

Применение дифференциального интерферометрического РСА для обнаружения кратковременных изменений на поверхности Земли

М. И. Бабокин^{1,2}, П. Е. Шимкин², В. Г. Степин²

¹ АО «АЭРОКОН», Жуковский, Московская обл., 140180, Россия
E-mail: m.baboki57@mail.ru

² Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250, Россия
E-mails: shimkinpy@mpei.ru, stepin.vitalii@mail.ru

Рассмотрены особенности построения и основные характеристики радиолокационного интерферометрического комплекса дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) на базе однопозиционного космического радиолокатора с синтезированной апертурой антенны (РСА), работающего в режиме однопроходного переднебокового наблюдения. Определены условия функционирования и требования к информационному обеспечению системы дифференциальной разностно-фазовой обработки сигналов, полученных по данным однопроходного интерферометрического РСА (ИРСА). Проверена работоспособность предложенного подхода к разработке комплекса ИРСА для обнаружения быстротекущих процессов на земной (морской) поверхности по относительному фазовому смещению разновременных сигналов земной поверхности по реальным радиоголограммам, воссозданным по открытым данным ДЗЗ. Продемонстрирована возможность использования предлагаемой схемы построения интерферометрического комплекса с одним РСА на орбите при решении задач получения дополнительной информации о состоянии поверхности Земли. Синтезированы квазиоптимальные алгоритмы оценки основных целевых параметров на основе методов статистической теории оценивания и оптимальной фильтрации.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой антенны (РСА), интерферометрический РСА (ИРСА), метод дифференциальной интерферометрии, результаты эксперимента

Одобрена к печати: 15.10.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-117-129

Введение

Радиолокационный мониторинг с применением дифференциальных интерферометрических комплексов с помощью радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) в целях дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) активно развивается и остаётся актуальным, открывая новые возможности многомерной обработки сигналов с извлечением пространственно-разностно-фазово-поляризационной информации, заключённой в отражённых от Земли эхо-сигналах (Бабокин, 2010; Верба и др., 2010; Захаров, 2012; Кондратенков, Фролов, 2005; Школьный и др., 2008; Richards, 2022). Так, 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 (Баскаков и др., 2011; Волосюк, Кравченко, 2008; Замятин, Марков, 2007; Fornaro, Pascazio, 2014; Moreira et al., 2013; Ouchi, 2013; Richards et al., 2013; Tebaldini, Monti Guarnieri, 2010) и уже были продемонстрированы для отслеживания временных изменений недр природных сред, а также для обеспечения повышенной чувствительности к био- и геофизическим параметрам.

Как следует из приведённых выше источников, дифференциальный РСА-интерферометр использует многопроходную схему, когда медленные изменения во времени обнаруживаются в отражённых сигналах через некоторое время от прохода к проходу одного или нескольких космических аппаратов (КА) с РСА. Однако кроме медленных процессов на земной поверхности часто проявляются быстротекущие: вулканические проявления, сходы вод, селей,

ветровые движения, движения объектов на поверхности, движение ветровых и внутренних волн и т. п. Именно подобному направлению применения дифференциального интерферометра с использованием всего одного аэрокосмического аппарата с РСА на борту и посвящена эта работа: обоснование возможности фазоразностных наблюдений кратковременных изменений, связанных с движением и отклонением рельефа земной или морской поверхности.

Известно, что однопроходный интерферометр при переднебоковом обзоре обладает рядом преимуществ, которые позволяют достаточно точно с помощью одного носителя РСА и без дополнительных технических сложностей получать необходимую информацию для организации дифференциальных измерений (Бабокин, 2010; Бабокин, Шимкин, 2023; Шимкин и др., 2017; Ka et al., 2019; Zakharov, Denisov, 2019). Аналог-прототип в виде бистатического дифференциального комплекса РСА имеет потенциальные характеристики выше, чем однопроходный, но вопросы реализации, стоимости и пространственно-временного сопряжения парных сигналов заставляют провести детальный анализ однопроходного варианта скошенного интерферометра, особенно с мультитременной организацией радионаблюдения.

Цель настоящей работы состоит в обосновании возможности наблюдения за быстротекущими процессами на поверхности Земли или моря с помощью космического однопроходного дифференциального мультитременного РСА-интерферометра, работающего в режиме переднебокового обзора, обеспечивающего высокую точность сопряжения парных сигналов, низкий уровень временной и пространственной декорреляции, а также оперативность, надёжность и простоту реализации. Для достижения заданной в работе цели рассмотрена математическая модель сигналов дифференциального РСА-интерферометра при скошенном обзоре и получены оптимальные алгоритмы фазоразностной обработки парных сигналов с последующим обоснованием точности измерений, а также продемонстрированы результаты экспериментальной обработки радиолограмм, полученных в ходе лётных испытаний космического РСА.

