

## Экспериментальная оценка когерентности по амплитудным изображениям радиолокатора с синтезированной апертурой Sentinel-1

М. Ю. Достовалов<sup>1</sup>, К. А. Трошко<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт точных приборов, Москва, 129427, Россия  
E-mail: kotik\_55@mail.ru

<sup>2</sup> Институт географии РАН, Москва, 119017, Россия

<sup>3</sup> Институт радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, Фрязино, 141190, Россия  
E-mail: k.a.troshko@igras.ru

В работе представлены результаты экспериментальных исследований метода оценки когерентности по амплитудным изображениям (GRD-продуктам) радиолокационного спутника Sentinel-1. Для оценки когерентности обычно применяются комплексные изображения, содержащие как амплитудную, так и фазовую информацию. В статье описан метод, обеспечивающий возможность использования для этой цели только амплитудных изображений. Показано, что оценка уровня корреляции амплитуды снимков одновременно позволяет оценить, с определёнными ограничениями, и уровень их когерентности. При этом, используя амплитудные изображения для оценки уровня когерентности, можно существенно сократить временные затраты на предварительный анализ области интереса и выбор оптимального интервала наблюдения между съёмками. В работе приведены примеры оценок когерентности по комплексным и амплитудным снимкам. Использование амплитудных данных позволило по изменениям уровня когерентности наблюдать этапы проведения сельскохозяйственных работ на участке съёмки. Анализ серии изображений когерентности, полученных в течение года, продемонстрировал связь между изменением уровня когерентности и некоторых метеорологических параметров (температура воздуха, снежного покрова).

**Ключевые слова:** радиолокатор с синтезируемой апертурой, PCA, Sentinel-1, радиолокационные изображения, дешифрирование, оценка когерентности

Одобрена к печати: 10.02.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-9-18

### Введение

Радиолокационные (РЛ) средства дистанционного зондирования Земли обеспечивают высокую оперативность получения данных мониторинга вне зависимости от сезонов, времени суток и погодных условий. Дистанционное зондирование земной поверхности космическими радиолокаторами с синтезированной апертурой (РСА) проводится уже свыше 40 лет. За это время было запущено большое число космических РСА, функционирующих в разных частотных диапазонах, имеющих различное пространственное разрешение и позволяющих решать различные задачи (Верба и др., 2010).

В то же время опыт дешифрирования РЛ-данных показывает, что этап извлечения тематической информации из РЛ-изображений (особенно из одиночных РЛ-снимков) оказывается весьма сложным и трудоёмким. Поэтому проблема поиска новых информативных признаков определения взаимосвязей между физическими процессами, происходящими на земной и морской поверхности и в атмосфере, а также их проявлений на РЛ-изображениях остаётся актуальной и в настоящее время.

Современные космические РЛ-системы, в частности Sentinel-1, обеспечивают многократные повторяющиеся съёмки местности с периодом между съёмками 6 или 12 сут в зависимости от исследуемой территории и формируют РЛ-изображения с пространственным разрешением около 10 м (Geudtner et al., 2014; Potin et al., 2016). Результаты радиолокационной съёмки находятся в открытом доступе.

Использование данных РСА, установленных на космических аппаратах Sentinel-1A/B, позволяет проводить как традиционную интерферометрическую обработку (многопроходная интерферометрия), так и обработку с использованием постоянных отражателей (Crosetto et al., 2016).

Для методов интерферометрической обработки большое значение имеет сохранение когерентности между изображениями за период между съёмками. Данные методы были детально исследованы в работах (Lin et al., 1992; Pepe, Calò, 2017). Установлено, что их использование в высокочастотных диапазонах (X-диапазон — 8–12 ГГц, C-диапазон — 3,4–8 ГГц) серьёзно ограничивается декорреляцией сигналов в растительных покровах (Захаров, Захарова, 2009; Захарова, Захаров, 2019; Andra Baduge et al., 2016; Zebker, Villasenor, 1992).

В то же время было показано, что в ряде случаев на сельскохозяйственных полях когерентность между снимками может сохраняться длительное время и использоваться в качестве дополнительного информативного признака (Kemp, Burns, 2016). Поэтому целесообразно проведение дополнительных исследований возможности применения когерентных методов дешифрирования (определяемых уровнем взаимной когерентности РЛ-снимков) и оценки их особенностей, связанных с различиями районов съёмки, сезонной изменчивостью, погодными условиями и т. п.

Для оценки когерентности снимков обычно применяют комплексные изображения (Pepe, Calò, 2017). В то же время в 1994 г. в работе (Lee et al., 1994) был представлен метод, использующий для этой цели изображения мощности, в которых фазовая информация отсутствует.

Учитывая, что анализ когерентности и её изменений в зависимости от района и времени съёмки требует обработки протяжённых серий и больших объёмов данных (~4 Гбайт на одну сцену съёмки), выполнение аналогичных оценок по амплитудным данными (~1 Гбайт на сцену) позволяет обеспечить экономию ресурсов при проведении исследований.

