

## Обнаружение сдвигов на земной поверхности с помощью РСА интерферометра при переднебоковом обзоре

М.И. Бабокин<sup>1</sup>, А.В. Ефимов<sup>1</sup>, С.Э. Зайцев<sup>2</sup>, В.В. Костров<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ЗАО «АЭРОКОН», г. Жуковский, ул. Гагарина, 1, e-mail: m.baboki@hotmail.ru,

<sup>2</sup>АО «ВПК «НПО Машиностроения», г. Реутов, ул. Гагарина, 33, e-mail: zaisergeri@mail.ru

<sup>3</sup>Муромский институт Владимирского государственного университета, г. Муром, ул. Орловская, 23, e-mail: vvk@mit.ru

*В статье рассмотрены вопросы формирования отраженных сигналов при наличии подвижек земной поверхности. Представлена модель траекторного сигнала, квазиоптимальные алгоритмы совместной обработки сигналов разных проходов при переднебоковом обзоре и результаты оценки точности измерения. Приведены результаты экспериментальной отработки алгоритмов.*

*This article concerns questions about of forming signals reflected from the earth surface with displacements. Trajectory signal model and suboptimal algorithms cooperative signal processing of different observation passage with front lateral review and results value of measurement accuracy are considered. The results of experimental verification of the algorithms are given.*

### Введение

Под изменениями местного рельефа земной поверхности или сдвигами понимается изменение границ, площади и других географических параметров объектов [1, 2]. Эти относительные изменения локальных участков земной поверхности проявляются во времени.

Обнаруживаемые сдвиги могут быть различного происхождения:

- медленные постоянно текущие процессы;
- подвижки и разрушения, возникающие в результате чрезвычайных ситуаций;
- микроизменения локальных высот в результате хозяйственной деятельности человека;
- деградация обваловки заглубленных труб или их восстановления в процессе проведения профилактических работ;
- изменения высоты сельхозкультур на разных стадиях роста и т.п.

Анализ динамики земной поверхности может производиться по энергетическим характеристикам [1–3], но в последнее время всё большее развитие приобретают интерферометрические методы [2–7], которые позволяют анализировать изменения земной поверхности. Интерферометрические методы применимы для отслеживания сдвигов, при которых не нарушается когерентность изображений в разных проходах.

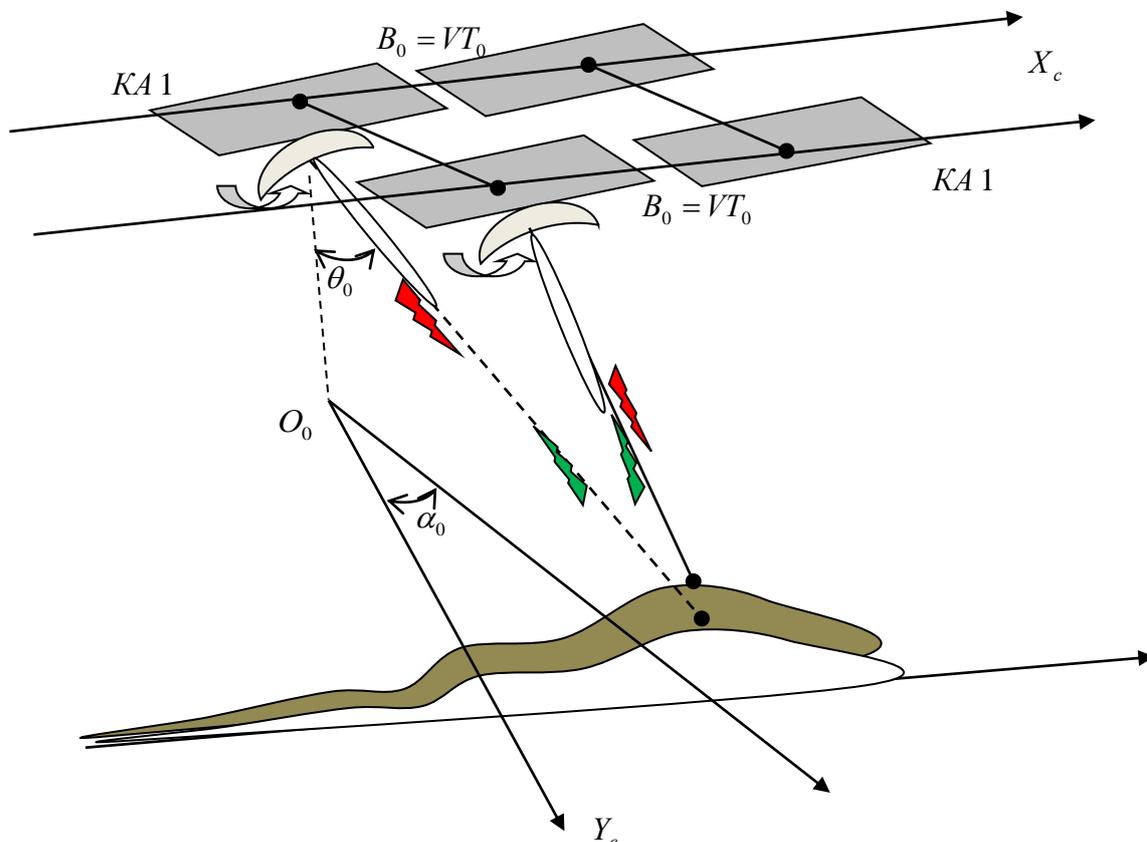
Известно [4, 5], что однопроходный интерферометр при переднебоковом обзоре позволяет достаточно точно, с помощью одного носителя радиолокатора с синтезированием апертуры антенны (РСА) и без дополнительной информационной поддержки получать в каждом проходе относительный рельеф местности и производить в разных проходах (через 10...20 суток для космического РСА) измерения отклонений поверхности. Такой подход должен обеспечить высокую точность сопряжения и низкий уровень временной и пространственной декорреляции за время между проходами носителя РСА, а, следовательно, высокую реальную точность и помехоустойчивость измерений подвижек земной поверхности.

