

# Возможности спутниковой радиолокации для решения задачи обнаружения судов

О.Ю. Лаврова, М.И. Митягина, С.С. Щербак

*Институт космических исследований РАН  
117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32  
E-mail: [olavrova@iki.rssi.ru](mailto:olavrova@iki.rssi.ru)*

На основе данных дистанционного зондирования, полученных с помощью радиолокаторов с синтезированной апертурой, установленных на европейских спутниках ERS-1/2 и Envisat, проведено исследование возможностей уверенного выявления судов на радиолокационных изображениях морской поверхности. В результате анализа полученного материала были выявлены зависимости проявления крупно- и среднетоннажных судов от ряда факторов (параметры съемки, состояние морской поверхности, метеосостояния и пр.).

Современные средства и методы дистанционного зондирования очень перспективны для решения задачи оперативного обнаружения судов из космоса. Данные о точном местоположении судов востребованы в сфере рыболовного промысла, морского транспорта, мониторинга загрязнений морской среды. Они, в частности, позволяют выявить виновников нефтяных загрязнений. Задаче обнаружения судов из космоса посвящено достаточно большое количество работ, в которых рассматриваются различные аспекты применения оптических и радиолокационных спутниковых данных, обсуждаются их преимущества и недостатки [1, 2, 3]. В зарубежной практике наиболее эффективным для решения этой задачи принято считать использование радиолокационных данных спутника RADARSAT Канадского космического агентства (ККА), позволяющих получать изображения с пространственным разрешением от 8 до 100 м и с шириной кадра от 50 до 500 км соответственно. Поскольку ККА предоставляет свои продукты только на коммерческой основе, то их достаточно сложно использовать для научных целей. В данной работе представлены предварительные результаты многолетних наблюдений, проводимых Лабораторией аэрокосмической радиолокации ИКИ РАН с помощью радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) спутников ERS-2 и Envisat Европейского космического агентства (ЕКА) с 1999 г по настоящее время. Тестовым полигоном является якорная стоянка в районе м. Дооб (Черное море, г. Новороссийск). На якорной стоянке зачастую находится до 20 судов одновременно (рис. 1), при этом основную часть судов составляют нефтяные танкеры и сухогрузы, длина которых превышает 100 м (рис. 2). Следует отметить, что в большинстве случаев суда указанного масштаба достаточно отчетливо проявляются на радиолокационных изображениях (РЛИ) в виде ярких белых точек, так как интенсивность отраженного от них сигнала в несколько раз превосходит интенсивность фонового сигнала (рис. 3). Однако в отдельных случаях корабли, даже больших размеров, или вообще не детектируются на РЛИ, или трудно различимы. Поскольку в перспективе задача обнаружения судов из космоса должна будет решаться в автоматическом режиме, крайне важно выявить механизм формирования радиолокационных образов кораблей и указать основные параметры, влияющие на него. Проведен сравнительный анализ характера проявления судов различных размеров в зависимости от режима съемки и метеосостояния в районе интереса на момент получения изображения. Основные гидрометеорологические параметры восстанавливались на основе данных метеостанций г. Геленджика и г. Новороссийска, а также по измерениям *in situ*.

Факторы, влияющие на проявление на РЛИ тех или иных явлений (или, в данном случае, объектов) можно подразделить, условно говоря, на «технические», т.е. обусловленные возможностями прибора, режимом его работы и пр., и «природные» – состояние морской поверхности, скорость и направление ветра и пр. Ниже будет рассмотрен относительный вклад каждого из этих факторов в формирование радиолокационных образов судов.

В наиболее общем виде среди «технических» факторов следовало бы выделить различие РСА, установленных на различных спутниках. Среди действующих это ASAR Envisat (Европейское космическое

агентство (ЕКА)), SAR ERS-2 (ЕКА) и SAR RADARSAT (ККА). Сравнительные характеристики РСА приведены в таблице 1.