Задачей работы являлась экспериментальная отработка метода оценки когерентности по амплитудным изображениям (GRD-продуктам, *англ.* Ground Range Detected) РСА Sentinel-1. В разд. «Описание...» приводится теоретический анализ метода, в разд. «Экспериментальные...» — результаты экспериментальных исследований и примеры проявления изменений когерентности для участков сельхозугодий. Обнаруженные возможности метода позволили провести анализ сезонных изменений уровня когерентности для тестового участка, результаты которого представлены в разд. «Анализ...».

## Описание метода

Теоретическое описание метода в настоящем разделе проводится на основе работы (Lee et al., 1994). При совместной обработке двух исходных изображений, представляемых в виде действительной и мнимой компонент:

$$S_i = a_R + ia_I \text{ и } S_j = b_R + ib_I, \quad (1)$$

вычисляется интерферограмма, представляющая собой комплексный коэффициент корреляции между отсчётами изображений:

$$\rho_c = \frac{E[S_1 S_2^*]}{\sqrt{E[S_1^2] E[S_2^2]}} = |\rho_c| e^{i\theta}, \quad (2)$$

где  $S_i$  и  $S_j$  — комплексные отсчёты двух обрабатываемых изображений; \* — обозначение комплексно сопряжённых сигналов;  $e^{i\theta}$  — интерферометрическая фаза;  $|\rho_c|$  — амплитудная составляющая, или когерентность.

Определив коэффициенты корреляции между действительными и мнимыми составляющими:

$$\rho_{RR} = \frac{E[a_R b_R]}{\sigma_a \sigma_b}, \quad \rho_{RI} = \frac{E[a_R b_I]}{\sigma_a \sigma_b}, \quad \rho_{IR} = \frac{E[a_I b_R]}{\sigma_a \sigma_b}, \quad \rho_{II} = \frac{E[a_I b_I]}{\sigma_a \sigma_b}, \quad (3)$$

где  $E[\cdot]$  — среднее значение;  $\sigma_a$  — среднеквадратическое отклонение (СКО) составляющих  $a_R$  и  $a_I$ ;  $\sigma_b$  — СКО для канала  $b$ , выражение для  $\rho_c$  можно записать как:

$$\rho_c = \frac{(\rho_{RR} + \rho_{II}) + i(\rho_{IR} - \rho_{RI})}{2}. \quad (4)$$

При одинаковых параметрах нормального закона распределения квадратурных компонент в отдельных каналах обоих изображений должны выполняться следующие соотношения между отдельными коэффициентами:

$$\rho_{RR} = \rho_{II}, \quad \rho_{IR} = -\rho_{RI}.$$

И в этом случае

$$|\rho_c|^2 = \rho_{RR}^2 + \rho_{IR}^2. \quad (5)$$

Обычно для оценки коэффициента корреляции используют некогерентное накопление отсчётов изображения. При накоплении отсчётов мощности сигнала по отдельным изображениям формируют суммы:

$$A_n = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [a_R(k)^2 + a_I(k)^2], \quad B_n = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [b_R(k)^2 + b_I(k)^2]. \quad (6)$$

Считая отдельные отсчёты изображений статистически независимыми, можно записать для средних значений и СКО сигналов:

$$\bar{A}_n = E[A_n] = 2E[a_R(k)^2], \quad MSE[A_n] = \frac{2\sigma_a^2}{\sqrt{n}}, \quad \bar{B}_n = E[B_n] = 2E[b_R(k)^2], \quad MSE[B_n] = \frac{2\sigma_b^2}{\sqrt{n}}. \quad (7)$$

При этом коэффициент корреляции, вычисленный по отсчётам мощности, имеет следующий вид:

$$\rho_I^{(n)} = \frac{E[(A_n - \bar{A}_n) \cdot (B_n - \bar{B}_n)]}{MSE[A_n] \cdot MSE[B_n]}. \quad (8)$$

Разложив на сомножители выражение для оценки  $E[(A_n - \bar{A}_n) \cdot (B_n - \bar{B}_n)]$  и используя соотношения (7), можно записать:

$$E[(A_n - \bar{A}_n) \cdot (B_n - \bar{B}_n)] = E[A_n B_n - 4\sigma_a^2 \sigma_b^2] = \frac{1}{n^2} \sum_{k=1}^n E[(a_R(k)^2 + a_I(k)^2) \cdot (b_R(k)^2 + b_I(k)^2) - 4\sigma_a^2 \sigma_b^2]. \quad (9)$$

Для двух нормальных распределений справедливо следующее свойство:

$$E[x^2 y^2] = \sigma_x^2 \sigma_y^2 (1 + 2\rho_{xy}^2), \quad (10)$$

что позволяет представить отдельные сомножители (9), например  $E[a_R(k)^2 b_R(k)^2]$ , в следующем виде:

$$E[a_R(k)^2 b_R(k)^2] = \sigma_a^2 \sigma_b^2 (1 + \rho_{RR}^2).$$

Используя затем соотношения (5), можно записать:

$$E[(A_n - \bar{A}_n) \cdot (B_n - \bar{B}_n)] = \frac{4}{n} \sigma_a^2 \sigma_b^2 |\rho_c|^2. \quad (11)$$

Отсюда следует, что

$$\rho_I = |\rho_c|^2. \quad (12)$$

В представленных соотношениях используется допущение о нормальном законе распределений квадратур обоих изображений. Это допущение обычно выполняется для однородных поверхностей, но при наличии перепадов амплитуды приводит к смещению результатов оценки (Anxi et al., 2014).

