

Однопроходная космическая интерферометрия с одним РСА на орбите

М.И. Бабокин¹, В.Г. Степин², М.П. Титов¹

¹АО «Аэрокон», 140187 г. Жуковский, Московская обл., ул. Жуковского, 1

E-mail: m.baboki57@mail.ru

²АО «НИИП им. Тихомирова», 140180, г. Жуковский, ул. Гагарина, д.3

E-mail: vitalii.stepin@mail.ru

Космический РСА интерферометр с одним КА на орбите, обладает максимальной оперативностью, помехозащищённостью, простотой реализации, возможностью одновременного формирования парных сигналов. В работе представлен анализ достоинств и недостатков однопроходного космического интерферометра при скошенном обзоре, позволяющего восстанавливать местный рельеф в одном проходе с точностью, сопоставимой с пространственной разрешающей способностью и обнаруживать подвижки земной поверхности с компенсацией пространственных и временных искажений сигналов. Представлены результаты экспериментальной отработки.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированием апертуры (РСА), космический аппарат (КА), интерферометр, однопроходная съёмка, подповерхностное зондирование, цифровая карта рельефа

Single-pass space interferometry with one SAR in orbit

M.I. Babokin¹, V.G. Stepin², M.P. Titov¹

¹ JSC «Aerocon»

² JSC «SRIIE named after V.V. Tikhomirov»

The space radar interferometer with one spacecraft in orbit has maximum efficiency, noise immunity, ease of implementation, and the possibility of simultaneous formation of paired signals. The paper presents an analysis of the advantages and disadvantages of a single-pass space interferometer with a beveled view, which makes it possible to restore the local relief in one pass with an accuracy comparable to spatial resolution and detect movements of the Earth's surface with compensation for spatial and temporal signal distortions. The results of experimental testing are presented.

Keywords: synthetic aperture radar (SAR), spacecraft, interferometer, single-pass survey, subsurface sounding, digital terrain map

Введение

В современных комплексах ДЗЗ интерферометрический мониторинг земной поверхности рассматривается как один из основных способов целевого применения, существенным образом увеличивающий информативность за счет использования фазы отраженного сигнала, как носителя полезной информации [1–7].

Известны способы многопроходной интерферометрии или однопроходные с несколькими КА на орбите [1–7], но они подвержены влиянию временной и пространственной декорреляции парных сигналов РСА интерферометров, что значительно снижает их эффективность.

К однопроходным интерферометрам можно отнести бистатический комплекс РСА с двумя или более КА на орбите. Их достоинства широко известны [8–12], но сложность реализации и стоимость превосходит издержки создания любого известного интерферометрического комплекса.

Целью работы является анализ особенностей построения космического комплексов РСА интерферометра с одним КА на орбите, обладающего максимальной оперативностью, помехозащищённостью, простотой реализации, возможностью практически одновременного формирования парных сигналов и т.д.

Безусловно, такой способ обладает и недостатками, разбором которых и посвящена работа, а также обоснованию способов минимизации их влияния.

Геометрическое описание работы интерферометра

Для описания физических процессов в РСА космического базирования [1,2,3] используют прямоугольную подвижную путевую систему координат (ПСК) $O_0X Y Z$, расположенную в ЦМ КА, ориентированную таким образом, что вектор относительной скорости КА, с учетом вращения Земли, в данной точке орбиты W в начальный момент времени $t = 0$ находился в плоскости $X O_0Z$.

При ориентации КА в ПСК (см. рис.1), продольная ось КА по мере движения КА в течение витка поворачивается параллельно следу КА так, что средняя доплеровская частота вдоль оси O_0Y равна нулю.

