10.1109/IGARSS.2003.1293720. – URL : https://www.london-research-and-development.com/TU01_0920_Tunaley.pdf.
- Грузман И. С. Математические задачи компьютерной томографии / И. С. Грузман // Соросовский образовательный журнал. – 2001. – Т. 7. – № 5. – С. 117–121.
- Волков В. А. Ряды Фурье. Интегральные преобразования Фурье и Радона / под ред. Р. М. Минькова. – Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2014. – 34 с.
- Корчевская Е. А. Методические указания по дисциплине «Распознавание образов» / Е. А. Корчевская. – Витебск : Витебский государственный университет им. П. М. Машерова, 2011. – 22 с.
- Гайдуков Н. П. Применение преобразования Хафа для распознавания текста / Н. П. Гайдуков, Е. О. Савкова // Информационные и компьютерные технологии. – 2012. – С. 136–140.
- Шувалов Р. И. Разработка радиометрической модели снимков поверхности Земли, формируемых по данным измерений космических радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны / Р. И. Шувалов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия «Естественные науки». – 2009. – № 4. – С. 99–117.
- Ясенцев Д. А. Автоматическое обнаружение кильватерных следов надводных судов на радиолокационных изображениях / Д. А. Ясенцев, С. И. Елизаветина // 19-я Международная конференция «Авиация и космонавтика»: сборник тезисов докладов конференции. – Москва : Издательство «Перо», 2020. – С. 362–363.

Поступила в редакцию 02.08.2023

Дмитрий Александрович Ясенцев, кандидат технических наук, доцент кафедры, т. +7 (926) 623-53-57, e-mail: yasantsev@yandex.ru. (ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»).

Светлана Игоревна Елизаветина, программист, т. +7 (916) 931-97-07, e-mail: elizavetinas@yandex.ru. (АО «Ракурс»).

Максим Сергеевич Виноградов, ассистент кафедры, т. +7 (915) 061-13-05, e-mail: vinogradovMS@yandex.ru. (ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»).

AUTOMATIC DETECTION OF WAKE TRACES SURFACE VESSELS ON RADAR IMAGES OF SPACEBORNE SYNTHETIC APERTURE RADARS

D. A. Yasentsev, S. I. Elizavetina, M. S. Vinogradov

This article presents results development intended technology for ships wake automatic detection on the radar images. The presents research of Radon transform and Hough transform. These transformations are the most well-known for finding straight lines in images. This article considers methods intended for improving of the ships wake automatic detection quality on the radar images. The analysis of the effectiveness of the development intended technology for ships wake automatic detection on the examples of C-band radar images.

Key words: Processing RLI, ship wake, Radon transform.

References

1. Tracology in navigation / A. G. Sergushev, I. F. Shishkin // Shipbuilding. – 2010. – № 1 (788). – P. 53–56.
2. Sergushev A. G. Tracology in naval art / A. G. Sergushev // Marine collection. – 2009. – № 8 (1950). – P. 28–33.
3. Monin A. S. Phenomena on the ocean surface / A. S. Monin, V. P. Krasitsky. – Leningrad: Hydrometeoizdat, 1985. – 375 p.
4. An Evaluation of Current Ship Wake Detection Algorithms in SAR Images / Andreas Arnold-Bos, Ali Khenchaf, Arnaud Martin // Characterisation marine envir. – Brest, France, 2006. – URL : https://www.researchgate.net/publication/47503987_An_evaluation_of_current_ship_wake_detection_algorithms_en_SAR_images.
5. Wake Component Detection in X-Band SAR Images for Ship Heading and Velocity Estimation / Maria Daniela Graziano, Marco D'Errico, Giancarlo Rufino // Remote Sens. – 2016. – 8 (6), 498. – DOI : 10.3390/rs8060498. – URL : <https://www.mdpi.com/2072-4292/8/6/498>.
6. Karakuş O. Ship Wake Detection in SAR Images via Sparse Regularization / O. Karakuş, I. Rizaev, A. Achim. // Transac. Geosc. and Remote Sens. – 2020. – Vol. 58. – No. 3. – P. 1665–1677.
7. Tunaley J. K. The estimation of ship velocity from SAR imagery / J. K. Tunaley // Conference: Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS '03. Proceedings. IEEE International ; IEEE Xplore. – 2003. – P. 191–193. – DOI: 10.1109/IGARSS.2003.1293720. – URL : https://www.london-research-and-development.com/TU01_0920_Tunaley.pdf.
8. Gruzman I. S. Mathematical problems of computed tomography / I. S. Gruzman // Soros Educational Journal. – 2001. – Vol. 7. – No. 5. – P. 117–121.
9. Volkov V. A. Fourier series. Integral transformations of Fourier and Radon / ed. by R. M. Minkov. – Esa-Edinburgh : Ural University Press, 2014. – 34 p.
10. Korchevskaya E. A. Methodological guidelines for the discipline «Pattern recognition» / E. A. Korchevskaya. – Vitebsk : Vitebsk State University named after P. M. Masherov, 2011. – 22 p.
11. Gaidukov N. P. Application of the Hough transform for text recognition / N. P. Gaidukov, E. O. Savkova // Information and computer technologies. – 2012. – P. 136–140.
12. Shuvalov R. I. Development of a radiometric model of images of the Earth's surface formed from measurements of space radars with a synthesized antenna aperture / R. I. Shuvalov // Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. The series «Natural Sciences». – 2009. – No. 4. – P. 99–117.
13. Yasentsev D. A. Automatic detection of keel tracks of surface vessels on radar images / D. A. Yasentsev, S. I. Elizavetina // 19th International Conference «Aviation and Cosmonautics»: collection of abstracts of conference reports. – Moscow : Publishing House «Pero», 2020. – P. 362–363.

Dmitriy Aleksandrovich Yasentsev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department 410, t. +7 (926) 623-53-57, e-mail: yasentsev@yandex.ru.

(Federal State Educational Institution of Higher Education «Moscow Aviation Institute (National Research University))»).

Svetlana Igorevna Elizavetina, programmer, t. +7 (916) 931-97-07, e-mail: elizavetinas@yandex.ru. (JSC «Rakurs»).

Maksim Sergeevich Vinogradov, assistant of the Department 410, t. +7 (915) 061-13-05, e-mail: vinogradovMS@yandex.ru.

(Federal State Educational Institution of Higher Education «Moscow Aviation Institute (National Research University))»).