

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.8.10>

УДК: 621.396.96

## ОБНАРУЖЕНИЕ СДВИГОВ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ОДНОПОЗИЦИОННОГО РСА КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ В РЕЖИМЕ ПЕРЕДНЕБОКОВОГО ОБЗОРА

М. И. Бабокин<sup>1,2</sup>, П. Е. Шимкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «АЭРОКОН»,  
140181, Россия, Жуковский, ул. Жуковского 1

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
111250, Россия, Москва, ул. Красноказарменная 14

Статья поступила в редакцию 23 мая 2024 года

**Аннотация.** Рассмотрены особенности построения и основные характеристики радиолокационного интерферометрического комплекса дистанционного зондирования Земли на базе однопозиционного космического радиолокатора с синтезированной апертурой антенны, работающего в режиме переднебокового наблюдения. Проверена работоспособность предложенного подхода к построению системы для точного обнаружения подвижек земной поверхности по реальным радиоголограммам, полученным в ходе экспериментальных полетов и открытым радиолокационным данным. Показано, что представленный в работе радиолокационный метод дифференциальной интерферометрии с применением предлагаемой схемы зондирования поверхности Земли позволяет с высокой детальностью и точностью измерять подвижки земной поверхности, как на коротких, так и протяжённых временных интервалах. Продемонстрирована возможность использования предлагаемой схемы построения интерферометрического комплекса с одним радиолокатором на орбите для решения задач получения

дополнительной информации о состоянии поверхности Земли. Приведены первые экспериментальные результаты по обнаружению и отображению на двумерных радиолокационных изображениях дифференциальных подвижек подстилающей поверхности путём применения многомерной разностно-фазовой обработки парных сигналов методом дифференциальной интерферометрии с помощью однопозиционного радиолокатора с синтезированной апертурой антенны космического базирования, работающего в режиме переднебокового обзора.

**Ключевые слова:** метод дифференциальной интерферометрии, радиолокатор с синтезированной апертурой антенны, интерферометрический радиолокатор, земная поверхность, результаты эксперимента.

**Финансирование:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00507, <https://rscf.ru/project/24-29-00507/>

**Автор для переписки:** Шимкин Павел Евгеньевич, [shimkinpy@mpei.ru](mailto:shimkinpy@mpei.ru)

## Введение

Радиолокационный мониторинг с применением дифференциальных интерферометрических комплексов с помощью радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) в целях дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) активно развивается и остается актуальным, открывая новые возможности многомерной обработки сигналов с извлечением пространственно-разностно-фазово-поляризационной информации, заключенной в отраженных от Земли эхо-сигналах [1-5]

Результаты разработанных на сегодняшний день подходов к обработке радиолокационной информации, получаемой с помощью РСА, в том числе и интерферометрических (ИРСА), выходят далеко за рамки возможностей традиционных методов радиовидения [6-8] и уже были продемонстрированы для отслеживания временных изменений недр природных сред, а также для обеспечения повышенной чувствительности к био- и геофизическим параметрам.

Особенно важным практическим применением является обследование больших площадей с целью обнаружения термокарстовых подвижек грунтов и просадок грунта в местах интенсивной добычи углеводородов, шахтной добычи полезных ископаемых, представляющих потенциальную опасность для трубопроводов, дорог, жилых и промышленных объектов, что позволит предотвратить экологический ущерб от нефтезагрязнений, сократить производственные затраты и т.п. При подобной организации радионаблюдения даже подвижки величиной в доли длины волны радиолокатора могут быть устойчиво обнаружены и идентифицированы.

Целью настоящей работы является обоснование возможностей дифференциальных интерферометрических комплексов РСА для обнаружения подвижек Земли на базе космического однопроходного РСА, работающего в режиме переднебокового обзора [9-13], потенциально обладающего относительно высокой оперативностью получения информации и повышенной помехозащищённостью, а также демонстрация первых результатов экспериментальной обработки радиоголограмм, полученных с помощью рассматриваемого в работе ИРСА.