Математическая модель наблюдения

Математическая модель быстротекущих изменений рельефа земной (морской) поверхности должна не только обладать относительной простотой используемого математического аппарата, но и адекватно описывать физические процессы. Существует несколько различных критериев классификации моделей изменения земной поверхности. Среди них наиболее важными являются такие, как уровень детальности описания и вид используемого математического аппарата. Так, фрагмент области земной поверхности удобно рассматривать в виде матрицы, состоящей из пространственно-распределённых элементов. Существуют определяющие энергетические характеристики эффективной поверхности рассеяния (ЭПР), но для полного представления воспользуемся функцией радиолокационного рассеяния (РЛР) объекта исследования e_{mn} , представляемой в виде дискретной матрицы, каждый m -й элемент которой определяется как среднее на площадке пространственного разбиения размером в элемент разрешения Δx , Δy (в направлении вдоль линии визирования — по азимуту, и в ортогональном направлении — по горизонтальной дальности). Модуль каждого элемента РЛР пропорционален корню квадратному из удельной ЭПР и пространственной разрешающей способности, а фаза определяется свойствами объекта, условиями полёта, наблюдения и параметрами многоканального РСА. В работе (Бабокин, Карпов, 2008) показано, что интервал корреляции сигнала разрешаемой площадки однородной земной поверхности равен интервалу синтезирования РСА, поэтому в дальнейшем будем считать модуль и фазу модели РЛР неизменными на интервале синтезирования.

Однопроходный способ построения РСА дифференциального интерферометра реализуется при многосеансной однопроходной съёмке Земли (как минимум два сеанса наблюдения) с применением единственного 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 такого типа дифференциального интерферометра с РСА (ДИРСА) при переднебоковом обзоре. Пространственное разнесение приёмных апертур обеспечивается за счёт естественного перемещения КА при движении с путевой скоростью V на орбите $R_{КА}$ при высоте полёта H . Наблюдение земной поверхности ведётся при отклонённом угле α_0 , угле падения θ_0 и дальности r_0 в первом сеансе наблюдения. Через определённый интервал времени T_0 , соответствующий смещению носителя вдоль линии пути на расстояние $B_0 = VT_0$, второй сеанс возобновляется, так что значительная часть сигналов первого и второго сеансов повторяется, что определяет их высокую степень корреляции. Формируется несколько сеансов наблюдения, количество которых определяется отношением T_c/T_0 (T_c — время синтезирования апертуры размером L , $T_0 < T_c$).