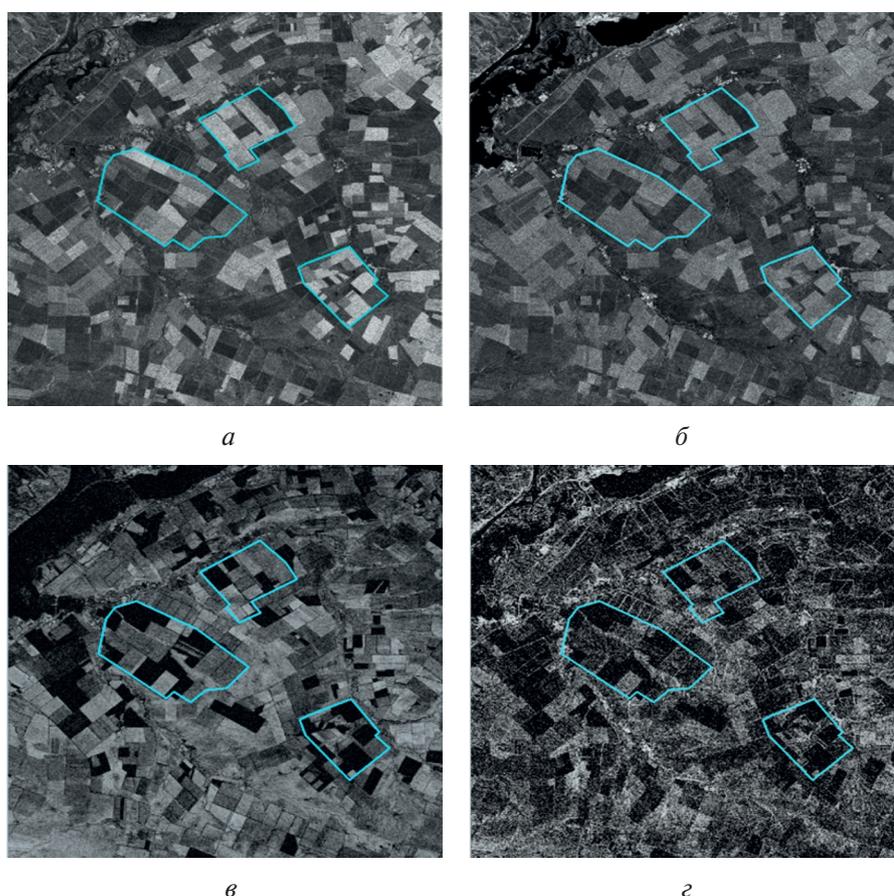
Тем не менее приведённые соотношения демонстрируют, что оценку когерентности можно получать с использованием изображений амплитуды или мощности, в которых отсутствует фазовая информация.

### Экспериментальные результаты оценки когерентности

Экспериментальная оценка уровня когерентности между снимками проводилась по серии РЛ-изображений PCA Sentinel-1 (GRD-продукты) для сельскохозяйственного участка в Волгоградской обл. Оценка когерентности проводилась по совмещённым снимкам в соответствии с выражением (8). Корреляция вычислялась по локальной области  $9 \times 9$  пикселей изображений в поляризации VV (ВВ — вертикально-вертикальная).

Для сравнения амплитудного метода оценки когерентности с обычным методом в комплексе обработки SNAP дополнительно проведена оценка когерентности по нескольким комплексным изображениям (SLC-продукты, *англ.* Single Look Complex).

На *рис. 1* приведены фрагменты двух исходных РЛ-снимков, полученных с интервалом 12 сут, и результаты оценки когерентности между ними (как по SLC-, так и по GRD-продуктам). На кадрах когерентности тёмным областям соответствуют низкие уровни (0,1–0,3), а ярким — высокие (0,6–0,8). Светлыми контурами на всех изображениях выделен один и тот же участок местности для взаимной идентификации объектов.