*Цель работы* – рассмотреть модель сигналов многопроходного РСА интерферометра при переднебоковом обзоре и получить алгоритмы оценивания сдвигов земной поверхности с последующей их экспериментальной проверкой.

### Модель сдвигов земной поверхности

Математическая модель изменений рельефа земной поверхности должна не только обладать относительной простотой, но и адекватно описывать физические процессы.

На рис.1 представлена геометрическая схема двухпроходного интерферометра при переднебоковом обзоре с одним носителем РСА для обнаружения подвижек поверхности.



**Рис. 1. Геометрическая схема двухпроходного интерферометра при переднебоковом обзоре**

Наблюдение за выбранным участком земной поверхности производится РСА некоторое время  $T$ , в общем случае превышающее время синтезирования апертуры антенны  $T_c$ . Формируется несколько сеансов наблюдения, количество которых определяется соотношением длины интервала синтезирования РСА и размера базового параметра  $B_0 = VT_0$ , который определяется как смещение сеансов наблюдения вдоль оси  $O_0X_c$ .

На рисунке показано положение носителя РСА в начальный момент времени  $t = 0$  и в момент начала следующего сеанса наблюдения  $t = T_0$ , а затем положение того же КА в двух сеансах через несколько суток при пролёте того же участка поверхности.

Луч реальной диаграммы направленности антенны РЛС при угле падения  $\theta_0$  отклонен вперед на угол  $\alpha_0$  относительно угла «нулевой доплеровской частоты» (при боковом обзоре  $\alpha_0 = 0^\circ$ ). Это условие «скошенности»:  $|\alpha_0| > 0^\circ$ , накладывает дополнительные ограничения на получение карты земной поверхности и усложняет обработку принятого сигнала, но вместе с тем имеет ряд интересных особенностей [5].

Интерферометр организуется за счёт естественного пролёта носителя, когда в разных сеансах наблюдения (интервалах синтезирования) происходят фазовые отклонения, зависящие от высоты местного рельефа. В двух проходах можно анализировать изменения этих фазовых отклонений.

Фрагмент области земной поверхности удобно рассматривать в качестве матрицы, состоящей из пространственно распределённых элементов. Каждый элемент такой матрицы является аналогом пикселя радиолокационного изображения (РЛИ) или дискретной модели радиолокационного рельефа (РЛР) [1 – 3].

Многопроходное построение комплекса РСА для фрагментации изменений местного рельефа определяет дискретность во времени. Для случая описания высоты рельефа земной поверхности в матричном виде разностное уравнение в дискретном времени можно записать в виде:

$$h_{mn}(t_v) = f(h_{mn}(t_{v-1})),$$

где  $h_{mn}(t_v)$  – значение относительного рельефа земной поверхности в момент времени  $t_v$  соответствующего элемента разрешения РЛИ с координатами  $(y_m, x_n)$ ;

$t_v, t_{v-1}$  – дискретное время, соответствующее моментам картографирования определенного участка поверхности в разных проходах;

$\delta t = t_v - t_{v-1}$  – интервал времени между измерениями;

$f(h_{mn}(t_{v-1}))$  – функция, характеризующая процесс изменения земной поверхности.

В последнее время широкое применение нашли модели, использующие в своей основе математический аппарат марковских процессов, называемых марковскими моделями. В ряде работ [6, 7] обосновывается линейная аппроксимация разностного уравнения в дискретном времени:

$$h_{mn}(t_v) = h_{mn}(t_{v-1}) + \Delta_{mn}(t_v),$$

где  $h_{mn}(t_0) = h_{0mn}$  – предварительно измеренный или априорно известный относительный рельеф земной поверхности;

$\Delta_{mn}(t_v)$  – неизвестный сдвиг рельефа земной поверхности, произошедший в период времени  $[t_{v-1}, t_v]$ .

Оцениваемым параметром является сдвиг, который можно представить в виде:

$$\Delta_{mn}(t_v) = \Delta^v_{mn} = \beta_{\Delta}(t_{v-1})\Delta_{mn}(t_{v-1}) + n_{\Delta}(t_v),$$

где  $\beta_{\Delta}(t_{v-1})$  – заданная функция времени;

$n_{\Delta}(t_v)$  – выборки формирующего белого шума с нулевыми математическими ожиданиями и дисперсиями  $D_{\Delta} = N_{\Delta} / (2\delta t)$ ;

$N_{\Delta}$  – спектральная плотность формирующего белого шума.