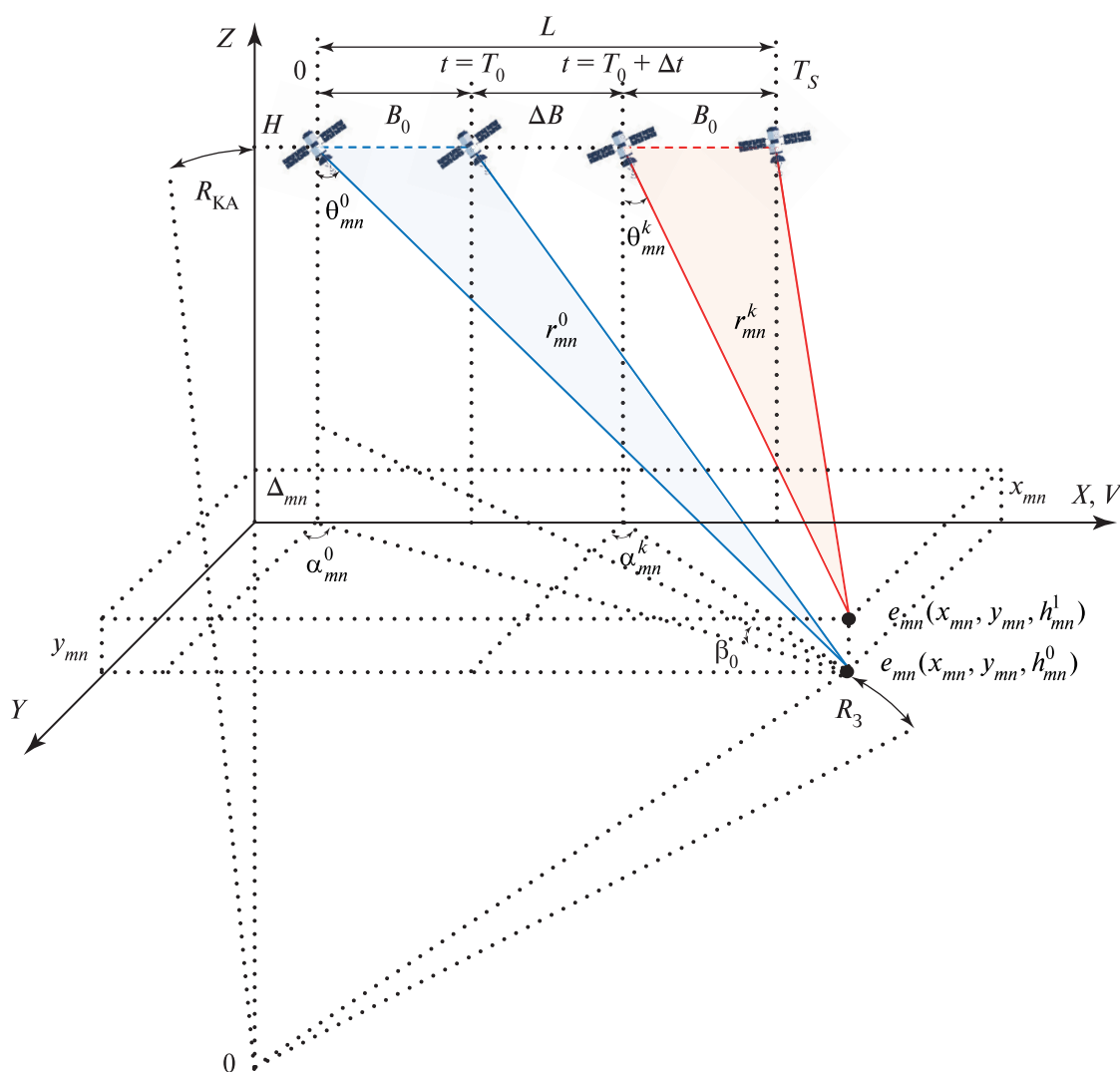


Рис. 1. Геометрия визирования однопозиционного ДИРСА переднебокового обзора

Для описания физических процессов в РСА космического базирования часто используют прямоугольную подвижную путевую систему координат (ПСК) XYZ , расположенную в центре масс КА, ориентированную таким образом, чтобы вектор относительной скорости V с учётом вращения Земли в данной точке орбиты в начальный момент времени находился

в плоскости XZ . Для малых интервалов синтезирования (менее 10 с) с учётом плавности траектории и ориентации оси X вдоль вектора V можем записать:

$$x(t) \approx Vt; \quad y(t) \approx 0,5a_y t^2; \quad z(t) \approx H + 0,5a_z t^2,$$

где a_y, a_z — линейное ускорение КА вдоль осей Y и Z .

На *рис. 1* 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 интервал Δt при стабилизации луча реальной диаграммы направленности антенны на одном участке земной (морской) поверхности. Парные сигналы для интерферометра организуются за счёт естественного пролёта носителя, когда в разных сеансах наблюдения происходят фазовые отклонения, зависящие от состояния местного рельефа. Таким образом, через интервал Δt , соответствующий смещению КА вдоль линии пути на расстояние $\Delta B = V\Delta t$, формируется следующая пара сигналов для следующего интерферометра. Количество подобных пар определяет мультитременной процесс пространственного наблюдения, и анализ этих фазовых отклонений даёт информацию об изменении рельефа морской или земной поверхности.

Для случая описания местного рельефа в матричном виде разностное уравнение в дискретном времени можно записать следующим образом:

$$h_{mn}^k = f(h_{mn}^{k-1}), \quad (1)$$

где $h_{mn}^k = h_{mn}(t_k)$, $h_{mn}^{k-1} = h_{mn}(t_{k-1})$ — значение местного рельефа в моменты времени t_k и t_{k-1} соответствующего элемента разрешения радиолокационного изображения (РЛИ) с координатами (x_m, y_n) .

Внутри m -й независимой полосы дальности описание рельефа ведётся дискретно с шагом по азимуту в элемент разрешения РСА для каждого из $n = 0, \dots, N$ элементов дискретной модели РЛР, поэтому считаем дискретные выборки местного рельефа h_{mn}^k некоррелированными по дальности и азимуту.

Поскольку сообщение и принимаемый сигнал имеют случайную природу, то естественно воспользоваться для их описания общей теорией статистических решений и, в частности, байесовским подходом к синтезу оптимальных алгоритмов. Формулировка классической задачи фильтрации (оценивания) случайных процессов отличается тем, что анализируемый массив параметров рельефа местности в общем случае не постоянен, а изменяется в процессе наблюдения (т. е. является функцией времени t). В задаче синтеза определения сдвигов земной поверхности будем считать сдвиг, протекающий во времени. Можно сказать, что каждое новое значение оцениваемого случайного процесса зависит только от значения в предыдущий момент времени и не зависит от более ранних отсчётов. Такой дискретный процесс в теории случайных процессов занимает особое место и носит название «процесса с конечным последствием», или «марковской последовательностью» (Тихонов, Харисов, 2004).