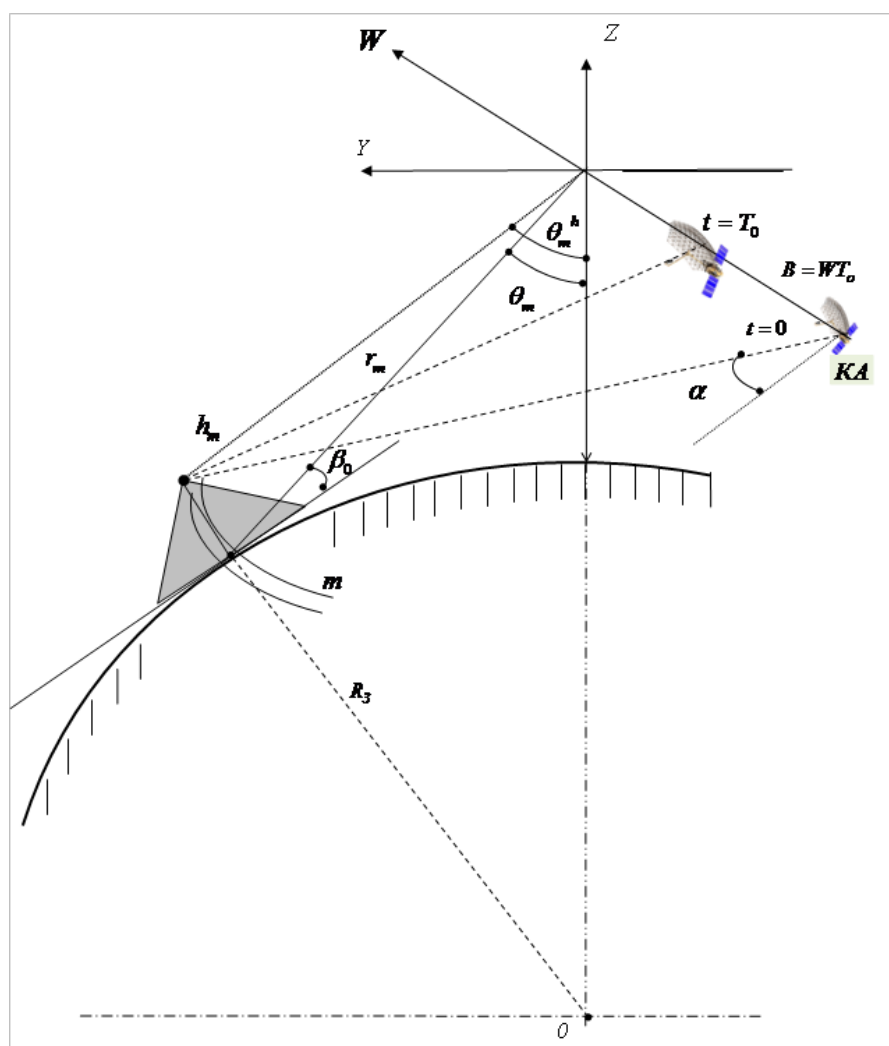


Рис. 1. Геометрическая схема РСА интерферометра при скошенном обзоре

Высота орбиты КА и дальность действия РСА космического базирования таковы, что пренебречь кривизной поверхности Земли при геометрических построениях не

удается. Геометрическая схема радиолокационного наблюдения в ПСК для большой дальности и небольшой ширины зоны обзора, показаны на рис. 1

Расстояние от ФЦА до центра m -ой полосы дальности на земной поверхности, определяемой импульсной формой когерентного зондирующего сигнала (разрешающей способностью) в начальный момент времени, можно определить по теореме синусов:

$$r_m(0) = R_3 \frac{\cos(\theta_m + \beta_0)}{\sin \theta_m}, \quad (1)$$

где θ_m – угол между направлением на центр m -ой полосы разрешения и направлением в нади́р (угол визирования), $\beta_0 = \arccos \left[(1 + H_0 / R_3) \sin \theta_0 \right]$ – угол между направлением на КА от центра зоны обзора и плоскостью местного горизонта (угол скольжения), $m = -M/2 \dots M/2$ – текущий номер полосы дальности в зоне обзора, равной разрешающей способности РСА по горизонтальной дальности:

$$\delta y_m \approx \frac{\delta r}{\sin(\theta_m + \beta_0)}, \quad \delta r \text{ – разрешающая способность по наклонной дальности.}$$