Каждое новое значение дискретного процесса  $\Delta_{mn}(t_v)$ ,  $v = 0, 1, \dots$ , зависит только от значения  $\Delta_{mn}(t_{v-1})$  в предыдущий момент времени и не зависит от более ранних отсчетов (процесс с конечным последствием или марковская последовательность [6]).

Величина интервала времени между измерениями является ключевой характеристикой, влияющей на сопровождение и фиксирование динамики происходящих процессов. Если процессы имеют сезонный характер, то необходимо использовать интервалы в 2...3 месяца. Когда процессы не периодические, а поступательно развивающиеся, то интервал выбирается с учётом специфики

прикладной задачи. Чем меньше величина интервала, тем больше видны детали происходящих изменений.

### Алгоритм оценивания сдвигов поверхности

Уравнение наблюдаемого сигнала многопроходной РСА с одним носителем РСА при переднебоковом обзоре [4] имеет вид:

$$\xi_m(t) = \mathbf{s}_m(t, \Delta) + \mathbf{n}_m(t),$$

где  $\xi_m(t) = \left\| \xi_m^0(t) \dots \xi_m^V(t) \dots \xi_m^V(t) \right\|^T$  – вектор-функция наблюдаемых сигналов в  $V$  проходах для  $m$ -ой разрешаемой полосы дальности;

$$\mathbf{s}_m(t, \Delta) = \left\| \mathbf{s}_m^0(t, \Delta) \dots \mathbf{s}_m^V(t, \Delta) \dots \mathbf{s}_m^V(t, \Delta) \right\|^T \text{ – вектор-функция сигналов РСА;}$$

$$\mathbf{n}_m(t) = \left\| n_m^0(t) \dots n_m^V(t) \dots n_m^V(t) \right\|^T \text{ – вектор-функция мешающих шумов.}$$

Сообщение о сдвиге местного рельефа в  $\nu$ -ом проходе в дискретном времени представлено в виде вектора-столбца:  $\Delta_m^V = \left\| \Delta_{m0}^V \dots \Delta_{mn}^V \dots \right\|^T$ .

Модель принимаемого сигнала для многопроходного и многосеансного РСА интерферометра при переднебоковом обзоре запишем следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathbf{s}_m^V(t + B_0 l, \Delta) = & \hat{g}^V(t + B_0 l) \times \\ & \times \sum_n \mathbf{e}_{mn} \exp \left\{ -j \left( \Delta \varphi_{mn}^V(t + B_0 l) + \frac{4\pi}{\lambda} (\Delta_{mn}^V + h_{0mn}) \left( 1 + \frac{B_0 * l \cos(\theta_{om}^V) \sin(\alpha_0)}{2R_0} \right) \cos(\theta_{om}^V) \right) \right\}, \end{aligned}$$

где  $\hat{g}^V(t + B_0 l)$  – множитель, учитывающий изменения в  $\nu$ -ом проходе и  $l$ -ом сеансе относительно центра карты при условии «ровной» поверхности;

$e_{mn}$  – выборки дискретной модели РЛР земной поверхности (один точечный отражатель на элемент разрешения) с координатами  $(y_m, x_n)$ ;

$\Delta \varphi_{mn}^V(t + B_0 l)$  – изменение фазы сигнала точечного отражателя с координатами  $(y_m, x_n)$  в  $\nu$ -ом проходе и  $l$ -ом сеансе при условии «ровной» поверхности;

$\theta_{om}^V$  – угол падения относительно фазового центра антенны (ФЦА) РСА в  $\nu$ -ом проходе;

$l$  – номер сеанса наблюдения [5];

$\alpha_0$  – угол отклонения от нормали к вектору движения;

$B_0 = VT_0$  – смещение между сеансами наблюдения однопроходного интерферометра с одним носителем РСА (параметр выбирается из условия декорреляции парных сигналов [5]).

Искажающий голограмму пространственный шум  $n_m^V(t)$  в каждом независимом канале дальности можно считать белым комплексным гаусовским шумом с нулевым математическим ожиданием и корреляционной функцией:

$$R_0(r_m - r_{m+1}, t_1 - t_2, t_\nu - t_{\nu+1}) = N_0 \delta(r_m - r_{m+1}, t_1 - t_2, t_\nu - t_{\nu+1}),$$

где  $N_0$  – односторонняя спектральная плотность шума.