Таблица 1. Краткие сведения о спутниковых радиолокаторах с синтезированной апертурой

Параметры	ERS-1/2	Envisat	RADARSAT
Высота орбиты	785 км	793-821 км	793-821 км
Наклонение орбиты	98,5 <sup>0</sup>	98 <sup>0</sup>	98,6 <sup>0</sup>
Частота зондирующего сигнала	5,3 ГГц	5,3 ГГц	5,3 ГГц
Длина волны зондирующего сигнала	5,6 см	5,6 см	5,6 см
Поляризация	ВВ	ВВ, ГГ, ВГ, ГВ	ГГ
Импульсная мощность передатчика	4,8 кВт	5 кВт	5 кВт
Длительность импульса	37 мкс (ЛЧМ)	37 мкс	42 мкс
Частота повторения импульса	1640-1720 Гц		1270-1390 Гц
Ширина полосы обзора	100 км	100-405 км	45-500 км
Отношение сигнал/шум	8 дБ		
Некогерентное накопление	3-кратное		1-,2-,4-,8-кратное
Разрешающая способность	25x25 м	25x25 м, 150x150 м	8x8 м, 30x30 м, 50x50 м, 100x100 м
Угол падения	20-26 <sup>0</sup>	15-45 <sup>0</sup>	10-60 <sup>0</sup>

Однако, учитывая, что все они принадлежат к С-диапазону, существенное различие между ними заключается лишь в различном наборе режимов, вследствие чего в выигрышном положении оказывается тот из приборов, у которого большее число различных функций (как, например, ASAR Envisat и SAR RADARSAT по сравнению с SAR ERS-2) (см. также [4]). Поэтому целесообразно перейти к рассмотрению РЛИ, полученных одним и тем же прибором, но в разных режимах и при разных природных условиях. В качестве такого «тестового» прибора выступил ASAR Envisat – во-первых, благодаря относительно большей доступности его изображений (с финансовой точки зрения) и, во-вторых, из-за возможности получения изображений с различным разрешением, наклоном луча зондирования и поляризациями. Рассмотрим влияние каждого из этих факторов.

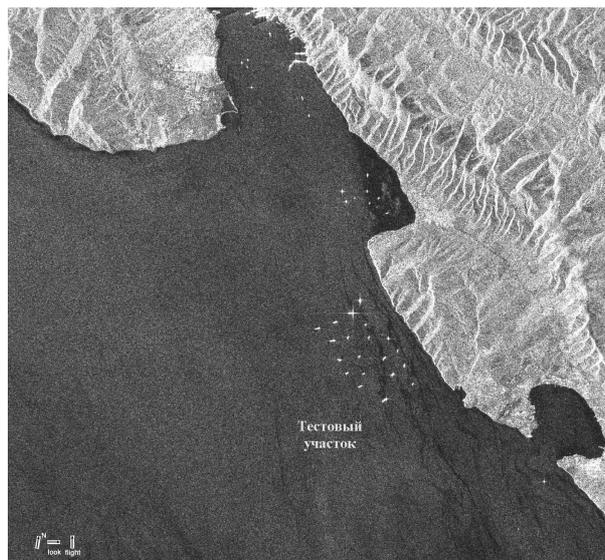


Рис. 1. «Тестовый участок» – якорная стоянка у м. Дооб. Фрагмент ASAR Envisat изображения, полученного 18.05.2006, 19:16 UTC



Рис. 2. Корабли на якорной стоянке у м. Дооб. Фотография с высокого берега

### Зависимость от параметров спутниковых радиолокаторов и геометрии съемки

Пространственное разрешение. В [1] показано, что для удовлетворительного распознавания судов разрешение РЛИ может превышать линейный размер судна не более чем в 2 раза. Поскольку в рассматриваемом случае речь идет о судах, размеры которых превышают 100 м, то для их детектирования возможно использование РЛИ, полученных в широкой полосе обзора: продукт ASAR Envisat Wide Swath с размером кадра 400x430 км, с пространственным разрешением в точке 75 м. Таким образом, разрешение применяемого изображения в данном случае решающего значения не имеет. Тем не менее, изображения, получаемые в узкой полосе обзора с пространственным разрешением в точке 12,5 м, предоставляют возможность варьировать тип поляризации, которая, в отличие от пространственного разрешения, может стать определяющим фактором.

