

## Сравнение сезонной динамики поляриметрической классификации леса по радиолокационным данным L-и X-диапазона

Л. Н. Захарова, А. И. Захаров

Фрязинский Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН,  
141190, пл. Введенского, 1, Фрязино, Московская область, ludmila@sunclass.ire.rssi.ru

*Приведены результаты, показывающие зависимость поляриметрической классификации радиолокационных изображений леса от метеорологических условий в момент съёмки. Показано, что данные X-диапазоны менее чувствительны к смене времён года, чем данные L-диапазона. В L-диапазоне (данные PALSAR за 2006–2008 гг.) на зимних снимках практически полностью отсутствуют механизмы дипольного рассеяния и двойного переотражения, тогда как в X-диапазоне (данные TerraSAR-X за 2014–2015 гг.) заметно лишь некоторое снижение количества элементов, отнесённых к классу двойного переотражения на лесах, а также увеличение площади, занимаемой классом поверхностного рассеяния.*

*The paper presents the dependency of polarimetric classification of the natural land covers and, particularly, forests, on the freezing/thawing conditions. It is shown that X-band data are less dependent on the season than L-band. In L-band polarimetric classification the quantity of double-bounce and dipole-type scatterers vanishes almost totally in winter for all types of natural covers. X-band data demonstrate decreasing the number of pixels in double-bounce and dipole classes in the forest as well as increasing the area covered by the surface scattering class for freezing dates. In this study ALOS PALSAR 2006-2008 data were compared with TerraSAR-X 2014-2015 data.*

Одним из наиболее широко используемых на сегодняшний день методов классификации радиолокационных изображений является поляриметрическая декомпозиция, основанная на анализе спектральных свойств матрицы когерентности [1]. Необходимым этапом интерпретации полученной декомпозиции является принятие в рассмотрение рабочей частоты сигнала и погодных условий в момент съёмки. Ранее [2] было показано, что в L-диапазоне температура воздуха ниже -10 градусов по Цельсию в момент съёмки меняет результаты поляриметрической классификации лесных покровов до неузнаваемости. Величина обратного рассеяния снижается при условиях замерзания естественных покровов для всех комбинаций поляризации сигнала на излучении и приёме, однако для разных поляризационных каналов в разной степени, что и сказывается на свойствах матрицы когерентности. Поскольку для разных значений несущей частоты радиолокатора меняется состав и конфигурация элементарных отражателей в толще растительного и/или почвенного покрова, следует ожидать, что картина зависимости результатов классификации поляриметрических данных окажется неодинаковой для L- и X-диапазона.

### Тестовые участки и данные

Тестовый сайт располагается в Сибири, на юго-восточном побережье озера Байкал, вблизи дельты реки Селенги. На территории, покрываемой сценой, находятся леса (преимущественно хвойные с преобладанием сосны и ели), пастбища, сельскохозяйственные поля, луга, а также неиспользуемые земли на островах дельты и часть акватории озера Байкал и реки Селенги.

Для анализа были использованы данные радиолокатора с синтезированной апертурой L-диапазона PALSAR на борту японского спутника ALOS, а также немецких радиолокаторов X-диапазона TerraSAR-X и TanDEM-X, работающих в тесной орбитальной конфигурации. Архивные данные PALSAR были сняты в 2006–2008 годах, данные TerraSAR-X/TanDEM-X были получены в 2014–2015 годах.

## Методы и результаты измерений

Поляриметрическая классификация по методу Cloude&Pottier на основе спектрального анализа матрицы когерентности, при которой выявляется степень «энтропии» собственных чисел матрицы, характеризующих различие величины обратного рассеяния от разных типов элементарных отражателей, а также преобладающий механизм рассеяния.

Матрица когерентности имеет вид

$$\langle [T] \rangle = \frac{1}{2} \left\langle \begin{bmatrix} (S_{HH} + S_{VV})(S_{HH} + S_{VV})^* & (S_{HH} + S_{VV})(S_{HH} - S_{VV})^* & 2(S_{HH} + S_{VV})S_{HV}^* \\ (S_{HH} - S_{VV})(S_{HH} + S_{VV})^* & (S_{HH} - S_{VV})(S_{HH} - S_{VV})^* & 2(S_{HH} - S_{VV})S_{HV}^* \\ 2S_{HV}(S_{HH} + S_{VV})^* & 2S_{HV}(S_{HH} - S_{VV})^* & 4S_{HV}S_{HV}^* \end{bmatrix} \right\rangle$$

где  $Sab$  — элемент матрицы рассеяния с поляризацией  $a$  на излучении и  $b$  на приёме.