Предположим [6], что начальное значение  $\Delta_{mn}(t_0)$  марковской последовательности является нормально распределенной случайной величиной, поэтому

последовательность  $\Delta_{mn}(t_\nu)$  будет также нормально распределенной, плотность вероятности переходов которой описывается формулой:

$$p\{\Delta_{mn}^V | \Delta_{mn}^{V-1}\} = c \exp\left\{-\left(\Delta_{mn}^V - \beta_{\Delta}^{V-1} \Delta_{mn}^{V-1}\right)^2 \delta t / N_{\Delta}\right\}.$$

По найденному на предыдущем шаге апостериорному распределению  $p\{\Delta_{mn}^V | \xi^{t_{k-1}}\}$ , зная плотность вероятности переходов  $p\{\Delta_{mn}^V | \Delta_{mn}^{V-1}\}$ , и текущее значение наблюдаемого сигнала  $\xi(t)|_{t=[t_{k-1}, t_k]} = \xi_{t_{k-1}}^{t_k}$ , можно найти текущую апостериорную плотность вероятности  $p\{\Delta_{mn}^V | \xi^{t_k}\}$ , с помощью которой из условия минимизации текущего значения условного риска определим оценку  $\hat{\Delta}_{mn}^V$ .

Наблюдаемый сигнал и сообщение связаны нелинейной зависимостью, поэтому воспользуемся приближённым методом марковской теории нелинейной фильтрации [4, 6, 7]. В этом случае оптимальный (квазилинейный) алгоритм оценки сдвигов рельефа многопроходной и многосеансной РСА при переднебоковом обзоре можно записать в виде:

$$\hat{\Delta}_{mn}^V \approx \bar{\Delta}_{mn}^V + \left(\frac{\mathbf{R}_{m\Delta}^V}{N_0}\right) \left\{ \mathbf{P}_m\left(t, \bar{\Delta}\right) - \mathbf{Q}_m\left(t, \bar{\Delta}\right) \right\}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{P}_m\left(t, \bar{\Delta}\right) = \int_{t_{\nu-1}}^{t_\nu} \frac{\partial}{\partial \Delta} \bar{\mathbf{s}}_m(t, \bar{\Delta})^* \times \xi(t)^T dt$ ;

$$\mathbf{Q}_m\left(t, \bar{\Delta}\right) = \int_{t_{\nu-1}}^{t_\nu} \frac{\partial}{\partial \Delta} \bar{\mathbf{s}}_m(t, \bar{\Delta})^* \times \bar{\mathbf{s}}_m(t, \bar{\Delta})^T dt$$
;

$\mathbf{R}_{m\Delta}^V$  – матрица дисперсий ошибок фильтрации;

$$1/\mathbf{R}_{m\Delta}^V \approx 1/(\mathbf{R}_{m\Delta}^{V-1} + \mathbf{D}_{m\Delta}) + \frac{1}{N_0} \int_{t_{\nu-1}}^{t_\nu} \frac{\partial}{\partial \Delta} \bar{\mathbf{s}}_m(t, \bar{\Delta})^* \times \frac{\partial}{\partial \Delta} \bar{\mathbf{s}}_m(t, \bar{\Delta})^T dt$$
;

$\mathbf{D}_{m\Delta}$  – матрица дисперсий формирующих шумов;

$\bar{\Delta}_m(t_\nu) = \beta_{\Delta\nu-1} \hat{\Delta}_m(t_{\nu-1})$  – вектор прогнозируемых оценок;

$\bar{\mathbf{s}}_m(t, \bar{\Delta}) = \left\| \bar{s}_m^0(t, \bar{\Delta}), \dots, \bar{s}_m^V(t, \bar{\Delta}) \right\|^T$  – вектор-функция прогнозируемой модели;

$$\bar{s}_m^V(t + B_0 l, \Delta) = \hat{g}^V(t + B_0 l)^*$$

$$\sum_n \left( G_{mn}^V \right)^2 e_{mn}^{\wedge} \exp\left\{-j \left[ \Delta \varphi_{mn}^V(t + B_0 l) + \frac{4\pi}{\lambda} (\bar{\Delta}_{mn}^V + \hat{h}_{0mn}) \left( 1 + \frac{B_0^* l \cos(\theta_{om}^V) \sin(\alpha_0)}{2R_0} \right) \cos(\theta_{om}^V) \right]\right\};$$

$e_{mn}^{\wedge}$  – элемент оцененной матрицы РЛР земной поверхности в  $(\nu - 1)$ -м проходе;

$\hat{h}_{0mn}$  – оценка рельефа местности, восстановленная в первом проходе при переднебоковом обзоре (многосеансном однопроходном интерферометре).

Итак, алгоритм описывает процесс рекуррентной (многопроходной) нелинейной фильтрации сдвигов земной поверхности по данным многосеансного однопроходного

интерферометра при переднебоковом обзоре, полученный методом текущей линеаризации.

### Потенциальная точность измерения подвижек поверхности

В условиях установившегося итерационного процесса оценивания сдвигов земной поверхности, при условии значительного превышения отраженного от поверхности сигнала над шумами приемника, дисперсию ошибки оценивания сдвигов из выражения (1) можно определить следующим образом:

$$R_{\Delta mn} \approx \frac{N_0}{2 \left( \frac{4\pi}{\lambda} \cos(\theta_m) \left( 1 + \frac{B_0 \cos(\theta_{om}^v) \sin(\alpha_0)}{2R_0} \right) e_{mn} G_{mn}^2 \right)^2}.$$

На рис. 2 представлены зависимости ошибки оценивания сдвигов земной поверхности от угла падения. Расчеты проводились для различных соотношений сигнала/шум на выходе системы обработки РСА.