Особенности построения скошенного интерферометра

Для задач интерферометрии важно знать разность фаз двух позиций, а в нашем случае разность в двух смежных сеансах наблюдения:

$$\Delta \varphi_m(t, h) \approx \frac{4\pi}{\lambda} (r_m(t + T_0, h) - r_m(t, h)) \approx \delta \varphi(h) + \delta \varphi_m + \delta \varphi(t), \quad (2)$$

где $\delta \varphi(h) \approx \frac{4\pi}{\lambda} \left\{ \alpha \frac{h_m}{R_3} \sin \theta_m B_0 \right\}$ – отклонение фазы местного рельефа,

$$\delta \varphi_m \approx -\frac{4\pi}{\lambda} \{ \alpha \sin \theta_m B_0 \} \text{ – отклонение фазы «ровной» поверхности,}$$

$$\delta \varphi(t) \approx \frac{4\pi}{\lambda r_m} 2B_0 W t \text{ – линейное отклонение фазы «ровной» поверхности}$$

(относительный частотный сдвиг парных сигналов).

Пример: $T_c \approx 2c$, $T_0 \approx 1c$, $B_0 \approx 10 \text{ км}$, $\lambda = 9 \text{ см}$, $W = 7000 \text{ м/с}$, $r_m = 700 \text{ км}$.

Если $\delta \varphi(t) \approx \frac{4\pi}{\lambda r_m} \{ 2B_0 W t \}$, то $\delta f \approx 4 \frac{B_0 W}{\lambda r_m} \approx 3 \text{ кГц}$, которое необходимо

компенсировать, но встаёт вопрос точности. Прежде всего – это точность знания путевой скорости: $\delta f^{ocm} \approx 8 \frac{T_0 W}{\lambda r_m} \delta W \approx 0.1 \dots 0.001 \text{ Гц}$, когда $\delta W \approx 0.1 \dots 0.01 \text{ м/с}$. Так, что

при ширине фильтра РСА $\delta f_\phi \approx 0.5 \text{ Гц}$ этот остаток приведёт к искажению парных сигналов. Их можно оценить через коэффициент пространственной корреляции [1, 2]:

$$r_e(\Delta x, T_0) \approx \frac{\delta x' \sin(w_x \delta x')}{\delta x w_x \delta x'}, \quad (3)$$

где $w_x = \frac{2\pi \sin \theta_m B_0}{\lambda r_m}$, $\delta x' = \delta x - \Delta x$, $\Delta x \approx \delta x \frac{\delta f^{ocm}}{\delta f_\phi}$,

δx – линейная разрешающая способность по азимуту.

Во-первых, необходимо обеспечить высокую парную корреляцию при отсутствии ошибки δW : $r_e(0, T_0) \approx \frac{\sin(w_x \delta x)}{w_x \delta x} \geq 0.8$, отсюда $T_0 \leq T_c / 3$.

Во-вторых, необходимо учесть влияние $\delta W : r_e (\Delta x, T_0) \approx 0.7$, когда $\delta W \approx 0.1 м/с$.

При разработке интерферометрического комплекса с одним КА на орбите целесообразно повысить требования к точности измерения путевой скорости: $\delta W \approx 0.01 м/с$, тогда базовый параметр интерферометра можно увеличить: $T_0 \leq T_c / 2$, при соответствующем повышении точности измерения местного рельефа.

Повышение точности

Точность измерения относительного рельефа местности однопроходного скошенного интерферометра [1, 2] можно оценить следующим образом (без учёта усреднений):

$$\sigma \approx \frac{(\lambda R_3)}{(4\pi B_0 \alpha \sin \theta_m)} \sqrt{\left(\frac{1}{q_{c/ш}} + \frac{(1-r_e)}{2} \right)}.$$

Пример: $B_0 \approx 10 км$, $\lambda = 9 см$, $\alpha = 10^\circ$, $q_{c/ш} = 20 дБ$, $r_e \approx 0.8$. В этом случае $\sigma \approx 10...15 м$.