## **1. Математическая модель наблюдения и обработки сигналов**

Однопроходный способ построения РСА дифференциального интерферометра реализуется при многосеансной и многопроходной съёмке Земли (как минимум два сеанса наблюдения в каждом проходе (проходов – минимум два) с применением одного космического аппарата (КА) с РСА при переднебоковом обзоре поверхности, когда комплексное изображение одного участка формируется несколько раз в каждом проходе в пределах одного рабочего участка орбиты. Излучение и приём сигналов на одном борту КА с РСА позволяет значительно снизить требования к навигационному обеспечению и синхронизации, что в случае дифференциального интерферометрического построения имеет принципиальное значение.

На рис. 1 представлена геометрическая схема однопроходного космического дифференциального интерферометра с РСА (ДИРСА) при переднебоковом обзоре. Пространственное разнесение приемных апертур обеспечивается за счет естественного перемещения КА при движении с путевой скоростью  $V$ . Наблюдение земной поверхности ведётся при отклоненном угле наблюдения  $\alpha$  в первом сеансе наблюдения. Через определенный интервал  $B = VT_0$ ,  $T_0 < T_C / 4$ ,  $T_C$  – время синтезирования РСА, второй сеанс возобновляется, так что значительная часть сигналов первого и второго сеансов повторяется, что определяет их высокую степень корреляции.

