А.В. Евтюшкин, В.М. Брыксин, А.Е. Данилова, А.В. Филатов

СЕГМЕНТАЦИЯ МНОГОВРЕМЕННЫХ РАДАРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗЕМНЫХ ПОКРОВОВ

Рассматриваются возможности применения алгоритмов сегментации и классификации спутниковых радарных изображений без удаления спекл-шума для выделения однородных областей. Алгоритм сегментации Merge Using Moments оптимален для выделения видового состава лесов на многовременных радарных данных за несколько вегетационных периодов в развитии лиственных, хвойных и смешанных лесов. Для выделения водных объектов достаточно использования радарных данных одного года.

Possibilities of application segmentation algorithms and classification of satellite radar images without deleting a speckle noise for separation of connected areas are considered. The segmentation algorithm Merge Using Moments is optimum for separation of specific composition of forest on multitemporal radar data for some vegetative periods in development of the deciduous, coniferous and mixed forest. For exact separation of water objects use of radar data of one year suffices.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, радар, спекл-шум, сегментация изображений, лесные покровы, водная поверхность.

Key words: remote sensing of Earth, SAR, speckle noise, image segmentation, forest cover, water surface.



Изображения высокого разрешения, сформированные радарами с синтезированной апертурой (PCA) в результате облучения поверхности Земли когерентными волнами, обычно разрушены мультипликативным шумом, известным как спекл-шум. Этот вид шума возникает вследствие интерференционного взаимодействия зондирующих импульсов, отраженных земной поверхностью. Радарный сигнал оценивается по величине отношения сигнал/шум и для большинства орбитальных сенсоров характеризуется высоким амплитудным значением. Спекл-шум представляет серьезную проблему при классификации радарных изображений методами, разработанными для оптических изображений.

Обработка РСА изображений цифровыми фильтрами, реализованными в распространенном программном обеспечении для ГИС и ДЗЗ Erdas Imagine и ENVI, выполняется недостаточно корректно. Вместе с подавлением шума на однородных объектах на изображении происходит сглаживание (размывание) их контуров. Для радарных изображений, полученных в диапазонах X, S, C и L, подбирается свой цифровой фильтр и размер бегущего окна. Используются усредняющие, медианные или частотные фильтры на основе преобразований Фурье. Развитие алгоритмов сегментации и классификации также вылилось в создание отдельных научных пакетов [1-2] с числом настраиваемых параметров от 2 до 6, что позволяет адаптировать их для различных поляризаций, разрешений, длин волн РСА.

Оригинальность математической модели, реализованной в пакете CAESAR, состоит в том, что спекл-шум не удаляется при обработке изображения, а наоборот, выявляется вся полезная информация из шумящего сигнала [3-6]. Большинство однородных природных наземных площадных объектов создают уникальный спектр обратного рассеяния при наклонном радарном зондировании и, соответственно, свой спекл-шум. Этот факт относится и к доминирующим породам деревьев в лесных массивах.

Для выделения различных видов ландшафтов на РЛИ использовался алгоритм сегментации MUM (Merge Using Moments), основанный на последующем объединении областей, имеющих постоянную интенсивность и текстуру [3]. Процесс сегментации построен на предположении, что статистически однородные области на изображении суть шумовая реализация подобных однородных областей на поверхности Земли.

Процесс сегментации включает ряд процедур в разделение и слияние области на основе того, что определено как «различные области» (чтобы быть разделенным) или «та же область» (чтобы быть объединенным). Подход сегментации в основном используется для изображений с высоким спекл-шумом на SAR. Этот тип сегментации следует за «мультипликационной моделью», которая является разложением изображения в набор областей, на каждом из которых интенсивность постоянная. Средние значения области тогда применены в «мультфильме» сегментов.

Для того чтобы начать объединение статистически однородных областей, необходимо провести грубую сегментацию. На начальном этапе каждый пиксел изображения рассматривается как отдельная область и дисперсии не оценивается. Сегментированное таким образом изображение имеет такое же разрешение, как и исходное. Далее проверя-

ется гипотеза принадлежности соседних областей к одному и тому же природному объекту. При этом интенсивность радиолокационного изображения описывается гамма-распределением:

$$P(I) = \frac{L^{L}}{\Gamma(L)\mu^{L}} I^{L-1} \exp\left(-\frac{LI}{\mu}\right),$$

где L — величина, зависящая от параметров восстановления пикселов амплитудного изображения из отраженного сигнала (look, или, как принято для спутниковых радаров, number of look); $\Gamma(L)$ — гамма-функция от параметра L; μ — среднее значение интенсивности в области:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i = \overline{I}$$
. Логарифм вероятности создания двух различных обла-

стей из одной общей области:

$$\lambda_{split} = L'(-N_A \ln(\overline{I}_A) - N_B \ln(\overline{I}_B) - N_A - N_B),$$

где L' — оценка параметра L.