Безусловно, за счёт усреднения и фильтрации, точность измерения местного рельефа можно повысить в 2...3 раза (изменится шаг независимой выборки). Однако однопроходный способ построения РСА интерферометра обладает одной интересной особенностью: можно реализовать многосеансную съёмку (больше двух сеансов) в одном проходе с применением одного КА с РСА при скошенном обзоре, когда комплексное изображение одного участка поверхности Земли формируется много раз в пределах одного рабочего участка орбиты. То есть можно получать последовательно несколько интерферометрических измерений относительного рельефа на одном участке траектории полёта КА с последующей их фазовой коррекцией и комплексной обработкой. Это обеспечит значительное повышение точности измерения рельефа местности в одном проходе.

Предположим, в одном проходе имеем $k = 0...K$ циклов формирования парных сигналов для интерферометрических измерений. В каждом цикле меняется угол отклонения синтезированного луча от нормали к линии пути $\alpha_k = \arcsin\left(\frac{X_{m0} - k\Delta B}{r_m^k \sin \theta_m}\right)$,

где $\Delta B \geq B_0$, $X_{m0} = r_m^k \sin \theta_m \sin \alpha$. Повторные циклы измерения следуют со сдвигом вдоль линии пути ΔB . Это расширяет суммарную базу и, следовательно, повышает точность восстановления относительного рельефа.

До получения оценки в разных циклах измерения необходимо произвести фазовую коррекцию текущей комплексной пары:

$$\hat{h}_{mn}^k \approx \left(\frac{\lambda R_3}{4\pi \sin \theta_m \sin \alpha_k B_0} \right) \arg \left\{ e_{mn}^{k0} e_{mn}^{k1} \exp\{j\Delta\hat{\phi}_{mn}^k\} \right\}, \quad (4)$$

где $\Delta\hat{\phi}_{mn}^k \approx \frac{4\pi}{\lambda} \left\{ \hat{h}_{mn}^{k-1} \frac{B}{R_3} \left(\frac{X_{0m} - k\Delta B}{r_m^k} \right) \right\}$.

Это означает, что получив текущий результат комплексного сопряжения, требуется его фазовая коррекция путём комплексного умножения на дискретную функцию $\exp\{j\Delta\hat{\phi}_{mn}^k\}$, рассчитанную по оценке высоты предыдущего цикла. Фактически имеет место процедура рекуррентного оценивания высоты местного рельефа.

Для подтверждения работоспособности алгоритма повышения точности оценивания (3) были обработаны реальные голограммы КА с РСА Кондор-Э $\lambda = 9\text{ см}$, представленные на рис. 2а. Первым следует фрагмент РЛИ гористой местности с перепадом высот до 2400 м вблизи ГЭС Гранд-Кули. Затем карта относительного рельефа этого же района, сформированная по информации одной пары сигналов. А вот далее следует цифровая модель местного рельефа ЦМРЗ, сформированная по информации трёх пар сигналов в соответствии с алгоритмом (3). Изображения представлены в координатах наклонная дальность (вдоль, диапазон 0...6 км), азимутальная дальность (поперёк, диапазон 0...12 км).

