

## Зависимость заявленного уровня шума данных радиолокатора на ИСЗ TerraSAR-X от версии препроцессора

Д. В. Ивонин, А. Ю. Иванов

*Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, 117218, Россия*

*E-mail: ivonin@ocean.ru*

В работе обращается внимание специалистов, работающих с данными радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) TerraSAR-X, на существующую проблему корректного определения уровня аппаратного шума (noise equivalent sigma zero, NESZ) в старых версиях препроцессора. Аппаратный уровень шума является критически важным параметром при применении поляризационных методов обработки радиолокационных данных в областях с пониженным уровнем рассеянного сигнала в море (нефтяные и биогенные плёнки, зоны ветровой тени, градиентные течения и др.). В зависимости от погодных условий, угла зондирования и наличия нефтяных плёнок на морской поверхности уровень рассеянного и принятого радаром сигнала может варьировать от  $-30$  до  $-10$  дБ. При этом уровень шума NESZ PCA TerraSAR-X меняется в пределах от  $-20$  до  $-28$  дБ. Таким образом, соотношение сигнал/шум NESZ для условий зондирования поверхности моря PCA TerraSAR-X может оказаться значительно ниже 0 дБ. Для этого необходимо проводить отбраковку сильно зашумленных данных, чтобы не получить на выходе результаты некорректной обработки. Было обнаружено, что в зависимости от времени подготовки данных и версии препроцессора TerraSAR-X существует сильный разброс (до 4 дБ) в оценках уровня NESZ, поставляемого в комплекте с радиолокационной информацией в формате xml. Этот факт был выявлен в ходе сопоставления данных, полученных в одно и то же время для одного и того же района океана, но взятых из различных баз. В настоящей работе анализируются выявленные нестыковки в идентичных, по сути, данных, а также возможные ошибки, которые могут возникать из-за указанных проблем с NESZ.

**Ключевые слова:** TerraSAR-X, уровень шума, морская поверхность, поляриметрические методы

Одобрена к печати: 13.02.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-45-50

### Введение

Использование поляриметрических радиолокационных (РЛ) данных радиолокаторов синтезированной апертуры (РСА) спутникового базирования находит всё большее применение при исследовании поверхности морей и океана (Migliaccio et al., 2015). Данный процесс стимулируется появлением новых РСА, установленных на спутниках Radarsat-2, TerraSAR-X, Cosmo-SkyMed, ALOS, RISAT-1, Sentinel-1 и др. Часть из них (Radarsat-2, ALOS) позволяют получать полную поляризационную матрицу рассеяния (ВВ, ГГ, ВГ, ГВ; В — вертикальная поляризация, Г — горизонтальная), ряд других (TerraSAR-X, Cosmo-SkyMed) — две соосных (ВВ и ГГ) или одну соосную и одну перекрёстную (ВВ и ВГ или ГГ и ГВ) поляризационные компоненты, спутник RISAT-1 — так называемую «компактную» моду поляриметрии, а Sentinel-1 — одну соосную и одну перекрёстную (ВВ и ВГ или ГГ и ГВ) поляризации. С помощью указанных наборов поляриметрических каналов проводится анализ подстилающей морской поверхности, при этом используются разные поляризационные параметры, такие как энтропия, анизотропия и др. (Skrunes et al., 2014), которые исторически применялись для анализа объектов на суше.

Особенностью исследования океанских явлений с помощью однопозиционных РСА при углах зондирования более  $20^\circ$  является относительно низкое сечение удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) морской поверхности. В зависимости от гидрометеорологических условий (ГМУ) на море, угла зондирования (падения радиолуча) и наличия разнообразных участков со слабыми рассеивающими свойствами (нефтяные и биогенные плёнки, штилевые полосы, зоны градиентных течений и др.) на поверхности моря уровень рассеянного

и принятого РСА сигнала может варьировать от  $-30$  до  $-10$  дБ для соосных поляризаций (ВВ и ГГ) и от  $-45$  до  $-30$  дБ — для перекрёстных (ВГ или ГВ). По этой причине при работе по морю большое влияние на окончательный результат начинает оказывать уровень теплового шума, или NESZ (noise equivalent sigma zero), конкретного радиолокатора. Для РСА на ИСЗ TerraSAR-X уровень теплового шума может меняться в пределах от  $-20$  до  $-28$  дБ (TerraSAR-X..., 2014), что часто становится сопоставимым с уровнем сигнала для соосных поляризаций (ВВ и ГГ), особенно в слаборассеивающих зонах (нефтяных сликах, областях гидродинамического затишья). Пренебрежение учётом влияния уровня шума на результаты поляриметрической обработки поляризационных данных может приводить к существенным ошибкам, на что справедливо обращается внимание в обзорной статье (Alpers et al., 2017). По этой причине исследователи проводят анализ сопоставления уровня исследуемого сигнала с уровнем шума (см., например, работу (Skrunes et al., 2015)).