Аналогично, логарифм вероятности объединения двух разных областей в одну общую область:

$$\lambda_{merge} = L' \left(-(N_A + N_B) \ln \left(\frac{\overline{I}_A + \overline{I}_B}{2} \right) - N_A - N_B \right).$$

Логарифм вероятности разности $\lambda_{D} = \lambda_{\textit{split}} - \lambda_{\textit{merge}}$ рассчитывается как

$$\lambda_D = L' \left(-N_A \ln(\overline{I}_A) - N_B \ln(\overline{I}_B) + (N_A + N_B) \ln\left(\frac{\overline{I}_A + \overline{I}_B}{2}\right) \right).$$

Чем больше величина λ_D , тем больше вероятность, что области относятся к разным природным объектам. Для объединения двух областей необходимо установить порог чувствительности λ_D . Значение порога чувствительности алгоритма получают аналитически в зависимости от размера областей, величины L и вероятности ложной тревоги P_{fa} .

Низкая вероятность P_{fi} вызывает высокий порог чувствительности и, следовательно, большее количество объединенных областей.

Для работы алгоритма сегментации MUM также необходимо произвести оценку параметра L. Эта величина может вводиться пользователем, в противном случае по умолчанию алгоритм оценивает ее как среднее из малых окрестностей всех пикселей изображения. Изменения L вызывают эквивалентные изменения вероятности P_{fa} . Объединение двух областей на изображении происходит, если величина λ_{D} меньше, чем установленный порог чувствительности.

После слияния областей изменяется статистика вновь образованной области, и, следовательно, в программе сегментации рассчитывается новая оценка вероятности объединения новой области и любой из соседних. Наиболее эффективный механизм слияния областей, найденный до настоящего времени, получен из простой аналогии с поверхностной напряженностью в расплавах металлов — энергия передается к каждой длине модуля общей границы. Применительно к РСА [3], а так-

127



же и оптическим снимкам [7], большая длина границы между парой областей является более вероятной, и как критерий слияния используются отношения длин общих границ к площадям областей.

Хорошая сегментация природных объектов достигается при малом уровне шума на изображении (L < 16). Однако если изображение разрушено очень интенсивным спекл-шумом, то объединенные области будут иметь длинные извилистые границы, иногда повторяющие форму каждого пикселя. Для устранения этого дефекта в алгоритме МИМ предусмотрена функция сглаживания. Данный алгоритм можно использовать при обработке как одиночных, так и многовременных изображений (Multi Time MUM) [3-6].

К проблеме распознавания видового состава лесов постоянно обращаются в связи с совершенствованием авиационных и запуском новых спутниковых PCA [8—9]. В первую очередь это связано с тем, что разработанные сегодня алгоритмы не в состоянии справиться с спекл-шумом, которым разрушены PCA изображения.

На рисунке 1, a представлены результаты сегментации в пакете CAESAR совмещенных с точностью до пиксела 7 разновременных кадров JERS-1 за 1992—1997 гг. Однородные участки соответствуют различному видовому составу хвойного и лиственного леса в правобережном Приобском бору в Алтайском крае. Для иллюстрации спекл-шума на амплитудном радарном изображении с длиной волны L (23 см) на рисунке 1, δ приведены исходные интенсивности и значения, соответствующие выходным сегментированным классам вдоль профиля A-B за одну из дат в наборе из 7 кадров, участвующих в обработке. CAESAR был предоставлен авторам компанией NASoftware при отработке технологий ДЗЗ на подспутниковом полигоне для модуля «Природа» орбитальной станции «Мир» и миссий SIR-C\X-SAR [10—11].