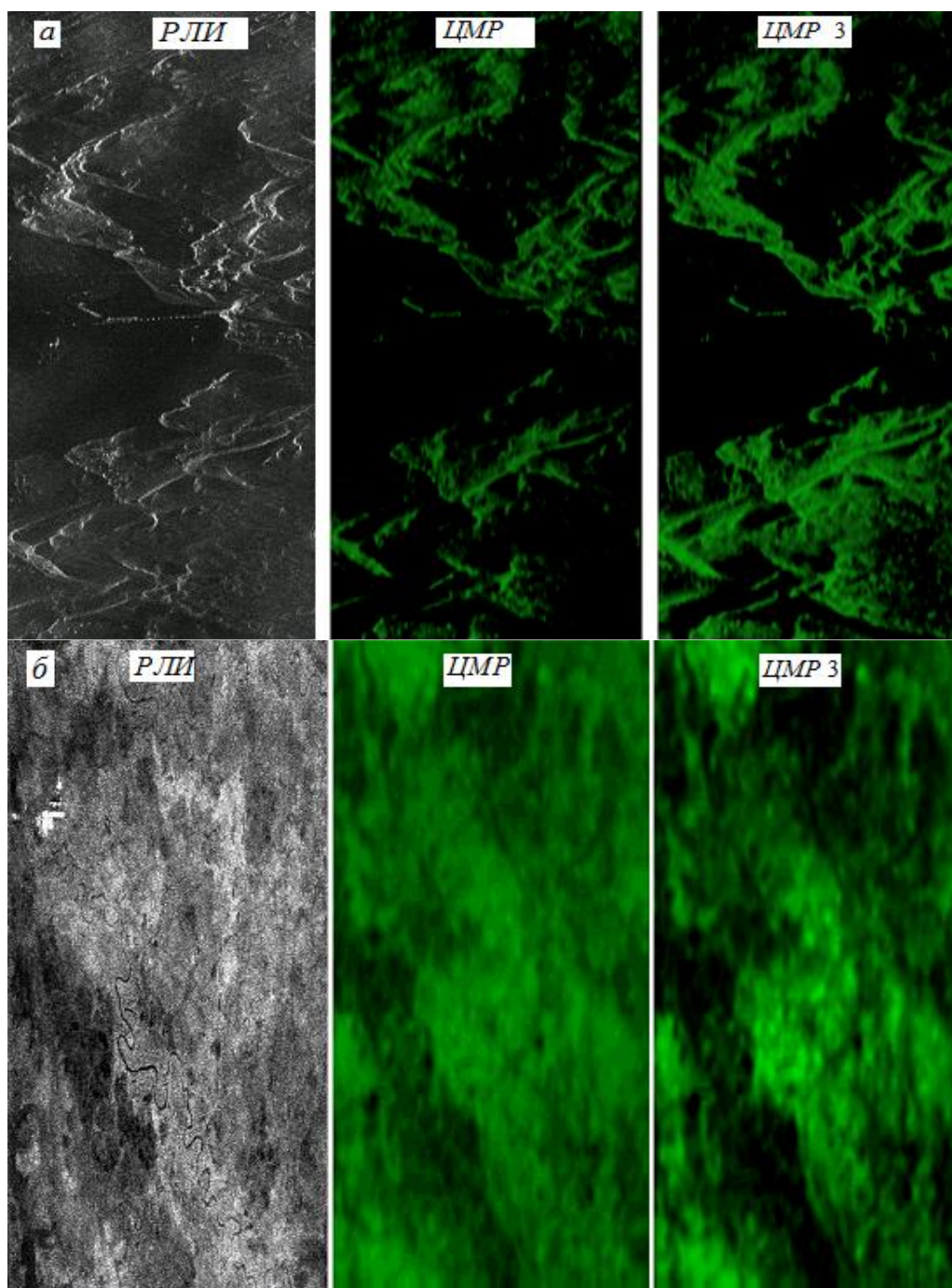


Рис. 2. Результаты обработки повышения точности

Для представления ЦМР использовался яркостной принцип, когда яркость изображения пропорциональна высоте местного рельефа (максимальная яркость соответствует высоте $h = 2400 \text{ м}$).

Интересным для анализа представляется низкочастотный диапазон $\lambda = 24 \text{ см}$. На рис. 2б представлено РЛИ гористой местности Сихоте-Алиньской гряды с перепадами высот местного рельефа до $500 \dots 1000 \text{ м}$. Затем карта относительного рельефа этого же района, сформированная по информации одной пары сигналов. Далее следует модель местного рельефа ЦМРЗ, сформированная по информации трёх пар сигналов, в соответствии с (3). Диапазон отклонений синтезированного луча $\alpha_k = 0.75 \dots 2^\circ$. На одном участке полёта КА сформированы по три измерения через интервал: $\Delta B = 3 \cdot B \approx 9 \text{ км}$, $B \approx 3 \text{ км}$. Всего участок интерферометрического измерения составил $L \approx 27 \text{ км}$. Очевидно, что рекуррентное измерение по трём парам сигналам значительно точнее, чем по одной паре. Количество интервалов обработки парных сигналов определяется тактическими ограничениями и допустимыми геометрическими искажениями. При скошенном обзоре не более единиц градусов таких интервалов можно сформировать не более $3 \dots 5$. При большем отклонении луча антенны их можно сформировать больше.