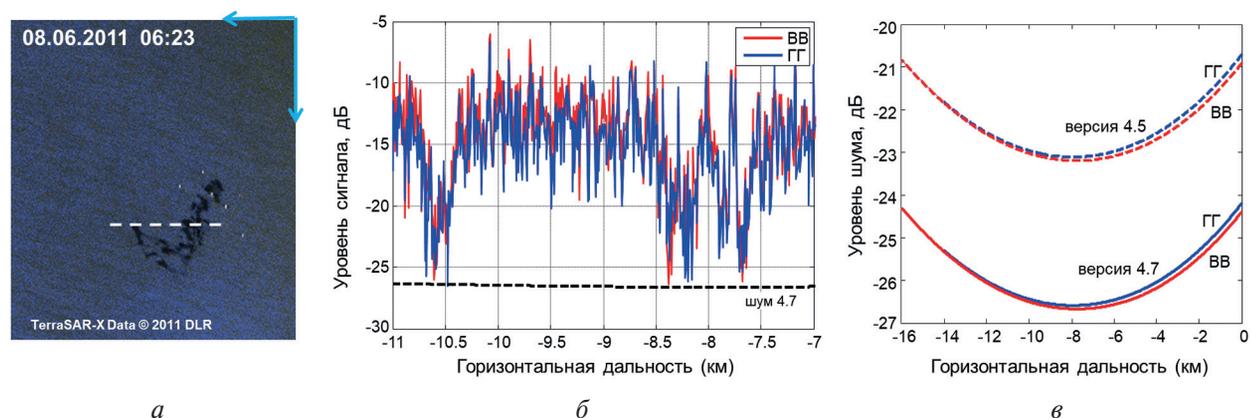
### Удаление теплового шума из радиолокационных данных

Наиболее корректным путём использования радиолокационного сигнала является его предварительная калибровка относительно уровня шума приёмника. Согласно спецификациям компании Airbus (TerraSAR-X..., 2014), для калибровки каждой из поляризационных компонент  $\sigma^V$  (вертикальная соосная) и  $\sigma^H$  (горизонтальная соосная) необходимо применять процедуру вычитания уровня шума  $\sigma_{NESZ}^V$ ,  $\sigma_{NESZ}^H$  (соответственно для вертикального и горизонтального каналов) из сигнала  $\sigma_{SAR}^V$  (или  $\sigma_{SAR}^H$ ), зарегистрированного РСА:

$$\left. \begin{aligned} \sigma^V &= \sigma_{SAR}^V - \sigma_{NESZ}^V, \\ \sigma^H &= \sigma_{SAR}^H - \sigma_{NESZ}^H. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь  $\sigma_{SAR}^V$  и  $\sigma_{SAR}^H$  — данные, поставляемые в виде файлов с расширением \*.cos и умноженные на калибровочный коэффициент в строке <calFactor> сопроводительного файла TSX1\_SAR\_\*.xml. Соответственно, уровни шума  $\sigma_{NESZ}^V$  и  $\sigma_{NESZ}^H$  приводятся в разделе <noise layerIndex="1"> файла TSX1\_SAR\_\*.xml.

На *рис. 1а* приведён пример радиолокационного изображения (РЛИ) TerraSAR-X с экспериментальным разливом нефтяной эмульсии в Северном море от 08.06.2011 (06:23 UTC).



*Рис. 1.* Фрагмент РЛИ РСА TerraSAR-X с разливом нефтяной эмульсии в Северном море 08.06.2011 (06:23 UTC) (а), стрелки обозначают: вертикальная — направление полёта, горизонтальная — направление обзора; б — уровни сигналов  $\sigma^V$  и  $\sigma^H$  на чистой воде и в плёнке эмульсии для сечения, показанного горизонтальной пунктирной белой линией на *рис. 1а*, внизу чёрной пунктирной линией показан уровень шума  $\sigma_{NESZ}^H$  (горизонтальная дальность дана в отрицательных единицах, так как радар находится справа от снимка); в — уровни шума  $\sigma_{NESZ}^V$  и  $\sigma_{NESZ}^H$  вдоль поперечного сечения всего РЛИ (см. *рис. 1а*) согласно данным TSX1\_SAR\_\*.xml для версии препроцессора 4.5 от 2011 г. и версии 4.7 от 2013 г.