На рисунке 2 представлен RGB композит (в шкале серого) из летних витков ERS-2\SAR, и результат сегментации на 11 классов в пакете ENVI по алгоритму Feature Extraction. Исходные кадры пересчитаны для уменьшения спекл-шума на разрешение 50 м по алгоритму Aggregate, что также позволило провести их геопривязку только по орбитальным данным. Использовались снимки за один период вегетации — от максимального развития до полного опадания листвы и установления снежного покрова и маскирования мелкой растительности — с датами съемки 08.07.06, 12.08.06, 21.10.06, 30.12.06. Сравнение с оптическими снимками Lanlsat-5 на эту территорию показало, что классы, занимающие основную площадь кадра, соответствуют хвойному и лиственному лесу, водной поверхности озер, торфяным болотам, травянистокустарниковой пойме р. Обь шириной 25 км, примыкающей к возвышенности Белогорский Материк в ХМАО. Наибольшую точность распознавания имеют водные объекты.

Анализ временного тренда за 2006 г., представленный в обратном порядке на рисунке 3, показывает, что наибольшее расхождение в средних значениях интенсивности и дисперсии отраженного радарного сигнала ERS-2 между хвойным и лиственным лесом наблюдается на снимке за 08.07.2006.



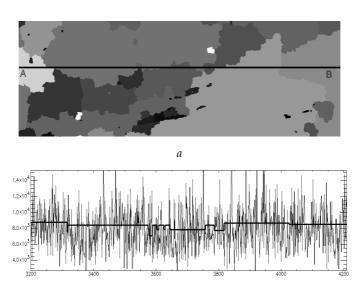
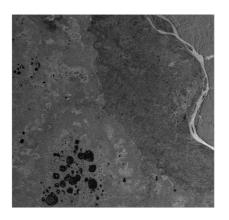


Рис. 1. Классы, полученные алгоритмом MT_MUM по 7 кадрам JERS-1 (a) и интенсивности по профилю A — В за 03.06.1997 до и после сегментации (δ)

б



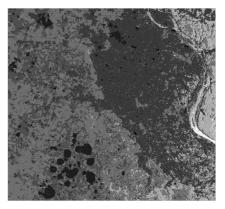


Рис. 2. Композит из витков ERS-2 и результат сегментации на 11 классов

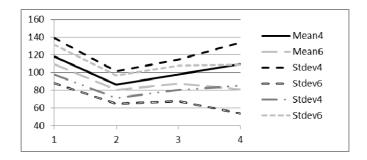


Рис. 3. Временной тренд средних значений и стандартных отклонений для классов 4 (лес лиственный) и 6 (лес хвойный)



Это указывает на необходимость обязательного использования радарных данных в летний период. В период максимальной фенофазы развития зеленой листвы у лиственных пород деревьев, кустарников и луговых трав уменьшается обратное радарное рассеяние от лиственной растительности. Точность разделения видового состава смешанных лесов на классы также увеличивается при использовании данных летних съемок. Для данных оптических съемок в этот период, соответствующий максимуму накопления хлорофилла, наоборот, уменьшается точность распознавания видового состава лесов, агрокультур на пропашных полях.

Алгоритмы сегментации протестированы для выделения породного состава лесов, разделения на лиственные и хвойные породы на одиночных и многовременных оптических снимках Pecypc-Ф1M, Landsat и PCA AЛMA3-1, SIR-C, JERS-1, ERS-2, ALOS-1, TerraSar-X за 1991 – 2014 гг. Визуальное дешифрирование лесов также проводилось во время полевых и вертолетных обследований на Алтае и XMAO-Югре [12].

Унифицированные алгоритмы автоматической обработки оптических спутниковых данных на основе спектральных индексов или иерархической классификации в итоге задействованы в создании систем мониторинга агроресурсов, пожаров, наводнений и ряда других задач, где экономически выгодно использовать только открытые данные. Как наиболее развитые по применению данных ДЗЗ в управленческих решениях можно выделить сервисы планетарного охвата Crop Explorer (www.pecad.fas.usda.gov/cropexplorer/), национального ВЕГА (pro-vega.ru) [13] и регионального (maps.krasnodar.ru). Использование радарных данных в системах мониторинга ограничивается контролем наводнений [14], судоходства и нефтеразливов в прибрежной зоне и в случае аварий добывающих платформ или танкеров. Запуск в 2014-15 гг. всепогодных PCA SENTINEL-1A\В с периодом обзора 6 суток и открытым доступом повысит возможности и точности систем мониторинга земных покровов и для потоковой обработки данных перспективно использовать алгоритмы сегментации.