*Рис. 1.* Фрагменты: исходных амплитудных РЛ-снимков от 03.04.2018 (*а*) и 15.04.2018 (*б*); изображений когерентности, рассчитанных по комплексным (*в*) и амплитудным (*з*) снимкам

Рисунок 1 демонстрирует сложные соотношения между уровнями отражения и когерентности для отдельных сельскохозяйственных полей, расположенных в непосредственной близости друг к другу. Внутри контуров и в остальных областях снимков выделяются поля:

- с высокой когерентностью и малыми изменениями амплитуды;
- низкой когерентностью и сильными изменениями амплитуды;
- низкой когерентностью и малыми изменениями амплитуды;
- высокой когерентностью и сильными изменениями амплитуды.

Исходя из этого, можно сказать, что использование когерентности позволяет получать дополнительную информацию о состоянии растительности и почвенного покрова. При этом видно, что оценка когерентности по амплитудным снимкам хоть и является более зашумлённой, хорошо соответствует оценке, полученной по комплексным изображениям.

Для детального анализа характеристик когерентности на рис. 2 приведены фрагменты изображений когерентности, полученных по комплексным и амплитудным снимкам.

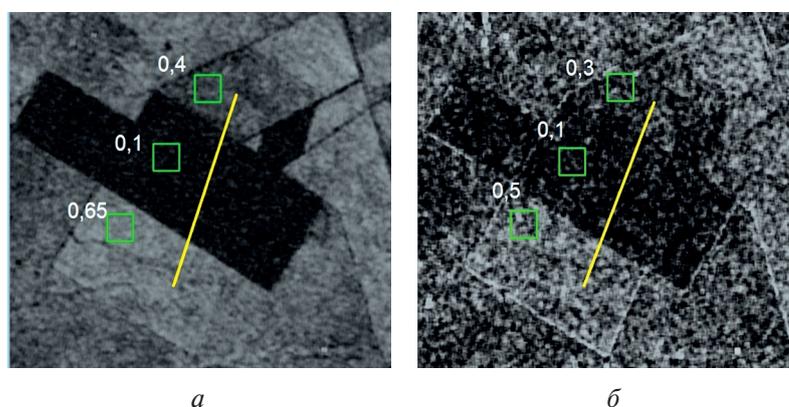


Рис. 2. Увеличенные фрагменты изображений когерентности, полученных по комплексным (а) и амплитудным (б) снимкам. Цифрами обозначены усреднённые в пределах тестовых площадок значения когерентности

На обоих изображениях зелёными прямоугольниками обозначены тестовые площадки, характеризующиеся разными уровнями когерентности: низким ( $\sim 0,1$ ), средним ( $\sim 0,4-0,5$ ) и высоким ( $\sim 0,65-0,7$ ). Через эти же области проведён совмещённый профиль (жёлтая линия). Значения оценок когерентности вдоль профиля двумя методами приведены на графике на рис. 3.



Рис. 3. Значения оценок когерентности вдоль профиля, полученных двумя методами

Анализ графиков показывает, что оценка когерентности по амплитудным изображениям оказывается ниже, поскольку в соответствии с выражением (12) при корреляционной обработке вычисляется квадрат коэффициента корреляции.

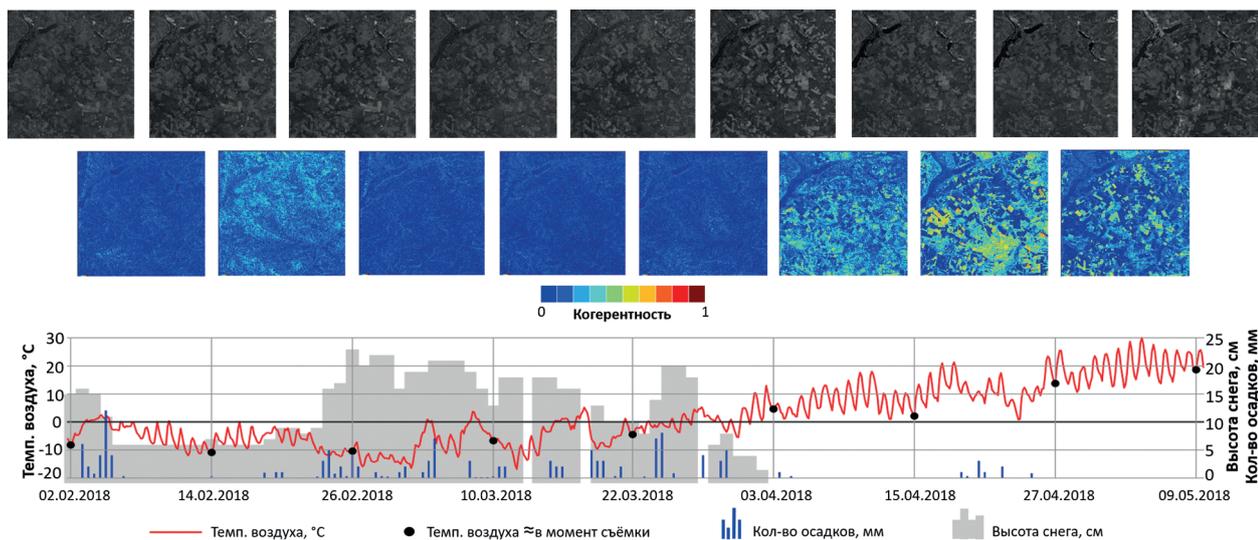


Рис. 5. Изменение уровня когерентности в период схода снежного покрова и перехода от отрицательной температуры воздуха к положительной