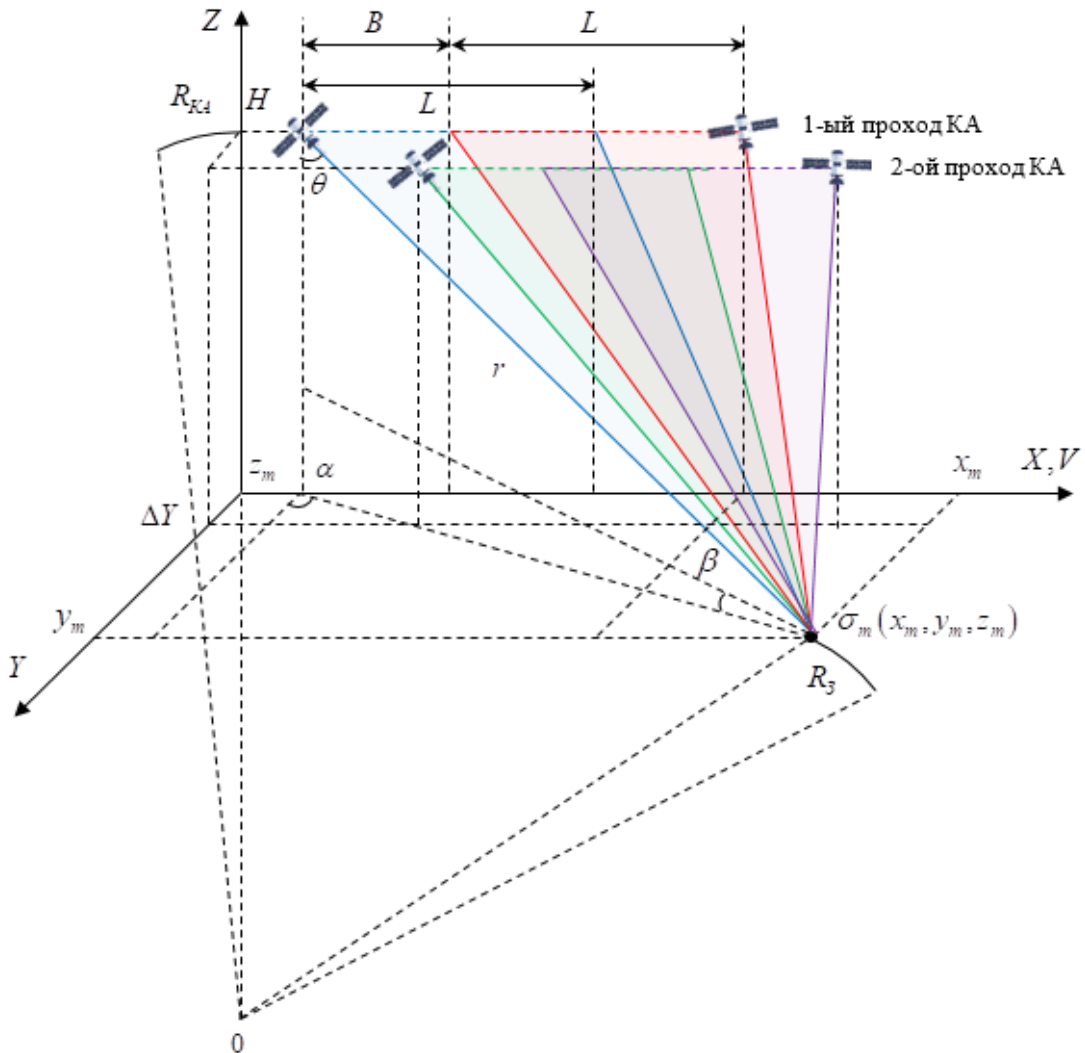


Рис. 1. Геометрия визирования однопозиционного ДИРСА переднебокового обзора.

Специфика ДИРСА измерений требует более одной пары высоко коррелированных сигналов, полученных при каждом проходе носителя РСА. Смежные проходы, которые происходят через определённые промежутки времени (сутки, неделя, месяц, год) и могут совпадать или отклоняться на значения по высоте и в направлении, поперечном движению, при этом на рис. 1 показано только смещение  $\Delta Y$  так, что второй проход осуществляется на той же высоте полета носителя  $H$ , как и при первом проходе.

При условии значительного превышения отраженного земной поверхностью сигнала над шумами приемника, и полном совпадении условий наблюдения в смежных проходах, а также одновременном сдвиге поверхности внутри элемента разрешения (отсутствие дополнительной пространственной декорреляции), алгоритм оценивания подвижек земной поверхности можно записать следующим образом [4] (1):

$$\hat{\Delta}_{mn} \approx \frac{\lambda r_m}{4\pi B \cos(\theta_m^v + \beta) \sin \alpha} \arg \left( \hat{d}_{mn}^{v-1} \hat{d}_{mn}^{v*} \right), \quad (1)$$

где  $\hat{\Delta}_{mn}$  – оценка сдвигов земной поверхности  $m, n$ -го элемента разрешения;  $m$  – номер элемента разрешения по дальности,  $n$  – номер элемента разрешения по азимуту;  $r_m = R_3 \cos(\theta_m + \beta) / \sin \theta_m$ ;  $R_3 \approx 6371$  км – радиус Земли на широте объекта наблюдения;  $\beta = \arccos \left[ (1 + H/R_3) \sin \theta \right]$  – угол между направлением КА от центра зоны обзора и плоскостью местного горизонта или угол скольжения;  $\hat{d}_{mn}^{v-1} = e_{mn}^{l-1,v-1} * e_{mn}^{l-1,v-1}$ ,  $\hat{d}_{mn}^v = e_{mn}^{l-1,v} * e_{mn}^{l-1,v}$  – две комплексные оценки, полученные в результате обработки ДИРСА как комплексного сопряжения приведённых парных сигналов при двух смежных проходах носителя РСА.

Заметим, что оценка сдвига поверхности состоит из трёх комплексных сопряжений:

1) первое: комплексное сопряжение приведённых к одному моменту времени оценок двух сеансов наблюдения первого прохода, в результате чего устраняется фаза переотражения элемента разрешения и набега фазы движения относительно ровной поверхности. После этого сопряжения остаётся только фазовый набег, определяемый рельефом подстилающей поверхности (ПП);

2) второе: комплексное сопряжение приведённых к одному моменту времени оценок двух сеансов наблюдения второго прохода, в результате чего устраняется фаза переотражения элемента разрешения и набега фазы движения относительно ровной поверхности. После этого остаётся только фазовый набег, определяемый рельефом ПП с учётом подвижек во времени;

3) третье: комплексное сопряжение первого и второго, в результате чего в аргументе полученного результата остаётся фаза, зависящая от подвижек земной поверхности.