Подвижки земной поверхности

Обычно [1, 11–14] для достижения точности измерения подвижек земной поверхности, соразмерной с потенциальной (доли длины волны), необходимо совмещать изображения до сотых долей элемента разрешения, а фазовые искажения между сеансами наблюдения должны быть не более нескольких градусов. Безусловно, решение таких задач диктует применение высокоточного навигационного обеспечения, фазовых систем глобального и дифференциального (относительного) позиционирования, высокоточных цифровых карт местности, дополнительных корреляционных и адаптивных методов обработки для выявления искажений и т.д.

Скошенный интерферометр позволяет получать измерение сдвигов по изменению собственно рельефа в разных сеансах наблюдения без применения подобных систем и адаптивных методов, поскольку обеспечивает в реальном времени, в одном проходе, без временных и пространственных искажений восстановление местного рельефа.

Чем-то подобным обладает бистатистический комплекс, поскольку в одном проходе, одновременно получает парные сигналы для измерения местного рельефа и ему не страшны пространственные и временные искажения.

Поскольку стоимость и решение задач высокоточного взаимного позиционирования затрудняют реализуемость бистатистического проекта, возвращаемся к скошенному интерферометру.

Итак, скошенный интерферометр в разных проходах имеет независимые фазоразностные изображения без временных и пространственных искажений, сопрягать которые значительно проще, особенно после усреднения и фильтрации.

На рис. 3а, 3б представлена иллюстрация возможности обнаружения сдвигов земной поверхности по информации скошенного интерферометра в двух проходах при $\alpha \approx 2^\circ$ на примере наблюдения за гористым районом Сихоте-Алиньской гряды с перепадами высот местного рельефа до $500 \dots 1000 \text{ м}$ (рассматривался ранее). Следует отметить, что в этом районе производится активная горная добыча ископаемых.

Вначале представлены соответствующие РЛИ с пространственной разрешающей способностью около 20 м , длина волны $\lambda = 24 \text{ см}$. Затем следуют два фазовых изображения рис. 3а и рис. 3б в амплитудном представлении (чем больше амплитуда, тем больше фазовая разность). Это результат измерения подвижек поверхности земли

через отклонение местного рельефа, полученного скошенным интерферометром в двух сеансах наблюдения, следующих через два с половиной года. Рельеф местности, восстановленный по информации одного прохода, представлен на рис. 26. Результаты получены для согласованной HH и перекрёстной HV поляризации, которые имеют значительные структурные изменения и могут нести дополнительную информацию о физических процессах подвижек земной поверхности.