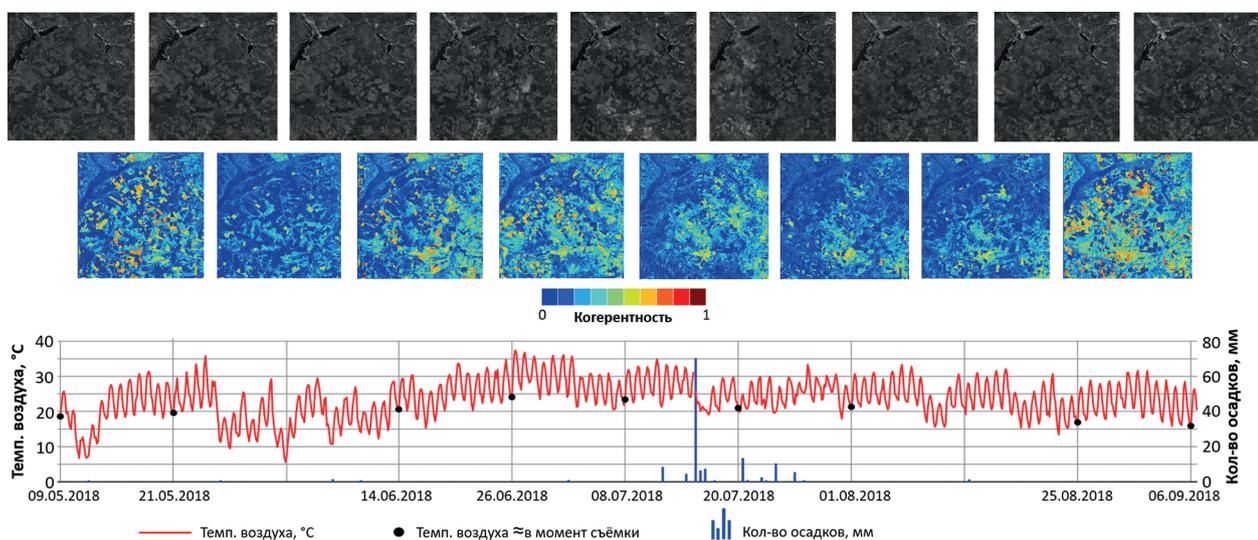


Рис. 6. Изменения уровня когерентности в весенне-летний период

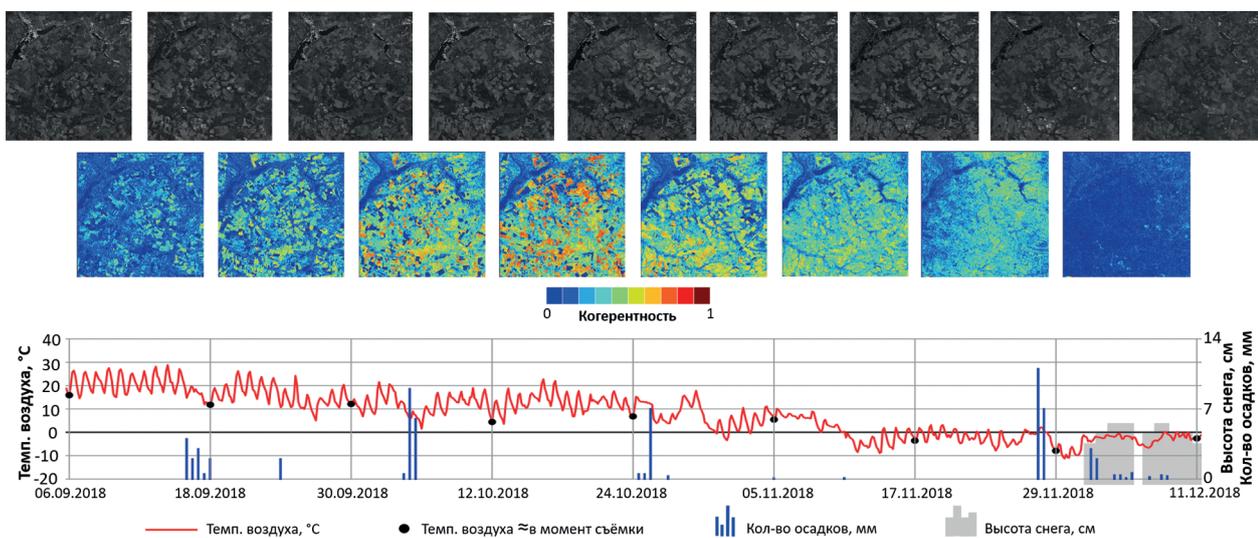
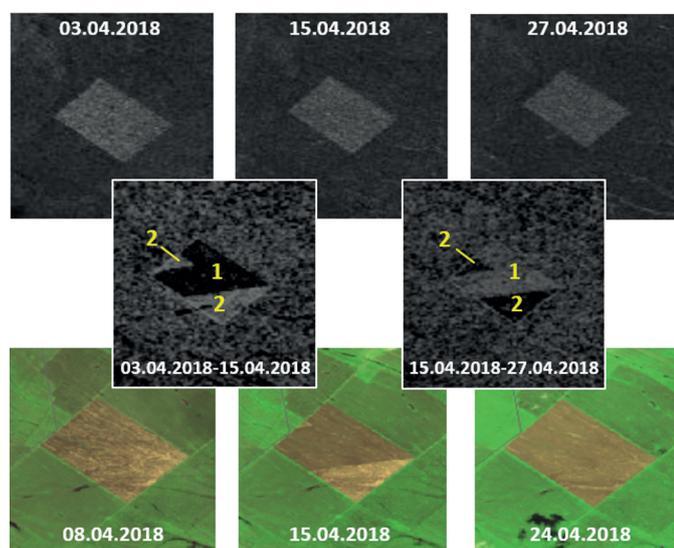