Сеансы в первом и втором проходе следуют со смещением в четверть (или менее) интервала синтезирования в каждом проходе ДИРСА и фазу переотражения элемента разрешения можно считать неизменной, поэтому компенсация фазы переотражения будет полной (до шумов). Следует отметить, что фазовые искажения в среде распространения будут также компенсированы полностью, поскольку смещение между сеансами составляет менее секунды. Для однородной земной поверхности, при сохранении условий наблюдения, оценка рельефа ПП будет неизменной, поэтому после третьего комплексного сопряжения фазовая компенсация также будет полной, а аргумент третьего комплексного сопряжения будет зависеть только от сдвигов земной поверхности

Подобный многопроходный (двухпроходный) метод, реализуемый с помощью ДИРСА в режиме однопроходного переднебокового обзора, имеет принципиальное отличие от классического двух или трёхпроходного ИРСА, поскольку в каждом проходе реализуется компенсация мешающих фазовых

отклонений, практически на одном интервале синтезирования. Если этого не делать, то в разных проходах эти отклонения (из-за среды распространения или изменений радиофизических свойств поверхности) могут изменяться и приводить к значительным ошибкам оценивания сдвигов поверхности.

## 2. Анализ потенциальной точности измерения сдвигов земной поверхности

Математическое выражение для оценки среднеквадратического отклонения (СКО) при измерении подвижек земной поверхности с учетом смещения носителя РСА во втором проходе при дифференциальном наблюдении Земли определено в [4] (2):

$$\sigma_m^\Delta \approx \frac{\lambda r_m}{4\pi B \sin \alpha \cos(\theta_m + \beta)} \left( \frac{1}{q} + \frac{1 - \Delta r_e}{2} \right), \quad (2)$$

где  $q$  – отношение сигнал/шум (ОСШ);

$\Delta r_e \approx \sin\left(\frac{2\pi\Delta Y \Delta y}{\lambda r_m}\right) / \left(\frac{2\pi\Delta Y \Delta y}{\lambda r_m}\right)$  – коэффициент корреляции дифференциальных парных сигналов,  $\Delta y$  – проекция на горизонтальную плоскость разрешающей способности по наклонной дальности.

На рис. 2 представлены зависимости ошибки оценивания подвижек земной поверхности от угла падения с учетом смещения носителя во втором проходе ( $\Delta r_e = 1$ ) и с учетом несовпадения орбит в различных проходах ДИРСА или неточности знания положения ( $\Delta r_e < 1$ ). Параметры съемки следующие:  $H = 500$  км,  $B = 5$  км,  $\lambda = 24$  см,  $\alpha = 10^\circ$ ,  $\Delta Y = 1$  км,  $\Delta y = 3$  м.

Из анализа зависимостей, показанных на рис. 2 можно сделать вывод, что потенциальная точность оценивания изменений земной поверхности может достигать долей длины волны излучения даже при реализации переднебокового режима обзора. Результаты, показанные на рис. 2 а) достижимы при точном повторении условий полёта и наблюдения поверхности в разных проходах, а также использования техники интерферометрической обработки парных

сигналов при реализации переднебокового режима зондирования РСА из пары сеансов наблюдения в каждом проходе. Следует отметить, что классические дифференциальные РСА измерители подвижек земной поверхности обладают значительно большей точностью, но получение этой точности связано с не менее значительными трудностями.