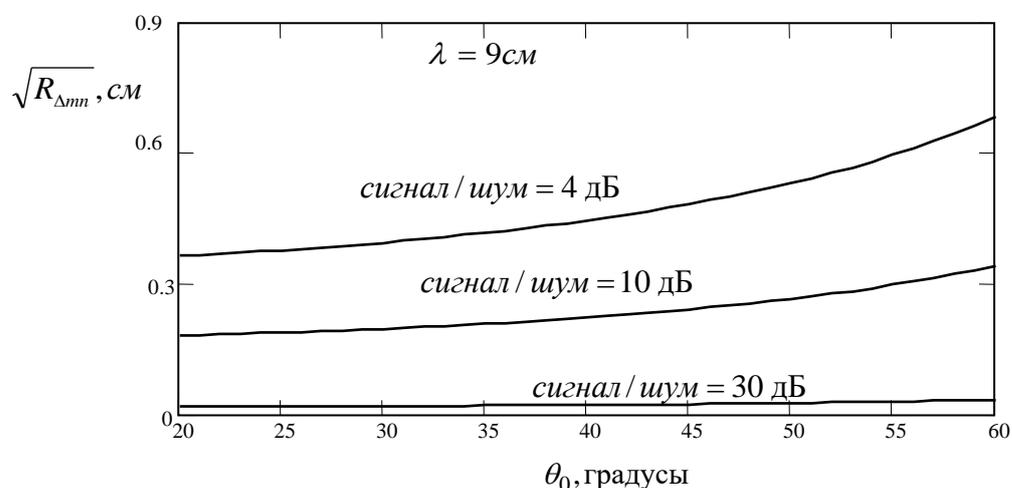


Рис. 2. Зависимости потенциальной точности оценивания сдвигов земной поверхности

Из анализа зависимостей можно сделать вывод, что потенциальная точность оценивания изменений земной поверхности может достигать десятых долей длины волны излучения в широком диапазоне углов.

Параметры «скошенного» однопроходного интерферометра не столь значительно влияют на потенциальную точность оценивания. Реально его влияние может сказываться через ошибку оценивания местного рельефа в различных проходах: уклоны, движение, искусственные объекты и т.п., потому немало усилий потребуется для компенсации влияния этих явлений.

Обычно [2], для достижения точности, соразмерной с потенциальной, необходимо совмещать изображения до 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.

Метод, представляемый в статье, позволяет получать высокоточное измерение сдвигов без применения подобных систем, поскольку обеспечивает в реальном времени (в одном проходе), без значительной временной и пространственной декорреляции

парных сигналов, восстановление местного рельефа, с последующим обнаружением, фильтрацией и классификацией сдвигов поверхности по изменению рельефа во времени (от прохода к проходу).

### Экспериментальная проверка работоспособности

На рис. 3 – 5 представлена иллюстрация возможности обнаружения сдвигов земной поверхности в двух проходах при «скошенном» построении однопроходного интерферометра ( $\alpha_0 \approx 1^\circ \dots 1,3^\circ$ ) на примере наблюдения за гористым районом местности (рис. 3), сложной береговой линии (рис. 4) и земной поверхности с активной хозяйственной деятельностью (рис. 5) с помощью космического РСА комплекса «Кондор-Э» [8].