Наклон луча зондирования. Мнения относительно влияния этого фактора противоречивы, но в целом можно заключить, что при близких к надиру углах зондирования, когда отражение близко к зеркальному, вероятность определения кораблей снижается из-за повышенной спекл-зашумленности изображения. В [5], например, показано, что максимальное различие сигнала от судов и от морской поверхности при всех типах поляризации наблюдается при углах порядка  $60^\circ$ . К сожалению, ныне действующие спутниковые SAR не работают при столь настильных углах. Применительно к ASAR Envisat, у которого есть возможность менять угол луча зондирования в пределах  $15-45^\circ$  и получать изображения в полосах I1-I7 (рис.3, табл. 2), это означает, что полоса с наименьшими углами (I1) наименее пригодна. В свою очередь, SAR ERS-2, у которого значение этого угла фиксированное ( $23^\circ$ ), соответствует полосе I2 ASAR Envisat, то есть его изображения приемлемы для решения рассматриваемых задач.

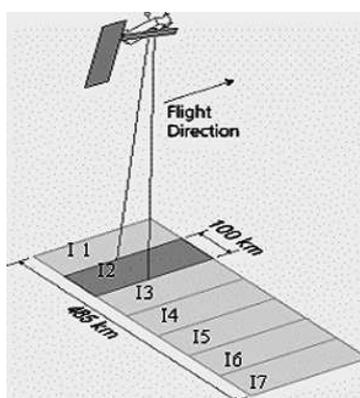
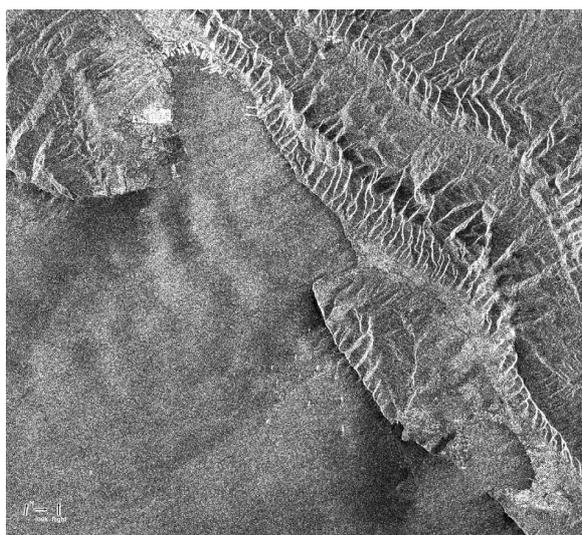


Рис. 3. Получение изображений с высоким пространственным разрешением в узкой полосе обзора ASAR Envisat

Таблица 2. Геометрические характеристики изображений с высоким разрешением

Номер полосы	Ширина полосы (км)	Расстояние от воображаемой наземной линии орбиты (км)	Диапазон углов наблюдения (градусы)
I1	105	187-292	15.0-22.9
I2	105	242-347	19.2-26.7
I3	82	337-419	26.0-31.4
I4	88	412-500	31.0-36.3
I5	64	490 -555	35.8-39.4
I6	70	550-620	39.1-42.8
I7	56	615-671	42.5-45.2

**Поляризация.** Роль поляризации в данном вопросе неоднозначна. Если РЛИ получено в благоприятных для обнаружения судов метеоусловиях (какие именно это условия, будет рассмотрено ниже), то поляризационные различия не имеют существенного значения. Однако, в условиях, при которых детектирование судов затруднено на РЛИ с существующими для Envisat Wide Swath, ERS-2 и RADARSAT типами поляризации (ВВ, ГГ для первого, ВВ для второго и ГГ для третьего локаторов), использование кросс-поляризации (ГВ, ВГ) позволяет справиться с этой задачей. На рис. 4а, 4б представлены изображения, полученные одновременно, но при разных поляризациях отраженного сигнала. РЛИ, приведенное на рис. 4а, получено при ВВ поляризации, на нем отчетливо выделяются поверхностные проявления атмосферных явлений, в частности, внутренние волны в атмосфере. Суда на их фоне выделить довольно сложно, особенно при автоматическом детектировании. РЛИ, представленное на рис. 4б, получено на ВГ поляризации; на нем полностью отсутствуют поверхностные проявления океанических и атмосферных процессов, зато отчетливо выделяются радиолокационные образы судов. Оценить возможности ГВ поляризации не удалось вследствие отсутствия данных.