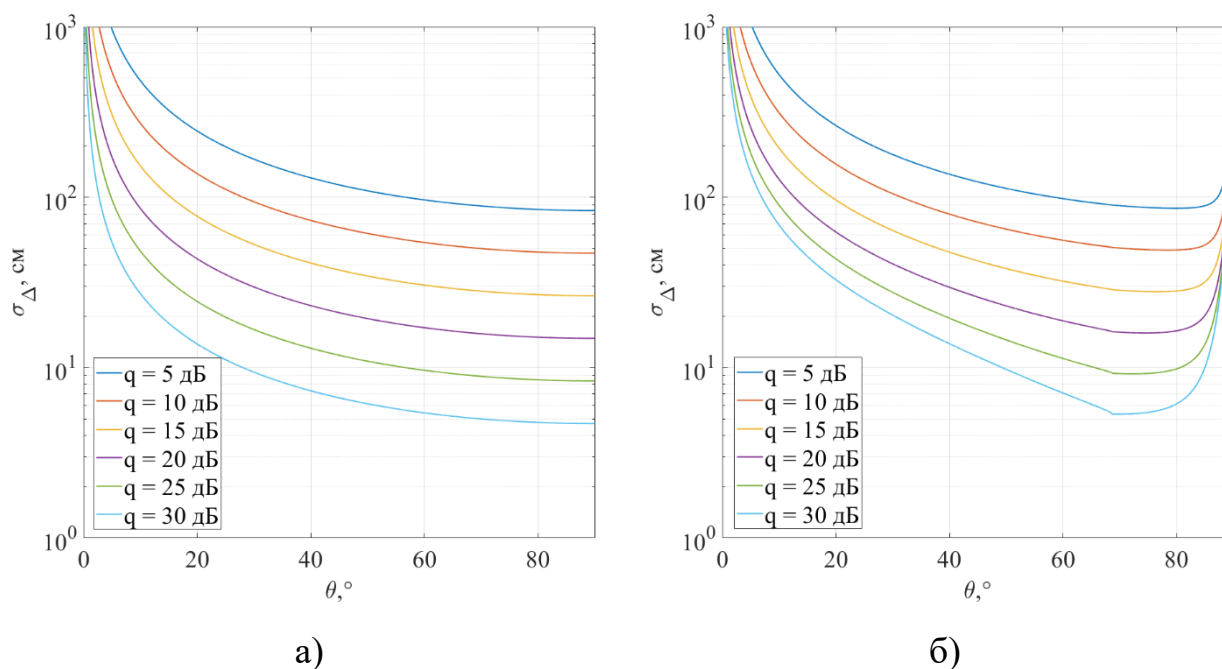


Рис. 2. Потенциальная точность оценивания сдвигов земной поверхности: а) без учета смещения носителя РСА; б) с учетом смещения носителя РСА.

Ошибки в ДИРСА также могут возникать из-за расхождения орбит в различных проходах или неточности знания положения, скорости носителя или угловой ориентации и т.п., потому немало усилий потребуется для компенсации влияния этих явлений. Так, если второй проход произошёл со смещением в 1 км, то получим результат, изображенный на рис. 2 б) из которого следует, что уже при километровом смещении орбит, точность измерения понизится практически в два раза. Следует отметить, что точность рассчитывалась без учёта эффекта фазового усреднения (фильтрации), поэтому для площадных объектов можно рассчитывать на повышение точности.

В классической дифференциальной интерферометрии для достижения высокой точности измерений сдвигов земной поверхности, соразмерной с потенциальной, необходимо совмещать изображения в смежных проходах



до десятых и сотых долей размера элемента разрешения. Безусловно, решения подобных задач диктует применение высокоточных навигационных систем, фазовых систем глобального и дифференциального (относительного) позиционирования, цифровых карт местности, дополнительных корреляционных и адаптивных методов обработки и компенсации различных фазовых искажений.

В ДИРСА происходит сравнение измеренных относительных разнопроходных фазо-разностных портретов местности, где компенсированны относительные фазовые искажения как самих объектов анализа, так и среды распространения ЭМВ, что значительно упрощает задачу измерения и повышает реальную точность.

### **3. Экспериментальная проверка работоспособности обнаружения сдвигов**

Итак, ДИРСА в режиме однопроходного переднебокового обзора в разных проходах имеет независимые фазо-разностные изображения без временных и пространственных искажений, сопрягать которые значительно проще, особенно после усреднения и фильтрации.

На рис. 3 представлена иллюстрация возможности обнаружения сдвигов земной поверхности по информации рассматриваемого в работе ДИРСА в двух проходах при  $\alpha \approx 2^\circ$  на примере наблюдения за гористым районом Сихоте-Алинской гряды с перепадами высот местного рельефа до 500...1000 м. Следует отметить, что в этом районе производится активная горная добыча ископаемых.