Рис. 7. Изменения уровня когерентности в период осень – начало зимы

На обоих графиках видна модуляция (шумы), которую можно интерпретировать как разброс локальных уровней когерентности в пределах крупной, но в среднем однородной области. При этом оценка когерентности по амплитудным изображениям оказывается более зашумлённой в сравнении с оценкой по комплексным. Различие можно объяснить тем, что амплитудные GRD-продукты, используемые для оценки когерентности, уже включают некогерентное накопление порядка 4–5. В результате итоговый уровень усреднения шумов при корреляции оказывается ниже, чем при оценке когерентности по исходным SLC-изображениям без некогерентного накопления.

Сравнение *рис. 2* и *3* позволяет заключить, что с помощью обработки амплитудных снимков можно оценивать уровень когерентности объектов на участке съёмки и получать устойчивые результаты в областях высокой и низкой когерентности.

На *рис. 4* представлены результаты сравнения изображений когерентности с амплитудными РЛ-изображениями и снимками в оптическом диапазоне Landsat-8, полученными в близкие сроки в апреле 2018 г.



*Рис. 4.* Отображение сельскохозяйственных работ на поле на амплитудных РЛ-изображениях (*верхний ряд*), полученных на их основе изображениях когерентности (*средний ряд*), снимках в оптическом диапазоне Landsat-8 (*нижний ряд*). Пояснение к цифрам — в тексте

Сравнение амплитудных РЛ-снимков (*верхний ряд*) за 3 и 15 апреля фактически не показывает изменений. В то же время оценка когерентности по амплитудным снимкам (*средний ряд*) демонстрирует резкое снижение в области, обозначенной цифрой 1. Изменение яркости в соответствующей области наблюдается и на снимке в оптическом диапазоне Landsat-8, полученном 15 апреля. Это позволяет предположить, что на изображении когерентности явно проявляются результаты вспашки части поля.

Сравнение РЛ-снимков за 15 и 27 апреля и уровня когерентности между ними показывает, что для этой пары область 1 теперь имеет высокий уровень когерентности, а расположенная рядом область 2, напротив, — низкий уровень. На снимке в оптическом диапазоне от 24 апреля видно, что ранее наблюдаемый на изображении от 15 апреля перепад яркости исчез. Отсюда можно предположить, что в этот период была вспахана оставшаяся часть поля, что привело к снижению когерентности в области 2. При этом ранее вспаханная область 1 характеризуется высокой когерентностью, так как здесь в период с 15 по 27 апреля растительность ещё отсутствует и декорреляция сигналов мала.

Таким образом, оценка уровня когерентности по амплитудным снимкам в рассмотренном случае позволила наблюдать этапы проведения сельскохозяйственных работ на исследуемом участке.

## Анализ сезонных изменений уровня когерентности

Для выбранного тестового участка проведён анализ сезонных изменений уровня когерентности за период с февраля по декабрь 2018 г. Результаты анализа представлены на *рис. 5–7* (см. с. 288). На каждом рисунке показана серия РЛ-снимков тестового участка (изображения в градациях серого в верхнем ряду) и оценки когерентности, полученные предлагаемым методом (цветные изображения в среднем ряду). За соответствующий период также приводятся результаты метеонаблюдений на станции в Волгограде (источник — сайт «Расписание погоды», <https://rp5.ru/>), включающие графики температуры, количества выпавших осадков и высоты снежного покрова (нижний ряд). Даты проведения РЛ-съёмки на графиках метеонаблюдений выделены маркерами, отсутствие маркера подразумевает отсутствие съёмки в соответствующий день.