а



б

Рис. 4. Фрагмент изображения Envisat ASAR от 27.08.2005, 19:13 UTC. а) ВВ-поляризация; б) ВГ-поляризация

### Влияние гидрометеорологических условий

Рассмотрим теперь, какое сочетание основных гидрометеорологических факторов является неблагоприятным и может препятствовать обнаружению судов на спутниковых РЛИ. Для ответа на этот вопрос РЛИ, полученные в период с 1999 по 2006 г., были проанализированы совместно с данными метеостанций Геленджика и Новороссийска и натурными подспутниковыми измерениями. Большая часть данных относится к летне-осеннему периоду, однако в 2006 году оказалось возможным получение всех данных ASAR Envisat в районе интереса (т.е. практически каждые 3 дня) начиная с апреля. Всего проанализировано порядка 60 изображений ASAR ENVISAT и 30 изображений SAR ERS. В 14 случаях детектирование судов было затруднено. Все эти случаи представлены в таблице 3; каждому случаю сопоставлены данные метеостанции Геленджика или Новороссийска.

Таблица 3. Метеоусловия, соответствующие времени получения «проблемных» для обнаружения судов на спутниковых РЛИ

Дата	Время	Ветер, м/с	Волнение	Т воздуха, °С	Т воды, °С
30.08.00	19:38	ЮВ, 6/13	Зв*, юз/ю, 1,4 м	21,4	24,4
06.06.01	08:18	ЮЮВ, 7/14	Зв, юв/юз, 3,0 м	16,2	17,2
06.06.01	19:37	ЮЗ, 10/17	Зв, юз/ю, 2,9 м	15,2	17,0
31.07.02	08:17	ЮЮВ, 2/6	Зв, юз/з, <0,25 м	29,0	27,8
20.08.03	19:36	СВВ, 8/14	Вв**, в, 0,3 м	26,6	25,0
09.09.05	07:46	СВВ, 8/18	Вв, в, 0,8 м	27,5	24,6
09.09.05	19:05	СВВ, 4/11	Зв, юз/ю, 0,3 м	25,2	22,8
26.04.06	19:07	З, 2	-	8,0	7,5
29.04.06	19:13	СВ, 10	-	13,0	11,0
02.05.06	19:19	СВ, 16	-	10,0	10,1
31.05.06	07:49	Штиль	-	28,0	18,0
19.06.06	07:52	Ю, 1	-	22,0	21,2
02.07.06	07:43	СВ, 17	-	24,0	22,5
05.07.06	19:07	СВ, 10	-	24,0	21,6

\* – зыбь ветровая, \*\* – ветровые волны

Как видно из таблицы, в большинстве случаев на момент получения радиолокационного изображения в районе интереса наблюдался сильный ветер, вызывающий многочисленные обрушения волн. Значительное усиление интенсивности сигнала, рассеянного на крутых обрушивающихся волнах, приводит к тому, что сечение обратного рассеяния морской поверхности оказывается сравнимо с рассеянием от судов. На рис. 5 приведен фрагмент РЛИ, полученного при скорости ветра до 14 м/с (атмосферные внутренние волны также указывают на северо-восточное направление ветра). На данном РЛИ не удастся выделить ни одного радиолокационного образа судна, в то время как подспутниковые наблюдения свидетельствуют о том, что на момент проведения радиолокационной съемки на тестовом участке находилось 9 кораблей с длиной более 100 м каждый.

Мы полагаем, что основным фактором, затрудняющим уверенное детектирование судов на РЛИ, является наличие в поле поверхностного волнения большого числа обрушений, обусловленных сильным приповерхностным ветром. Однако следует отметить и другие факторы.