$T$  является самосопряжённой, поэтому приводится к диагональному виду в собственном базисе с действительными собственными числами:

$$[T] = [U] \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} [U]^*T$$

где

$$[U] = \begin{bmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \alpha_2 & \cos \alpha_3 \\ \sin \alpha_1 \cos \beta_1 e^{i\delta_1} & \sin \alpha_2 \cos \beta_2 e^{i\delta_2} & \sin \alpha_3 \cos \beta_3 e^{i\delta_3} \\ \sin \alpha_1 \sin \beta_1 e^{i\gamma_1} & \sin \alpha_2 \sin \beta_2 e^{i\gamma_2} & \sin \alpha_3 \sin \beta_3 e^{i\gamma_3} \end{bmatrix}$$

На основе данного разложения вводятся параметры  $H$  (энтропия) и угол  $\alpha$ :

$$H = -\sum P_i \log_3 P_i, \quad \alpha = \sum P_i \alpha_i,$$

где

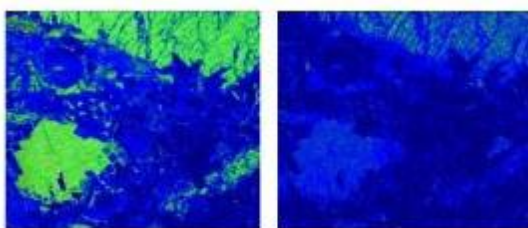
$$P_i = \frac{\lambda_i}{\sum \lambda_j}.$$

Энтропия  $H$  может характеризовать степень шероховатости отражающей поверхности: малые значения соответствуют гладким поверхностям, средние и высокие (до максимального значения 1.0) — сильной шероховатости по сравнению с линейным размером рабочей длины волны радиолокатора. Таким образом, одна и та же поверхность может быть показывать значение низкой энтропии в L-диапазоне (23.6 см) и высокой в X-диапазоне (3.1 см). Механизмы рассеяния различаются по значению угла  $\alpha$ , параметризующего собственный вектор матрицы когерентности: малые значения соответствуют поверхностному рассеянию, средние (между 40 и 50 градусами) дипольному, являющемуся преимущественным типом рассеяния для леса, и самые большие (более 50 градусов) отвечают двойному (вообще говоря, чётной кратности) переотражению по типу передающая антенна – земля – ствол дерева – приёмная антенна. Чем глубже проникновение в крону леса, тем больше доля двукратного переотражения на карте классификации.

Влияние сезона съёмки на результаты поляриметрической классификации в L-диапазоне было обнаружено ранее [2]. На рис. 1 представлена поляриметрическая классификация одного и того же участка местности, проведённая по данным, полученным в тёплое время года (слева) и в холодное (справа). На изображении слева зелёным цветом показаны области со значениями энтропии выше 0.5 и угла  $\alpha$  около  $45^\circ$ , которые характерны для растительности (в данном случае это леса —

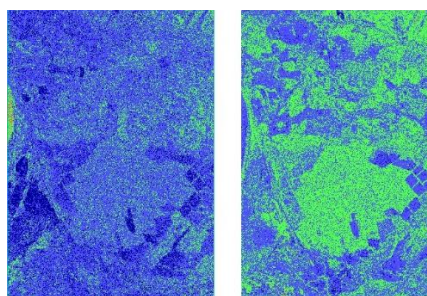
равнинный в нижней части фрагмента и горный в верхней). На изображении справа зелёный цвет практически отсутствует, леса расклассифицированы как объекты, для которых характерно поверхностное рассеяние с умеренной энтропией (синий цвет). Окружающие безлесные пространства попадают в класс поверхностного рассеяния с минимальной энтропией (тёмно-синий цвет). В морозных условиях уровень обратного рассеяния снижается, причём на перекрёстной поляризации это снижение ярче выражено, чем на согласованных. Таким образом, мы видим, что матрица рассеяния приобретает свойства, более присущие отражению от поверхности, чем от объёмной среды.

Средние значения энтропии и угла альфа для леса по данным PALSAR составили  $H=0.86$  и  $\alpha =48^\circ$  по данным 28.05.2006 (на рис.1 слева), тогда как для холодной даты 30.11.2006 (на рис. 1 справа)  $H=0.63$  и  $\alpha=40^\circ$ . Заметное уменьшение угла  $\alpha$  приводит к смене класса «растительность» на класс «поверхностное рассеяние».



**Рис.1. Результат  $H/\alpha$ -классификации фрагмента изображения L-диапазона, включающего лес и открытые пространства. Даты съёмки: 28.05.2006 (слева), 30.11.2006 (справа).**

В X-диапазоне (данные TerraSAR-X) диапазон температур в даты съёмки составляет от  $-16^\circ\text{C}$  до  $+10^\circ\text{C}$ . При сравнении рис. 1 и рис. 2 видна разница между результатами поляриметрической классификации в L- и X-диапазонах. В X-диапазоне даже зимой присутствует заметное количество элементов изображения с дипольным типом рассеяния, характерным для растительности (зелёный цвет на карте классификации). В тёплую дату на результате классификации к классу растительности относятся не только поверхности, поросшие лесом, но и соседние, так что к концу лета границы леса прослеживаются существенно менее чётко, чем в L-диапазоне.