Информация, приведённая на рисунках, показывает, что для участка отчётливо выделяются интервалы низкой (декабрь — начало апреля) и относительно высокой (апрель — ноябрь) когерентности.

Графики метеонаблюдений показывают, что интервал с низкой когерентностью хорошо соответствует периоду с наличием снежного покрова и преимущественно отрицательными температурами воздуха, а с высокой когерентностью, напротив, — бесснежному периоду с положительными температурами. *Рисунок 5* демонстрирует этап повышения уровня когерентности после исчезновения снежного покрова при переходе к положительным среднесуточным температурам.

В весенне-летний период изменения уровня когерентности в пределах участка имеют сложный характер. Сложность определяется тем, что результаты анализа каждой пары снимков, представленных на *рис. 6*, показывают, что в пределах участка области высокой и низкой когерентности наблюдаются одновременно. Таким образом, становится затруднительно определить средний уровень когерентности, характерный для исследуемого участка. Как было показано на *рис. 4*, наблюдаемые этапы проведения сельскохозяйственных работ от съёмки к съёмке могут приводить как к повышению, так и к снижению уровня когерентности. Снижение когерентности на отдельных полях также происходит в период вегетации сельскохозяйственных культур.

Изменения уровня когерентности в период осень — начало зимы (до начала декабря) представлены на *рис. 7*. В этот период в Волгоградской обл. завершается уборка урожая и сельскохозяйственные участки находятся в относительно стабильном состоянии. В результате уровень когерентности на РЛ-снимках заметно возрастает, чему также способствует малое количество осадков. Затем когерентность начинает уменьшаться вместе со снижением температуры, после чего резко падает при появлении снежного покрова.

## Заключение

Экспериментальные исследования метода оценки когерентности по амплитудным изображениям (GRD-продуктам) PCA Sentinel-1 позволяют сделать следующие основные выводы:

- оценка когерентности по амплитудным снимкам хорошо соответствует оценке, полученной по комплексным изображениям, что позволяет использовать предложенный метод для экспресс-анализа данных на пригодность для интерферометрической обработки;
- амплитудные изображения PCA Sentinel-1 можно использовать для анализа сезонных изменений уровня когерентности и выявления связей наблюдаемых изменений с метеорологическими факторами (температурой, наличием снежного покрова) и с результатами экономической деятельности (проведением сельскохозяйственных работ).

Работа выполнена в рамках темы Госзадания № АААА-А19-119022190168-8 при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-07-00816).

## Литература

1. *Верба В. С., Неронский Л. Б., Осипов И. Г., Турук В. Э.* Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. М.: Радиотехника, 2010. 675 с.
2. *Захаров А. И., Захарова Л. Н.* Исследование динамики волжских берегов в районе Ульяновска методом радиолокационной интерферометрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Вып. 6. Т. 2. С. 54–57.
3. *Захарова Л. Н., Захаров А. И.* Наблюдение динамики зоны оползня на реке Бурея по данным интерферометрической съёмки Sentinel-1 в 2017–2018 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 273–277.
4. *Andra Baduge A. W., Henschel M. D., Hobbs S., Buehler S. A., Ekman J., Lehrbass B.* Seasonal variation of coherence in SAR interferograms in Kiruna, Northern Sweden // Intern. J. Remote Sensing. 2016. V. 37. No. 2. P. 370–387.
5. *Anxi Y., Haijun W., Zhen D., Haifeng H.* Amplitude and Phase Statistics of Multi-look SAR Complex Interferogram // Defence Science J. 2014. V. 64. No. 6. P. 564–570.
6. *Crosetto M., Monserrat O., Cuevas-González M., Devanthéry N., Crippa B.* Persistent Scatterer Interferometry: A review // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2016. V. 115. P. 78–89.
7. *Geudtner D., Torres R., Snoeij P., Bibby D., Rommen B.* Sentinel-1 System // 10<sup>th</sup> European Conf. Synthetic Aperture Radar: Proc. EUSAR. 2014. P. 1–3.
8. *Kemp J., Burns J.* Agricultural monitoring using pursuit monostatic TanDEM-X coherence in the Western Cape, South Africa // 11<sup>th</sup> European Conf. Synthetic Aperture Radar: Proc. EUSAR. 2016. P. 643–646.
9. *Lee J. S., Hoppel K. W., Mango S. A., Miller A. R.* Intensity and Phase Statistics of Multilook Polarimetric and Interferometric SAR Imagery // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1994. V. 32. No. 5. P. 1017–1028.
10. *Lin Q., Vesecky J., Zebker H.* New approaches in interferometric SAR data processing // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1992. V. 30. P. 560–567.
11. *Pepe A., Calò F.* A Review of Interferometric Synthetic Aperture Radar Multi-Track Approaches for the Retrieval of Earth's Surface Displacements // Applied Sciences. 2017. P. 1–39.
12. *Potin P., Rosich B., Grimont P., Miranda N., Shurmer I., O'Connell A., Torres R., Krassenburg M.* Sentinel-1 Mission Status // 11<sup>th</sup> European Conf. Synthetic Aperture Radar: Proc. EUSAR. 2016. P. 59–64.
13. *Zebker H. A., Villasenor J.* Decorrelation in interferometric Radar echoes // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1992. V. 30. P. 950–959.