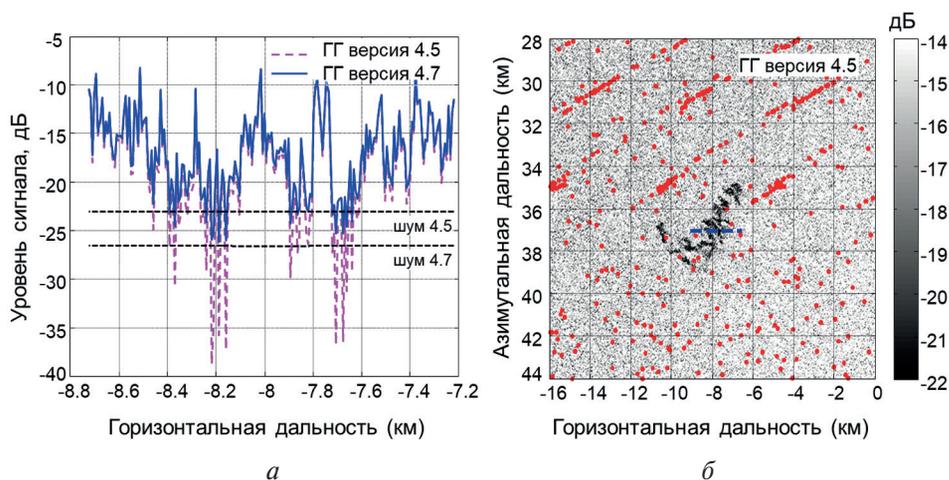
Подробное описание эксперимента, ГМУ и данные о РЛИ приведены в работах (Ивонин, Иванов, 2017; Skrunes et al., 2015). На *рис. 1б* показано поведение сигналов  $\sigma^V$  и  $\sigma^H$  на чистой воде и в плёнке эмульсии ( $\sigma^V$  и  $\sigma^H$  уже предварительно очищены от шума согласно (1), также для уменьшения «биений» сигналы усреднены по четырём точкам вдоль направления азимута и по четырём — вдоль дальности). Видно, что, хотя в области чистой воды уровень сигналов составляет около  $-13$  дБ, в зоне подавления сигналов плёнкой эмульсии они достигают уровня шума около  $-25$  дБ. Сами уровни шума  $\sigma_{NESZ}^V$  и  $\sigma_{NESZ}^H$  PCA TerraSAR-X несколько отличаются (примерно на  $0,2$  дБ) для разных каналов, что показано на *рис. 1в*.

### Зависимость уровня теплового шума от версии препроцессора

Из *рис. 1б* следует, что сигнал подавляется в плёнке на  $12$  дБ, что в совокупности с другими данными свидетельствует как о толщине плёнки, так и об её происхождении (Кудрявцев и др., 2008). При этом необходимо отметить, что, поскольку в минимуме  $\sigma^V$  и  $\sigma^H$  близки к уровням шума  $\sigma_{NESZ}^V$  и  $\sigma_{NESZ}^H$ , сама величина уровня шума может оказывать достаточно сильное влияние на корректное определение минимума  $\sigma^V$  и  $\sigma^H$  и, соответственно, на величину контраста сигнала в плёнке и последующие выводы о её характеристиках.

Уровень шума РЛ-данных относится к проблеме корректной калибровки конкретного РСА. Качество РЛ-данных во многом определяется качеством такой калибровки. По этой причине операторы спутников с РСА проводят как предварительную калибровку радиолокаторов перед началом распространения РЛ-данных, так и постоянный мониторинг и корректировку калибровочных параметров. Все эти изменения учитываются в обновлённых версиях препроцессора РЛ-данных. В результате может сложиться ситуация, когда идентичные РЛИ имеют различные калибровочные параметры в зависимости от времени их получения конечным пользователем (от этого зависит версия использованного текущего препроцессора и соответствующих калибровочных параметров).

Авторы настоящей статьи столкнулись с этой проблемой в процессе обобщения результатов работы (Ивонин, Иванов, 2017), посвящённой поляризационной обработке РСА-данных TerraSAR-X для различных типов снимков на поверхности моря (нефтяных, биогенных и т. д.). Случайным образом для примера, показанного на *рис. 1*, были получены две разные версии одного РЛИ: первая — в 2011 г., вторая — в 2013 г. Это привело авторов к поиску объяснений такого расхождения, а затем к переписке с представителями Airbus Defence & Space с просьбой прояснить причины различия в фактически идентичных данных. В ответе представителей компании указывалось, что причина кроется в версии использованного препроцессора.