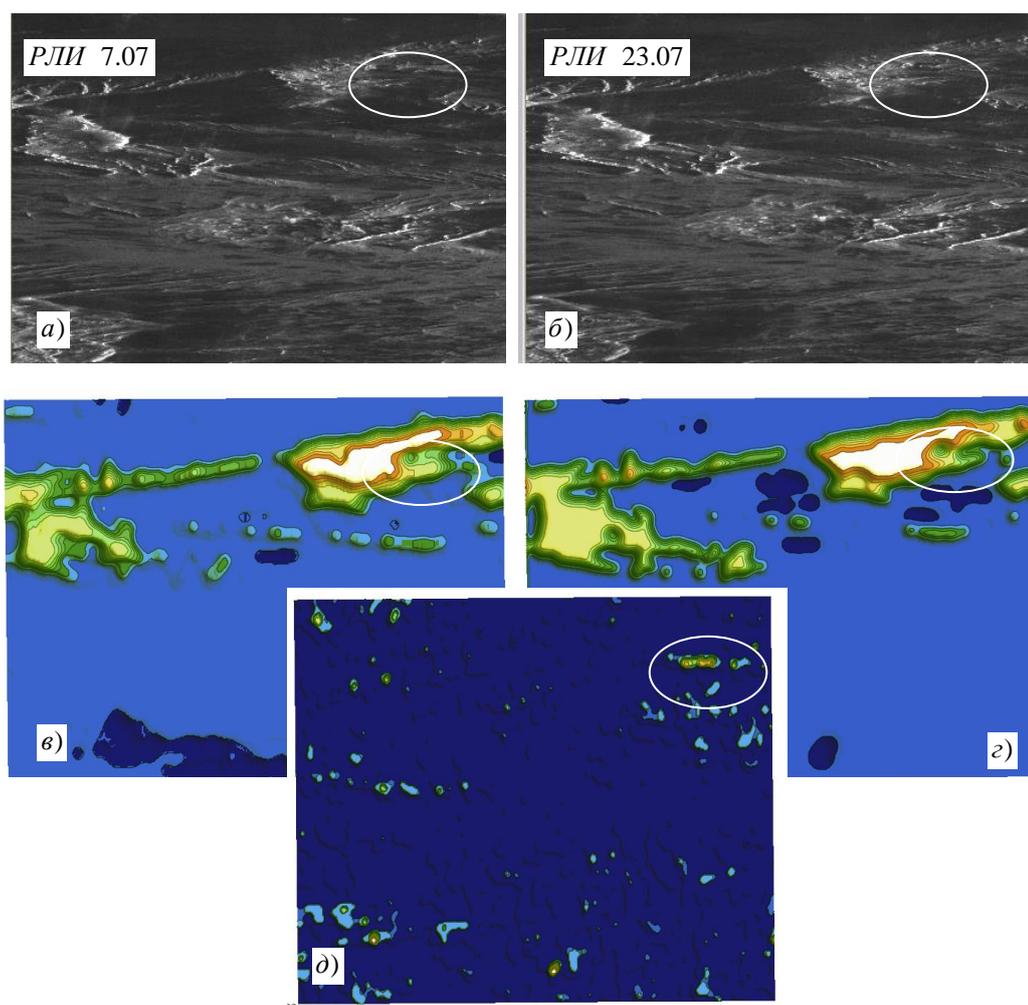


Рис. 3. Иллюстрация работы обнаружителя подвижек в гористой местности (Аляска)

Вначале представлены соответствующие радиолокационные изображения (РЛИ) с пониженной пространственной разрешающей способностью (рис. 3,а и рис. 4.б), полученные в результате РСА ообработки по сигналам, записанным через 16 дней. Во втором случае наклонная дальность на 9 км меньше. На РЛИ отмечена область детального анализа – зоны активного изменения структуры сигнала, где вероятны пространственные изменения типа «снежная лавина», подвижка ледников и т.п.

На рис. 3,в и рис. 3,г представлена пара оценок местного рельефов (перепад высот до 1600 м), полученных независимо в первом и втором проходе за счёт формирования однопроходного интерферометра при переднебоковом обзоре. Яркость и цвет определяют относительную высоту.

Что можно сказать о произведённых измерениях местного рельефа:

– отличается средний уровень из-за относительного пространственного смещения носителя в разных проходах.

– гористая местность вносит свою специфику: уклоны, обрывы, тени, поэтому в районе гор есть ложные фазовые отклонения,

– на краях контрастных объектов также возможны дополнительные фазовые искажения.

Вместе с тем оценки местного рельефа в двух проходах близки и их можно сравнивать, а также производить обнаружение относительных отклонений, а значит подвижек земной поверхности.

На следующем рис. 3,д представлена отфильтрованная разность двух восстановленных местных рельефов, полученная в соответствии с (1).

Далее производилась фазовая фильтрация, «нацеленная» на выделение изменений пространственно-стационарных площадных объектов. Цвет и яркость определяют величину сдвига поверхности.

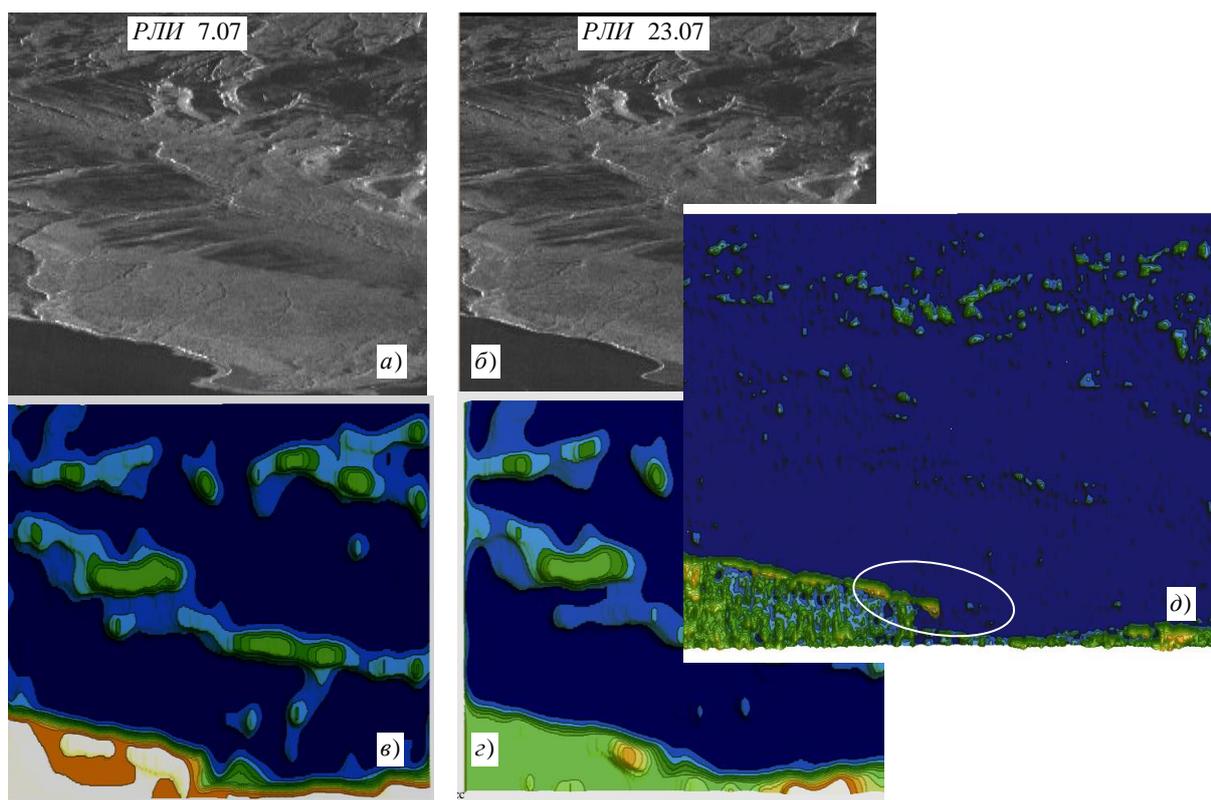
Вернёмся к выделенной зоне. В этой области действительно находим фазовое подтверждение изменений в структуре РЛИ, где устойчиво «детектируется» площадная подвижка в гористой местности, которая возможна из-за значительного снежного покрова в горах и температурного контраста (например, сход снега с гор).