## An experimental estimation of coherence using magnitude Sentinel-1 synthetic aperture radar images

**M. Yu. Dostovalov<sup>1</sup>, K. A. Troshko<sup>2,3</sup>**

<sup>1</sup> *Research Institute of Precision Instruments, Moscow 129427, Russia  
E-mail: kotik\_55@mail.ru*

<sup>2</sup> *Institute of Geography RAS, Moscow 119017, Russia*

<sup>3</sup> *Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino Branch  
Fryazino 141190, Russia  
E-mail: k.a.troshko@igras.ru*

The experimental results of coherence estimation using Sentinel-1 magnitude images (GRD products) are presented. The common way for coherence estimation is to use complex images. The work demonstrates that coherence magnitude term can be estimated using intensity or magnitude images. Coherence analysis requires the processing of large amounts of data, so the coherence estimation using magnitude instead of complex images can save resources when conducting research, especially at the preliminary stages. The paper gives examples of comparison of coherence estimation results for complex and magnitude images. The use of magnitude images made it possible to detect the stages of agricultural work within the test site observing the coherence level variations. A series of coherence

images was calculated from magnitude images for a year of observations. An analysis of coherence images allowed to observe seasonal variations and demonstrated the relationship between the coherence level and changes in some meteorological parameters (air temperature, snow cover).

**Keywords:** synthetic aperture radar, SAR, Sentinel-1, radar images, images interpretation, coherence estimation

Accepted: 10.02.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-9-18

## References

1. Verba V. S., Neronskiy L. B., Osipov I. G., Turuk V. E., *Radiolokatsionnye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya* (Space-based radar systems of Earth observation), Moscow: Radiotekhnika, 2010, 675 p.
2. Zakharov A. I., Zakharova L. N., Issledovanie dinamiki volzhskikh beregov v raione Ul'yanovska metodom radiolokatsionnoi interferometrii (Study of Volga Riverbanks dynamics in Ulyanovsk city by means of SAR Interferometry), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2009, Issue 6, Vol. 2, pp. 54–57.
3. Zakharova L. N., Zakharov A. I., Nablyudenie dinamiki zony opolznya na reke Bureya po dannym interfermetricheskoi s"emki Sentinel-1 v 2017–2018 gg. (Interferometric observation of landslide area dynamics on the Bureya River by means of Sentinel-1 radar data in 2017–2018), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 2, pp. 273–277.
4. Andra Baduge A. W., Henschel M. D., Hobbs S., Buehler S. A., Ekman J., Lehrbass B., Seasonal variation of coherence in SAR interferograms in Kiruna, Northern Sweden, *Intern. J. Remote Sensing*, 2016, Vol. 37, No. 2, pp. 370–387.
5. Anxi Y., Haijun W., Zhen D., Haifeng H., Amplitude and Phase Statistics of Multi-look SAR Complex Interferogram, *Defence Science J.*, 2014, Vol. 64, No. 6, pp. 564–570.
6. Crosetto M., Monserrat O., Cuevas-González M., Devanthery N., Crippa B., Persistent Scatterer Interferometry: A review, *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, Vol. 115, pp. 78–89.
7. Geudtner D., Torres R., Snoeij P., Bibby D., Rommen B., Sentinel-1 System, *10<sup>th</sup> European Conf. Synthetic Aperture Radar: Proc. EUSAR*, 2014, pp. 1–3.
8. Kemp J., Burns J., Agricultural monitoring using pursuit monostatic TanDEM-X coherence in the Western Cape, South Africa, *11<sup>th</sup> European Conf. Synthetic Aperture Radar: Proc. EUSAR*, 2016, pp. 643–646.
9. Lee J. S., Hoppel K. W., Mango S. A., Miller A. R., Intensity and Phase Statistics of Multilook Polarimetric and Interferometric SAR Imagery, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1994, Vol. 32, No. 5, pp. 1017–1028.
10. Lin Q., Vesecky J., Zebker H., New approaches in interferometric SAR data processing, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1992, Vol. 30, pp. 560–567.
11. Pepe A., Calò F., A Review of Interferometric Synthetic Aperture Radar Multi-Track Approaches for the Retrieval of Earth's Surface Displacements, *Applied Sciences*, 2017, pp. 1–39.
12. Potin P., Rosich B., Grimont P., Sentinel-1 Mission Status, *11<sup>th</sup> European Conf. Synthetic Aperture Radar: Proc. EUSAR*, 2016, pp. 59–64.
13. Zebker H. A., Villasenor J., Decorrelation in interferometric Radar echoes, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1992, Vol. 30, pp. 950–959.