Слева на рис. 3 представлено соответствующее РЛИ с пространственной разрешающей способностью примерно 20 м, длина волны 24 см. Затем следуют два фазовых изображения в амплитудном представлении, являющиеся результатом обнаружения и измерения сдвигов земной поверхности земли по изменению рельефа ПП, полученного с помощью рассматриваемого ДИРСА в двух сеансах наблюдения, следующих через два с половиной года. Результаты получены для согласованной НН и перекрёстной НV поляризации,

которые имеют значительные структурные изменения и могут нести дополнительную информацию о физических процессах подвижек земной поверхности. Анализ результатов показывает, что в одной области (между горами гряды) подвижки достигают 15...20 см за промежуток времени более двух лет. Можно выделить изменения в структуре поверхностного слоя. Следует отметить, что попытки восстановить рельеф ПП и сдвиги рельефа ПП классическим многопроходным методом не увенчались успехом.

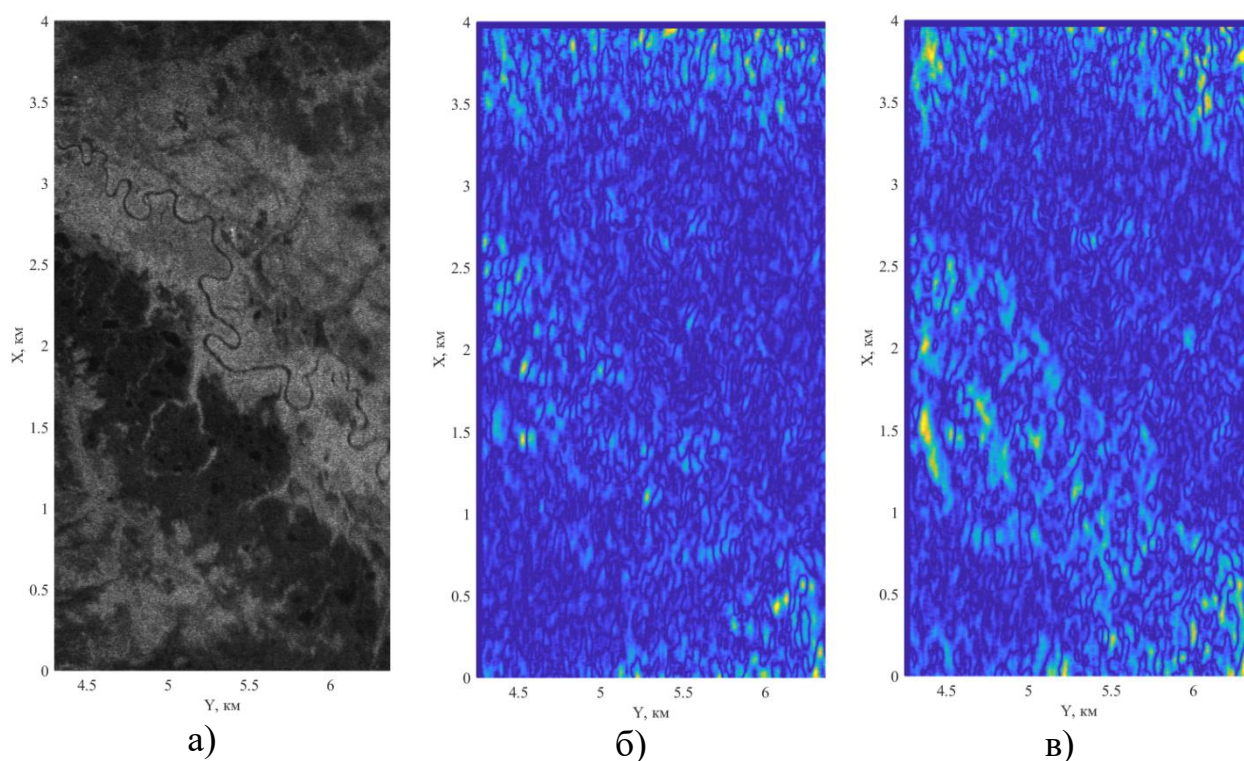


Рис. 3. Экспериментальная проверка обнаружения сдвигов земной поверхности в районе Сихоте-Алиньской гряды за период с 05.02.2015 г. по 07.09.2017 г.:  
 а) радиолокационное изображение; б) результат при измерениях в НН поляризации; в) результат при измерениях в НV поляризации.