На рис. 4 представлены подобные результаты интерферометрической обработки другого участка Аляски (проходы космического аппарата с РСА те же) с участком моря и сложной береговой линии. На рис. 4,а и рис. 4,б заметных отличий нет. Отклонения можно заметить в фазовой области: сначала, сравнивая восстановленные местные рельефы (рис. 4,в и рис. 4,г), а затем результат обработки двух комплексных сигналов, в соответствии с (1).

Во-первых, изменился отражённый от моря фазовый портрет (изменился ветер, волна и т.п), во-вторых, произошли локальные подвижки береговой линии, причём локальность подвижек (есть участки полного совпадения) говорит о правдopodobности измерений. Можно отметить участок «островного» отделения (отмечено на рис. 4,д). В это время перепад температур (днём и ночью) на Аляске достигал  $12^{\circ}\dots 17^{\circ}$ , поэтому при сильном ветре вполне оправдана подобная деградация береговой линии.

Скорее всего, как ложные следует отметить отклонения в гористой местности, которые могли быть спровоцированы затенениями, уклонами и тем, что повторный проход проходил со значительным ракурсным отклонением. Возможны также снежные сходы.

На следующем рис. 5 представлены результаты интерферометрической обработки при скошенном обзоре участка в окрестности г. Прет (Австралия) для иллюстрации возможности наблюдения за хозяйственной деятельностью. Отличие от предыдущих экспериментальных материалов состоит в том, что на рис. 5,в и рис. 5,г представлены не восстановленные местные рельефы, а фазовые портреты без дополнительной фильтрации высотного приведения, поскольку объекты хозяйственной деятельности имеют локальный характер.



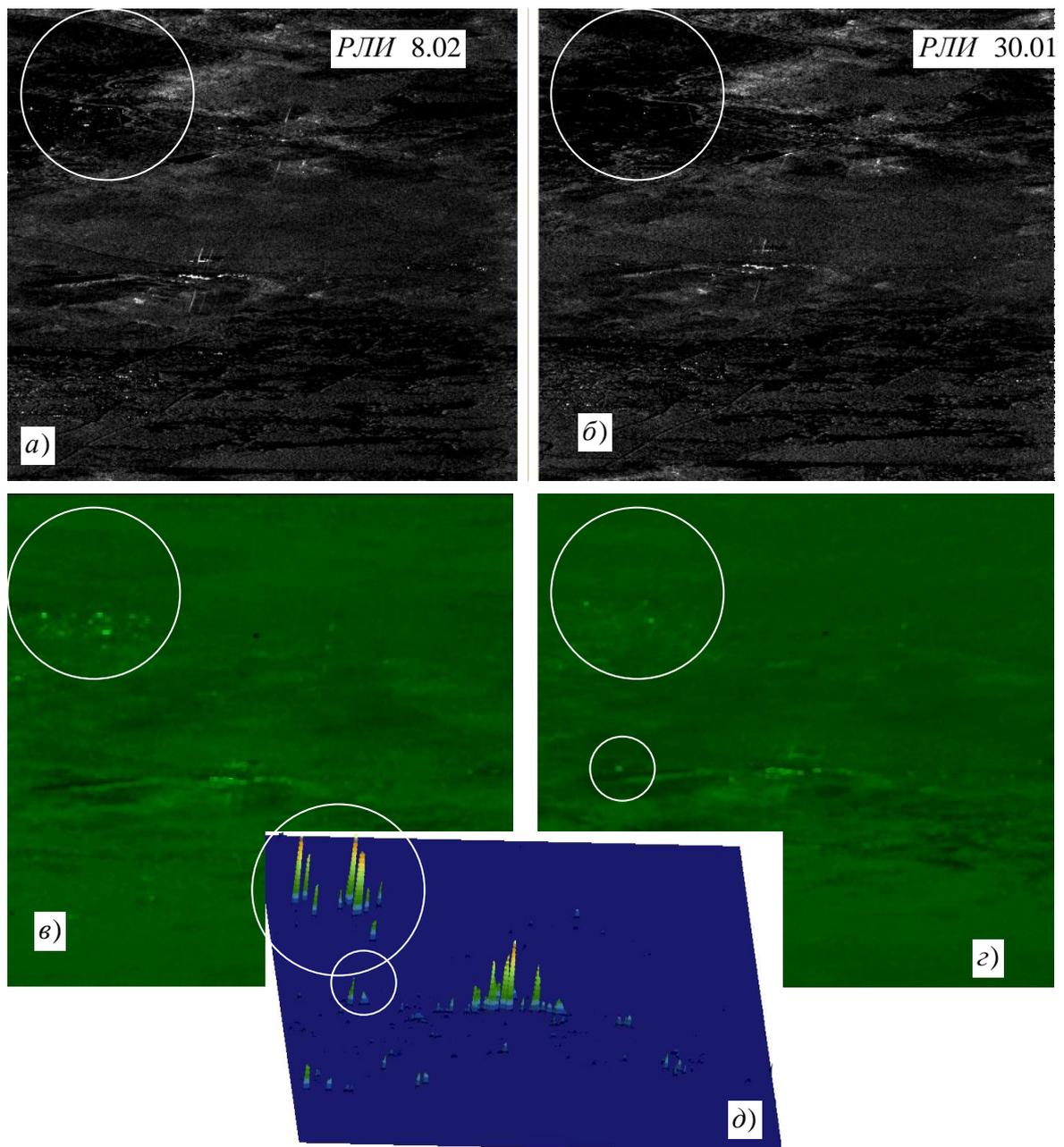
**Рис. 4. Иллюстрация работы обнаружителя подвижек в прибрежном районе (Аляска)**