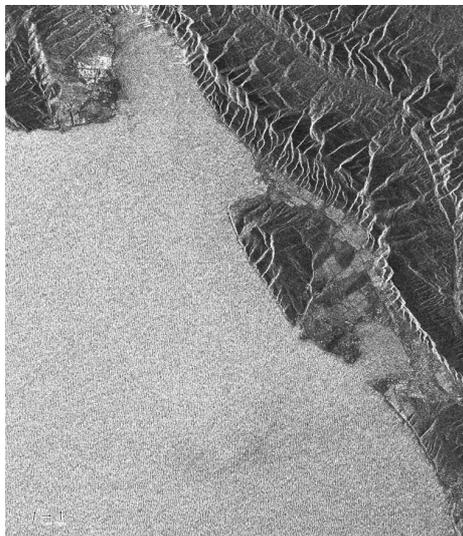
В приведенной выше таблице отражены три случая затрудненного выявления судов в условиях слабого приводного ветра (0-2 м/с). В двух случаях из трех (26.04.06 и 19.06.06) изображения получены в полосе П1, которая, как уже указывалось, неблагоприятна для решения данных задач. В одном из случаев, 26.04.2006,

обнаружение судов осложнено метеоситуацией – прохождением холодного атмосферного фронта, который отчетливо проявляется на РЛИ, а также при анализе метеоданных (ход температуры воздуха и атмосферного давления, характер выпадения осадков), но не отражается на скорости ветра.



*Рис. 5. Фрагмент изображения ERS-2 SAR от 20.08.2003, 19:36 UTC, полученного в условиях сильного ветра*

В качестве еще одного фактора, затрудняющего выявление судов, следует признать ветровые волны со значительной высотой волны. Однако, как правило, они вызываются сильным ветром и таким образом подпадают под уже упомянутый случай сильного ветра. Более редкий случай – волны зыби. Рис. 6 демонстрирует РЛИ, полученное при высоте волн порядка 3 м. Волны на РЛИ хорошо различимы, а вот проявления судов практически отсутствуют.



*Рис. 6. Фрагмент изображения ERS-2 SAR от 06.06.2001, 19:37 UTC, полученного в условиях сильного шторма*

Конвективные процессы в атмосфере, как правило, не являются препятствием для обнаружения больших судов. На рис. 7 представлено изображение с проявлением значительного количества разнообразных атмосферных и океанических явлений, тем не менее суда на тестовом участке достаточно хорошо различимы.

Таким образом, были выявлены основные факторы, затрудняющие детектирование судов на РЛИ (сильный ветер и волнение), а также указаны оптимальные параметры проведения радиолокационной

съемки (ASAR Envisat в узкой полосе обзора при углах наклона зондирующего луча более 20° с применением кросс-поляризации (HV или VH). Дальнейшим этапом исследований должно стать создание теоретической базы для объяснения выявленных закономерностей.



Рис. 7. Фрагмент изображения ERS-2 SAR от 08.09.2004, 19:36 UTC

Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства по рыболовству. Спутниковые радиолокационные данные предоставлены Европейским космическим агентством (ЕКА) в рамках проектов С1Р.1027, АО3.224 и Bear 2775.

#### Литература

1. *Greidanus H., Kourti N.* Findings of the DECLIMS project – detection and classification of marine traffic from space // Proceedings of SEASAR 2006, 23-26 January, Frascati, Italy, (ESA SP-613, April 2006)
2. *Hajduch G., Leilde P., and Kerbaol V.* Ship detection on Envisat ASAR data: results, limitations and perspectives // Proceedings of SEASAR 2006, 23-26 January, Frascati, Italy, (ESA SP-613, April 2006)
3. *Weigen Huang, Lu Yao; Jingsong Yang, Bin Fu, Qingmei Xiao, Peng Chen.* Optimal SAR parameters for ship detection // Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS'05. Proceedings. 2005 IEEE International Vol. 4, P. 2554 – 2555.
4. *Vachon, P.W., J.W.M. Campbell, C. Bjerkelund, F.W. Dobson, and M.T. Rey;* Validation of Ship Detection by the RADARSAT SAR // Proc. Pacific Ocean Remote Sensing Conference (PORSEC'96), 13-16 Aug. 1996, Victoria, Canada.
5. *Van der Sanden J.J., Ross S.G.* Applications Potential of RADARSAT-2 - a Preview // Canada Centre for Remote Sensing/Centre canadien de télédétection , p. 69, 2001.