На рис. 4 представлена подобная иллюстрация обнаружения подвижек земной поверхности по информации скошенного интерферометра в двух проходах при  $\alpha \approx 2^\circ$  на примере наблюдения за равнинной поверхностью Астраханской области со сложной подповерхностной обстановкой. Естественно, что за почти два года эта сложная газотрубная подповерхностная структура подвергалась естественному природному влиянию, что выражается в некоторых подвижках. Эти подвижки через фазо-разностную и поляризационную обработку

при скошенном обзоре (даже при таком малом отклонении луча по азимуту) отображаются на представленных яркостных фрагментах.

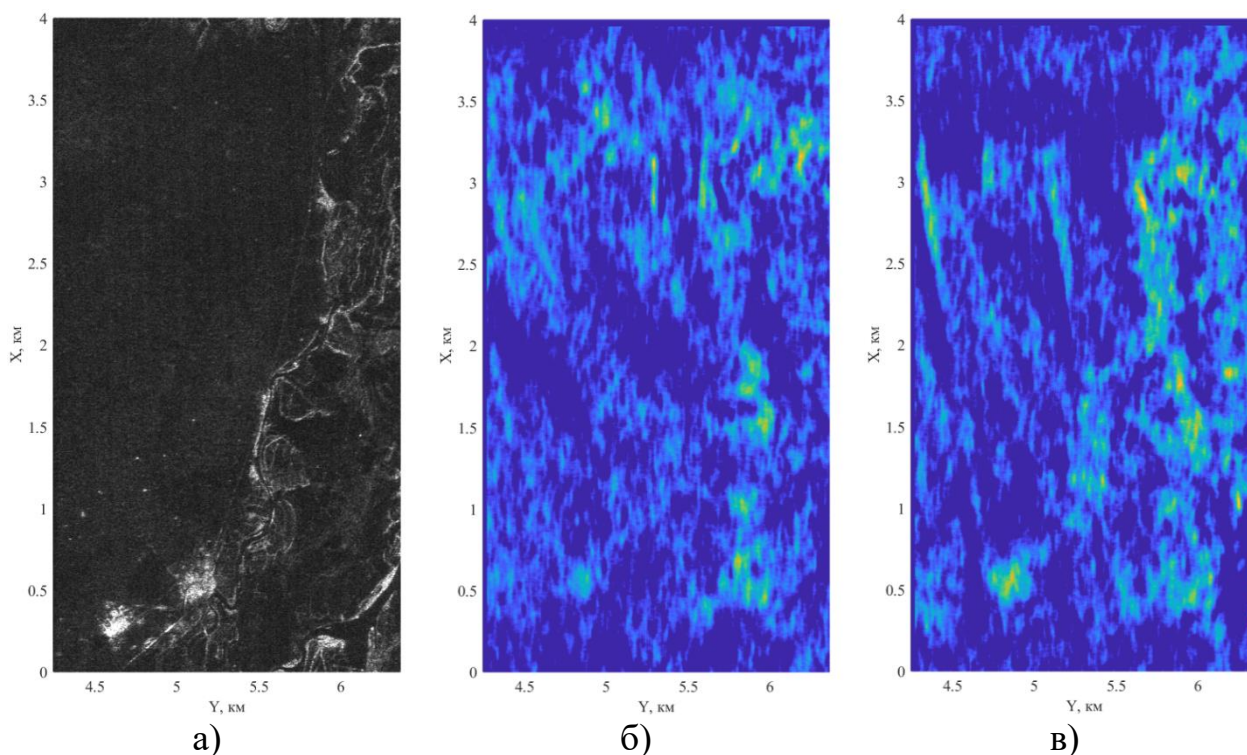


Рис. 4. Экспериментальная проверка обнаружения сдвигов земной поверхности в районе Астраханской области за период с 24.03.2015 г. по 12.12.2017 г.: а) радиолокационное изображение; б) результат при измерениях в HH поляризации; в) результат при измерениях в HV поляризации.