Спутниковые данные JERS-1 и ALOS-1\PALSAR переданы NASDA\JAXA по грантам J-2RI-026, RA1 PI-405, RA2 PI-563, RA4 PI-1070. Данные TerraSAR-X оперативно предоставляются DLR по гранту GEO1978 «Complex study of persistent scatterer technique for subsidence monitoring in geodynamic risk areas on conditions of landscapes seasonal changes».

Работа выполнена при поддержке РФФИ по гранту 13-07-00419.

Список литературы

- 1. Meinel G., Neubert M. A comparison of segmentation programs for high resolution remote sensing data // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2004. Vol. 35(B4). P. 1097 1102.
- 2. *Neubert M., Herold H., Meinel G.* Evaluation of remote sensing image segmentation quality-Further results and concepts // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2006. Vol. 36(C42).
- 3. Cook R., McConnell I., Stewart D. MUM (Merge Using Moments) Segmentation for SAR images // Proceedings of SPIE. 1994. Vol. 2316. doi: 10.1117/12.197529.
- 4. Oliver C. J., Blacknell D., White R. G. Optimum edge detection in SAR // IEE Proceedings: Radar, Sonar and Navigation. 1996. Is. 143(1). P. 31 40.



- 5. Cook R., McConnell I., Stewart D. et al. Segmentation and simulated annealing // Proceedings of SPIE. 1996. Vol. 2958. P. 30 35.
- 6. Stewart D., Blacknell D., Blake A. et al. Optimal approach to SAR image segmentation and classification // IEE Proceedings. Radar, Sonar and Navigation. 2000. Vol. 147(3). P. 134–142.
- 7. Widayati A., Verbist B., Meijerink A. Application of combined pixel-based and spatial-based approaches for improved mixed vegetation classification using IKONOS // Proc. 23th Asian Conf. Remote Sens. 2002. P. 1–8.
- 8. Чимитдоржиев Т. Н., Архинчеев В. Е., Дмитриев А. В. Поляриметрическая оценка пространственных флуктуаций радарных изображений для восстановления структуры лесного полога // Исследование Земли из космоса. 2007. № 5. С. 80-82.
- 9. *Dabboor M., Karathanassi V., Braun A.* A multi-level segmentation methodology for dual-polarized SAR data // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2011. Vol. 13(3). P. 376—385.
- 10. Евтюшкин А. В., Байкалова Т. В., Миронов В. Л. и др. Определение биометрических характеристик лесных массивов по многовременным радиолокационным изображениям с использованием алгоритмов сегментации // География и природопользование Сибири. 2002. Вып. 5. С. 110—118.
- 11. Komarov S. A., Lukyanenko D. N., Yevtyushkin A. V. Use textural features for decoding of forest regions by SAR images // Proceedings of SPIE. 1999. Vol. 3983. P. 200-205. doi:10.1117/12.370493.
- 12. Bryksin V. M., Filatov A. V., Yevtyushkin A. V. Using of SAR data and DInSar-PSInSar technique for monitoring Western Siberia and Arctic // Журнал радиоэлектроники. 2012. № 6. С. 1-53.
- 13. Барталев С. А., Ершов Д. В., Лупян Е. А. и др. Возможности использования спутникового сервиса ВЕГА для решения различных задач мониторинга наземных экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 1. С. 49-56.
- 14. *Pulvirenti L., Chini M., Pierdicca N. et al.* Flood monitoring using multi-temporal COSMO-SkyMed data: Image segmentation and signature interpretation // Remote Sensing of Environment. 2011. Vol. 115 (4). P. 990 1002.

Об авторах

Аркадий Викторович Евтюшкин — канд. физ.-мат. наук, доц., зав. лаб. Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: AYevtyushkin@kantiana.ru

Виталий Михайлович Брыксин — канд. техн. наук, доц., вед. науч. сотр. Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: VBryksin@kantiana.ru

Алиса Евгеньевна Данилова — студ., Сибирская государственная геодезическая академия, Новосибирск.

E-mail: Aldanilova@kantiana.ru

Антон Валентинович Филатов — канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: AnFilatov@kantiana.ru

About the authors

Arkadi Yevtyushkin — PhD, Ass. Prof., head of the laboratory. I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: AYevtyushkin@kantiana.ru



Vitaliy Bryksin — PhD, Ass. Prof., leading researcher. I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: VBryksin@kantiana.ru

Alisa Danilova — Student, Siberian State Academy of Geodesy, Novosibirsk. E-mail: Aldanilova@kantiana.ru

Anton Filatov — PhD, leading researcher, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: AnFilatov@kantiana.ru