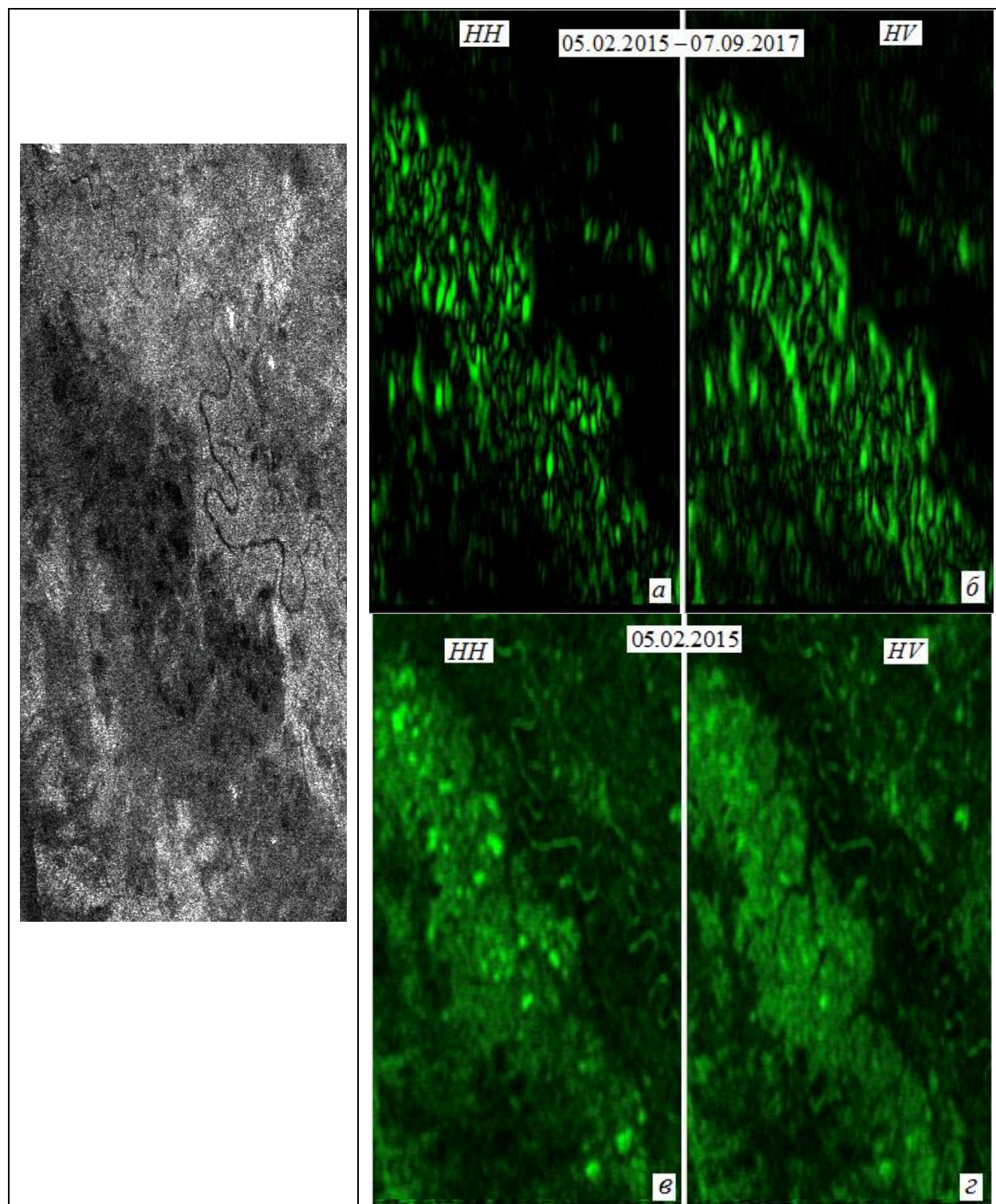


Рис. 3. Экспериментальная проверка обнаружения подвижек и подповерхностного мониторинга

А вот на рис. 3в и рис. 3г представлены фазовые портреты подповерхностного мониторинга, полученные с помощью скошенного интерферометра с малой базой по сигналу РСА одного прохода КА 05.02.2015 с разными поляризациями. Интересно было сравнить результаты по одному участку местности для двухпроходного и однопроходного скошенного интерферометра, тем более, что длины волны $\lambda = 24\text{см}$. В этом случае проникающая способность ЭМВ [5] достигает значительных величин.

Анализ результатов показывает, что в одной области (между горами гряды) подвижки достигают 15...20см за промежуток времени более двух лет. Можно выделить изменения в структуре поверхностного слоя. Попытки восстановить рельеф и подвижки рельефа классическим многопроходным методом не увенчались успехом.

С результатами подповерхностного мониторинга присутствует значительная корреляция. Видно, что отклонения в этих фазовых портретах можно использовать для прогнозирования будущих подвижек земной поверхности.