Как и в предыдущем случае, вначале следует РЛИ, а затем – два фазовых изображения в амплитудном представлении. В данных примерах следует обратить внимание на перекрестную поляризацию, где особенно проявляются подвижки подповерхностных структур.

## Заключение

На современном этапе перед многопроходными или мультивременными интерферометрическими комплексами РСА обоснованно ставится задача обнаружения подвижек рельефа, протекающего во времени и в пространстве, с целью наблюдения за процессами и явлениями на земной поверхности.

Использование многопроходности для решения различных прикладных задач позволяет формировать разнообразные варианты методов и алгоритмов

квазилинейного обнаружения сдвигов рельефа ПП, при потенциальной точности оценивания на уровне десятых долей длины волны излучения передатчика РСА.

Представленные результаты экспериментов, анализа достоинств и ограничений рассмотренного ДИСПА при однопроходном переднебоковом обзоре земной поверхности, позволяют сделать вывод о возможности обнаружения и измерения сдвигов земной поверхности с компенсацией пространственных и временных искажений сигналов за счёт фазо-разностной обработки многомерных сигналов.

**Финансирование:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00507, <https://rscf.ru/project/24-29-00507/>

### Литература

1. Кондратенков Г. С., Фролов А. Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие для вузов/ Под. ред. Г. С. Кондратенкова. – М.: Радиотехника, 2005. – С. 368.
2. Школьный Л. А. и др. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений. – М.: изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. – С. 531.
3. Верба В. С. и др. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования; – М.: Радиотехника, 2010. – С. 680 с.
4. Бабокин М. И. Авиационные и космические комплексы дистанционного зондирования Земли с интерферометрической обработкой многомерных сигналов: дис. – ГУП НПЦ «Спрут», 2010. – С. 336.
5. Захаров А. И. Методы дистанционного зондирования земли радарными с синтезированной апертурой: дис. – ИРЭ РАН, 2013. – С. 370.
6. Moreira A. et al. A tutorial on synthetic aperture radar // IEEE Geoscience and remote sensing magazine. – 2013. – Т. 1. – №. 1. – С. 6-43.
7. Ouchi K. Recent trend and advance of synthetic aperture radar with selected topics // Remote Sensing. – 2013. – Т. 5. – №. 2. – С. 716-807.

8. Fornaro G., Pascazio V. SAR interferometry and tomography: Theory and applications // Academic Press Library in Signal Processing. – Elsevier, 2014. – Т. 2. – С. 1043-1117.
9. Бабокин М. И. и др. Однопроходный интерферометр при переднебоковом обзоре // Радиотехника. – 2014. – №. 7. – С. 16-20.
10. Шимкин П. Е., Бабокин М. И., Баскаков А. И. Исследование точности однопроходного переднебокового РСА интерферометра при измерении рельефа поверхности Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – Т. 14. – №. 5. – С. 103-112.
11. Шимкин П. Е., Баскаков А. И., Бабокин М. И. Способ измерения рельефа поверхности Земли. Патент РФ 2643790. Рег. 06.02.2018.
12. Ka M. H. et al. A new single-pass SAR interferometry technique with a single-antenna for terrain height measurements // Remote Sensing. – 2019. – Т. 11. – №. 9. – С. 1070.
13. Бабокин М.И., Шимкин П.Е. Применение РСА космического базирования в режиме однопроходного переднебокового обзора для томографического исследования Земли // Современные проблемы ДЗЗ из космоса. 2023. № 2. – С. 49–59.

**Для цитирования:**

Бабокин М.И., Шимкин П.Е. Обнаружение сдвигов земной поверхности с помощью однопозиционного РСА космического базирования в режиме переднебокового обзора. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – № 8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.8.10>