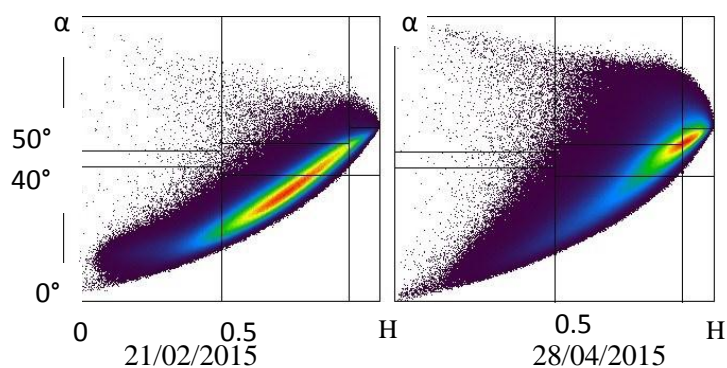


**Рис.2. Результат  $H/\alpha$ -классификации фрагмента изображения X-диапазона, включающего лес и открытые пространства. Даты съёмки: 11.02.2015 (слева), 29.04.2015 (справа).**

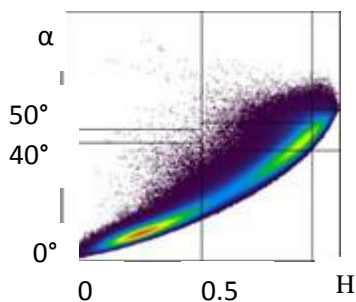
Поскольку классификация определяется величинами  $H$  и  $\alpha$ , имеет смысл рассмотреть, каким образом они меняют свои значения от сезона к сезону. На рис. 3 приведено распределение значений на плоскости для полной сцены, снятой TerraSAR-X в морозную и тёплую дату, на рисунке красным цветом показаны пики гистограммы, фиолетовый соответствует краям гистограммы с наименьшим количеством элементов

изображения, на которых энтропия и альфа принимают соответствующие значения. Весной (диаграмма справа) значительно возрастает доля пикселей, у которых угол  $\alpha$  принимает значения от 40 до 55, что соответствует дипольному типу рассеяния, и это проявляется доминированием этого класса на карте классификации (зелёный цвет на рис. 2, справа).

На рис. 4 показано распределение значений  $H$  и  $\alpha$  по данным PALSAR для тёплой даты. Видно два максимума гистограммы: один в районе низкоэнтропийного поверхностного рассеяния (нижний левый квадрат на схеме), отвечающий безлесным поверхностям, и второй со средней и высокой энтропией (от 0.75 до 0.95), соответствующий лесам (дипольный механизм рассеяния).



**Рис.3. Распределение значений  $H$  и  $\alpha$  на плоскости, вычислено по всей сцене по данным TerraSAR-X для двух дат.**



**Рис. 4. Распределение значений  $H$  и  $\alpha$  на плоскости, вычислено по всей сцене по данным PALSAR от 28/05/2006.**

Основные различия в изменениях поляриметрической классификации от сезона к сезону между L- и X-диапазонами состоят в следующем. Лесной массив представлен классом дипольного рассеяния умеренной и высокой энтропии в L-диапазоне в тёплое время года. При снижении температуры воздуха тот же лес переходит в класс поверхностного механизма рассеяния с умеренной энтропией. В X-диапазоне лес представлен смесью пикселей с поверхностным и дипольным рассеянием, причём зимой с существенным преобладанием поверхностного рассеяния (73% площади) над дипольным (21%), а в тёплое время года распределение носит обратный характер (77% дипольного рассеяния и 22% поверхностного). Открытые поверхности в L-диапазоне всегда классифицируются как имеющие поверхностный механизм рассеяния, однако зимой с низкой энтропией. В X-диапазоне в морозные даты поля представлены смесью в почти равной мере этих двух классов поверхностного рассеяния (54% и 45% площади), а в тёплые — преимущественно поверхностным рассеянием с умеренным значением энтропии с редкими вкраплениями низкоэнтропийного поверхностного рассеяния (7%) и дипольного рассеяния (3%). Далее в течение лета доля дипольного

рассеяния на полях заметно возрастает в X-диапазоне, и в некоторых местах настолько, что поляриметрическая классификация перестаёт различать лес и поле.

### **Вывод**

Можно заключить, что в обоих диапазонах на зимних снимках проявляется снижение энтропии  $H$  и угла  $\alpha$ , однако на поляриметрической классификации это сказывается по-разному: в L-диапазоне на лесных участках полностью пропадает дипольный механизм рассеяния, тогда как в X-диапазоне существенно изменяется соотношение пикселей, классифицируемых с дипольным/поверхностным механизмами рассеяния. Для поляриметрической классификации естественных покровов методом альфа-энтропии, таким образом, наиболее подходящими являются снимки L-диапазона, полученные в тёплое время года

### **Литература**

1. S.R. Cloude and E. Pottier, An Entropy Based Classification Scheme for Land Applications of Polarimetric SAR, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1997. Vol. 35, no. 1, pp. 68–78, January 1997.
2. L.N. Zakharova. Seasonal variations of land cover polarimetric properties on ALOS PALSAR images, 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR-2010), 7-10 June 2010, Aachen, Germany.