Заключение

Таким образом, в работе представлен анализ, достоинств и недостатков однопроходного космического интерферометра при скошенном обзоре, позволяющего восстанавливать местный рельеф с точностью, сопоставимой с пространственной разрешающей способностью и измерять подвижки земной поверхности с компенсацией пространственных и временных искажений сигналов за счёт фазоразностной обработки сигналов каждого прохода КА.

Литература

1. Бабокин М.И. Авиационные и космические комплексы дистанционного зондирования Земли с интерферометрической обработкой многомерных сигналов: дис. ... д-ра тех. наук. М., 2010. 336 с.
2. Бабокин М.И., Ефимов А.В., Карпов О.А., Титов М.П. Однопроходный интерферометр при переднебоковом обзоре // Радиотехника. 2014. №7. С.16-20.
3. Баскаков А.И., Жутяева Т.С., Лукашенко Ю.И. Локационные методы исследования объектов и сред. Учебник для студентов высших учебных заведений; под ред. А.И. Баскакова. М.: Издательский центр «Академия», 2011. – 384 с.
4. Бабокин М.И. Измерение сдвигов земной поверхности в комплексах дистанционного зондирования Земли // Информационно-измерительные и управляющие системы. № 8. 2010. С.25-34.
5. Волосюк В.К., Кравченко А.В., Ксендзук А.В., Кутуза Б.Г. Оптимизация пространственно-временной обработки при подповерхностном картографировании на фоне мешающих отражений от верхней границы раздела сред. // Радиотехника. №1. 2007. С.24-32.
6. Захаров А.И. Методы дистанционного зондирования Земли радарными с синтезируемой апертурой: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 2012. 370 с.
7. Козлов А.И., Логвин А.И., Сарычев В.А. Поляризация радиоволн. Кн.2. Радиолокационная поляриметрия. – М.: Радиотехника, 2007. 520 с.
8. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие для вузов / Под. ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: Радиотехника, 2005. 368с.
9. Шимкин П.Е., Бабокин М.И., Баскаков А.И. Исследование точности однопроходного переднебокового РСА интерферометра при измерении рельефа поверхности Земли // Современные проблемы ДЗЗ из космоса. 2017. № 5. С.103-112.
10. Школьный Л.А., Толстов Е.Ф. и др. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений: учебник для курсантов

- ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского. / Под ред. Л.А. Школьного. – М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. 531 с.
11. Fornaro G., Lombardini F., Serafino F. Three-dimensional multipass SAR focusing: experiments with long-term spaceborne data // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 43. No. 4. Pp. 702-714. April 2005, doi: 10.1109/TGRS.2005.843567.
 12. Fornaro G., Pascazio V. SAR interferometry and Tomography: Theory and Applications // *Academic Press Library in Signal Processing*. Vol. 2. 2014. Elsevier Ltd. Pp. 1043-1117, DOI: 10.1016/B978-0-12-396500-4.00020-X.
 13. Ka M.-H., Shimkin P.E., Baskakov A.I., Babokin M.I. A New Single-Pass SAR Interferometry Technique with a Single-Antenna for Terrain Height Measurements // *Remote Sens*. 2019, 11, 1070. doi: 10.3390/rs11091070.
 14. Khoshnevis S.A., Ghorshi S. A tutorial on tomographic synthetic aperture radar methods. *SN Appl. Sci.* 2, 1504 (2020). doi: 10.1007/s42452-020-03298-6.
 15. Moreira A., Prats-Iraola P., Younis M., Krieger G., Hajnsek I., Papathanassiou K.P. A tutorial on synthetic aperture radar // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*. Vol. 1. No. 1. Pp. 6-43. March 2013, doi: 10.1109/MGRS.2013.2248301.
 16. Ouchi K. Recent trend and advance of synthetic aperture radar with selected topics // *Remote Sensing*. 2013. Vol. 5. No. 2. Pp.716-807.
 17. Richards M. A. *Fundamentals of radar signal processing*. New York: McGrawHill, 2022. 513 p.