На РЛИ (рис. 5,а и рис. 5,б) можем найти изменения в структуре сигнала, но не столь значительные, чтобы проводить достоверное обнаружение, а вот на фазовом портрете эти отклонения выделены относительно фона поверхности (участок помечен кругом). Особенно эти подвижки заметны на карте обнаружения рис. 5,д.

Относительный рельеф местности не превышает 50...100 м, поэтому ложных отклонений не так много как в гористой местности и они не столь значительны. Лишь один «высотный» объект искусственного или естественного происхождения даёт значительные фазовые отклонения (в центре). Трудно сказать, чем вызвана эта аномалия: ракурсными искажениями (дальность в двух проходах отличается на 15 км) на контрастном высотном объекте или структурными изменениями природного или искусственного характера.

Трудно представить, что произошло за десять дней, но на выделенном участке, где уже проходила какая-то деятельность, за этот период появилось ещё группа подобных объектов или изменений на поверхности. Их можно выделить и индивидуально оценить.

Кроме того, на рис. 5,г был одиночный объект (малый круг), который через десять дней пропал. Скорее всего это была отметка движущегося объекта.



**Рис. 5. Иллюстрация работы обнаружителя подвижек при хозяйственной деятельности (Австралия)**

Таким образом, в работе обоснована модель сигнала многопроходной РСА при переднебоковом обзоре, получены оптимальные алгоритмы обработки и оценена точность измерения сдвигов на земной поверхности за счёт фильтрации отклонений восстановленного при однопроходной «скошенной» интерферометрии рельефа местности, а также проведена экспериментальная отработка полученных алгоритмов с положительным результатом.

#### **Литература**

1. Замятин А.В., Марков Н.Г. Анализ динамики земной поверхности по данным дистанционного зондирования Земли. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 176 с.

2. Lombardini F. Differential Tomography: A New Framework for SAR Interferometry // IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing. – 2005. – Vol. 43. No.1, January. – Pp.37-45.
3. Геоинформатика: в 2 кн. / Е.Г. Капралов, А.В. Кошкарев, В.С. Тикунов и др.; Под ред. В.С. Тикунова. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – Кн. 1 – 400 с; Кн. 2 – 426 с.
4. Бабокин М.И. Измерение сдвигов земной поверхности в комплексах дистанционного зондирования Земли // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2010. – №8. – С.25-34.
5. Бабокин М.И., Ефимов А.В., Карпов О.А., Титов М.П. Однопроходный интерферометр при переднебоковом обзоре // Радиотехника. – 2014. – №7. – С.16-20.
6. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. – М.: Радио и связь, 2004. – 608 с.
7. Тихонов В.И. Оптимальный приём сигналов. – М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.
8. Бабокин М.И., Ефимов А.В., Зайцев С.Э., Карпов О.А., Костров В.В., Неронский Л.Б., Савосин Г.В., Титов М.П., Толстов Е.Ф., Турук В.Э., Цветков О.Е. Итоги и уроки лётных испытаний РСА малого космического аппарата «Кондор-Э» // VI Всероссийские Армандовские чтения: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред: VII Всероссийская научная конференция (31.05–2.06. 2016 г., Муром). – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2016. – С.16-36.