*Рис. 2.* Сравнение сигнала соосной ГГ-поляризации версий 4.5 и 4.7 вдоль разреза по горизонтальной дальности (а) (обозначен синей пунктирной линией на *рис. 2б*); фрагмент сигнала ГГ-поляризации версии 4.5, красными точками показаны отрицательные значения (б)

На *рис. 1в* показано сопоставление уровней NESZ для РЛИ TerraSAR-X от 08.06.2011 (06:23 UTC) (см. *рис. 1а*) для версии препроцессора 4.5 от 2011 г. и версии 4.7 от 2013 г. Данные о версии препроцессора находятся в строке <generationSystem version ...> в сопроводительном файле TSX1\_SAR\_\*.xml. Соответственно, данные о времени генерации РЛИ размещены в строке <generationTime> (2011-06-10T08:55:59.000000 для 2011 г. и 2013-02-25T07:48:42.000000 для 2013 г.). На *рис. 1в* видно, что различие в уровне шума составляет около 3,5 дБ (около –26 дБ для 2013 г. и около –23 дБ для 2011 г.).

Закономерным образом калибровка каналов  $\sigma^V$  и  $\sigma^H$  (согласно (1)) по значениям  $\sigma_{NESZ}^V$  и  $\sigma_{NESZ}^H$ , которые отличаются на 3,5 дБ в зависимости от года выпуска, приводит к существенно различающимся результатам по контрасту этих каналов в слике эмульсии (*рис. 2а*, см. с. 47). При использовании  $\sigma_{NESZ}^V$  и  $\sigma_{NESZ}^H$  версии 4.5 контраст  $\sigma^V$  и  $\sigma^H$  возрастает до 25 дБ (вместо 12 дБ для версии 4.7), что будет приводить к ошибочным результатам как при поляризационной, так и при обычной обработке РЛИ.

Кроме того, в результате изменения уровня шума на 3,5 дБ в процессе калибровки (1) могут возникать области с отрицательными отклонениями УЭПР в местах крайне слабого радиолокационного сигнала. На *рис. 2б* точками отмечены такие участки, причём видно, что их образуется достаточно большое количество.

## Выводы

В данной работе обращается внимание исследователей и пользователей спутниковой радиолокационной информации на важность корректной калибровки РЛ-данных по тепловому шуму приёмника РСА, особенно в условиях зондирования морской поверхности, когда уровень сигнала от поверхности может приближаться к уровню шума приёмника. Приводится пример калибровки по шуму идентичных по происхождению, но различных по версии препроцессора данных TerraSAR-X, которые были получены на район с экспериментальными разливами нефтяной эмульсии в Северном море в 2011 г. Продемонстрировано, что в зависимости от версии препроцессора (в конкретном примере версии 4.5 и 4.7), использованного в момент поставки данных потребителю (т.е. в 2011 и 2013 гг.), существует разница в оценке теплового шума, достигающая 3,5 дБ. Поставщик РЛИ TerraSAR-X наличие данной проблемы признал и указал, что, начиная с версии 4.6, они изменили калибровки шума. Предлагается пользоваться самой последней версией продукта (на 2017 г. это версия 4.10), в которой приведены наиболее актуальные параметры калибровки РЛИ, и при необходимости заказать бесплатный репроцессинг данных, сгенерированных на устаревшей версии препроцессора.

В работе приводится пример влияния изменения теплового шума на 3 дБ (с уровня –26 дБ для РЛИ версии 4.7 до уровня –23 дБ для версии 4.5) на оценку величины контраста РЛ-данных, полученных в соосных поляризационных каналах (ВВ и ГГ) для случая разлива нефтяной эмульсии. Показано, что контраст «чистая вода – эмульсия» изменяется с –12 до –25 дБ, что, соответственно, может приводить к различным оценкам как толщины плёнки, так и её типа (нефтяная или не нефтяная), полученным по результатам поляризационной обработки с применением современных поляризационных методов. Кроме того, продемонстрировано, что возможно ошибочное обнаружение областей с отрицательными выбросами УЭПР (контрастами) в случае проведения некорректной калибровки по шуму.

Авторы настоящей работы полагают, что пользователям спутниковых радиолокационных данных необходимо учитывать выявленный эффект как при сопоставлении спутниковой информации, обработанной различными версиями препроцессора, так и при анализе выводов, сделанных с использованием ранних версий препроцессора радиолокационных данных.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-55-20010). Данные TerraSAR-X были предоставлены Немецким аэрокосмическим агентством (DLR) в рамках проекта SOA-1538.

## Литература

1. Ивонин Д. В., Иванов А. Ю. О классификации пленочных загрязнений моря на основе обработки поляризационных радиолокационных данных спутника TerraSAR-X // *Океанология*. 2017. Т. 57. № 5. С. 815–829.
2. Кудрявцев В. Н., Иванова Н. А., Гущин Л., Ермаков С. А. Оценка контрастов спектра ветровых волн в сликах, вызванных биогенными и нефтяными пленками: Препринт № 765. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2008. 34 с.
3. Alpers W., Holt B., Zeng K. Oil spill detection by imaging radars: Challenges and pitfalls // *Remote Sensing of Environment*. 2017. V. 201. P. 133–147.
4. Migliaccio M., Nunziata F., Buono A. SAR polarimetry for sea oil slick observation // *Intern. J. Remote Sensing*. 2015. V. 36. No. 12. P. 3243–3273.
5. Skrunes S., Brekke C., Eltoft T. Characterization of marine surface slicks by Radarsat-2 multipolarization features // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2014. V. 52. No. 9. P. 5302–5319.
6. Skrunes S., Brekke C., Eltoft T., Kudryavtsev V. Comparing near coincident C- and X-band SAR acquisitions of marine oil spills // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2015. V. 53. No. 4. P. 1958–1975.
7. TerraSAR-X Image Product Guide. Basic and Enhanced Radar Satellite Imagery. Iss. 2.0. Airbus Defence and Space, 2014. 24 p.

## Dependence of the noise level estimates supplied with TerraSAR-X data on the used preprocessor version

D. V. Ivonin, A. Yu. Ivanov

*P. P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117218, Russia*  
*E-mail: ivonin@ocean.ru*

The paper draws the attention of specialists dealing with TerraSAR-X synthetic aperture radar data to a problem of correct calculation of the instrument noise floor (the noise equivalent sigma zero, NESZ) in older versions of the data. The NESZ is a critical parameter when using polarization methods of processing radar data in areas with a reduced level of scattered signal at sea (oil and biogenic films, wind shadow and gradient flow zones, etc). Depending on weather conditions, incidence angle and presence of oil films on the sea surface, the level of the backscattered signal to the radar can vary from –30 to –10 dB. The level of NESZ for the TerraSAR-X can vary from –20 to –28 dB. Thus, the NESZ signal-to-noise ratio for the TerraSAR-X sensing conditions may be significantly lower than 0 dB, for which it is necessary to reject highly noisy data in order not to get the results of incorrect processing at the output. However, as it was discovered that, depending on the processing time and version of the preprocessor, there is a strong variation of up to 4 dB in the NESZ level estimates supplied with the radar data in xml format. This fact was revealed in the course of comparing data obtained at the same time for the same ocean area, but taken from different databases. This paper analyzes the identified inconsistencies in identical data; as well as errors in TerraSAR-X polarization data processing that were obtained earlier due to these problems with NESZ.

**Keywords:** TerraSAR-X, noise level, NESZ, sea surface, polarimetric methods

Accepted: 13.02.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-45-50

## References

1. Ivonin D. V., Ivanov A. Y., On classification of sea surface oil films using TerraSAR-X satellite polarization data, *Oceanology*, Vol. 57, No. 5, pp. 738–750.
2. Kudryavtsev V. N., Ivanova N. A., Gushchin L., Ermakov S. A., *Otsenka kontrastov spektra vetrovykh voln v slikakh, vyzvannykh biogennymi i neftyanymi plenkami: Preprint No. 765* (Evaluation of the contrasts of the

- spectrum of wind waves in slicks caused by biogenic and oil films: Preprint No. 765), Nizhny Novgorod: IPF RAN, 2008, 34 p.
3. Alpers W., Holt B., Zeng K., Oil spill detection by imaging radars: Challenges and pitfalls, *Remote Sensing of Environment*, 2017, Vol. 201, pp. 133–147.
  4. Migliaccio M., Nunziata F., Buono A., SAR polarimetry for sea oil slick observation, *Intern. J. Remote Sensing*, 2015, Vol. 36, No. 12, pp. 3243–3273.
  5. Skrunes S., Brekke C., Eltoft T., Characterization of marine surface slicks by Radarsat-2 multipolarization features, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2014, Vol. 52, No. 9, pp. 5302–5319.
  6. Skrunes S., Brekke C., Eltoft T., Kudryavtsev V., Comparing near coincident C- and X-band SAR acquisitions of marine oil spills, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2015, Vol. 53, No. 4, pp. 1958–1975.
  7. *TerraSAR-X Image Product Guide. Basic and Enhanced Radar Satellite Imagery*, Issue 2.0, Airbus Defence and Space, 2014, 24 p.