В ряде работ (например, (Замятин, Марков, 2007)) обосновывается линейная аппроксимация разностного уравнения (1) в дискретном времени:

$$h_{mn}^k = h_{mn}^{k-1} + \Delta_{mn}^k,$$

где Δ_{mn}^k — неизвестный сдвиг рельефа, произошедший на интервале времени $[t_{k-1}, t_k]$.

Таким образом, оцениваемым параметром является сдвиг:

$$\Delta_{mn}^k = \gamma_{\Delta}^{k-1} \Delta_{mn}^{k-1} + n_{\Delta}^k,$$

где γ_{Δ}^{k-1} — заданная функция времени; n_{Δ}^k — выборка формирующего белого шума с нулевым математическим ожиданием и дисперсией $D_{\Delta} = N_{\Delta}/(2\Delta t)$, где $\Delta t = t_{k-1} - t_k$ — интервал времени между измерениями; N_{Δ} — спектральная плотность формирующего белого шума.

Целью решения задачи фильтрации служит формирование оптимальной по выбранному критерию оценки $\hat{\Delta}_{mn}^k$ значения массива Δ_{mn}^k в k -й момент времени по реализации наблюдае-

мого сигнала $\xi_{mn}(t) \Big| \{t = [0, t_k)\} = \xi_{mn}^k$ на всём полуинтервале времени $[0, t_k)$, предшествующем появлению нового дискретного отсчёта Δ_{mn}^{k+1} . Основой для её решения служит апостериорная плотность вероятности $p\{\Delta_{mn}^k | \xi_{mn}^k\}$, для вычисления которой на основании формулы Байеса записывается следующее рекуррентное соотношение (Тихонов, Харисов, 2004):

$$\begin{aligned} p\{\Delta_{mn}^k | \xi_{mn}^k\} &= p\{\Delta_{mn}^k | \xi_{mn}^{k-1}\} F\{\xi_{mn}^k | \Delta_{mn}^k\}, \\ p\{\Delta_{mn}^k | \xi_{mn}^{k-1}\} &= \int_{\Delta_{mn}^{k-1}} p\{\Delta_{mn}^{k-1} | \xi_{mn}^{k-1}\} p\{\Delta_{mn}^k | \Delta_{mn}^{k-1}\} d\Delta_{mn}^{k-1}, \\ F\{\xi_{mn}^k | \Delta_{mn}^k\} &= C_1 \left[\frac{1}{N_{\Delta}} \int_{t_{k-1}}^{t_k} |\xi_{mn}(t) - s_{mn}[t, \Delta_{mn}(t)]|^2 dt \right], \end{aligned}$$

где $F(\cdot)$ — функция правдоподобия вектора Δ_{mn}^k при условии, что наблюдается реализация процесса $\xi_{mn}(t) \Big| \{t = [t_{k-1}, t_k)\} = \xi_{mn}^k$ на полуинтервале времени $[t_{k-1}, t_k)$; C_1 — несущественный множитель.

При гауссовом распределении последовательности независимых случайных массивов Δ_{mn}^k , $k = 0, 1, 2, \dots$ получим плотность вероятности переходов дискретного процесса:

$$p\{\Delta_{mn}^k | \Delta_{mn}^{k-1}\} = C_2 \exp \left[-\frac{(\Delta_{mn}^k - \gamma_{\Delta}^{k-1} \Delta_{mn}^{k-1})^2}{N_{\Delta}} \Delta t \right],$$

где C_2 — несущественный множитель.

Каждое новое значение дискретного процесса Δ_{mn}^k зависит только от значения Δ_{mn}^{k-1} в предыдущий момент времени и не зависит от более ранних значений. Такой дискретный процесс в теории случайных процессов носит название процесса с конечным последствием, или, как упоминалось ранее, марковской последовательностью.

Алгоритмы фильтрации дискретных процессов или рекуррентного оценивания случайных величин могут быть получены в полном соответствии с теорией решений и байесовским подходом как алгоритмы минимизации среднего риска для каждого момента времени t_k , $k = 0, 1, 2, \dots$:

$$\min_{\hat{\Delta}_{mn}(t_k)} = \int_{-\infty}^{\infty} [\Delta_{mn}^k - \hat{\Delta}_{mn}^k]^2 p\{\Delta_{mn}^k | \xi_{mn}^k\} d\Delta_{mn}^k.$$

Отметим, что особенность оптимальных алгоритмов, полученных в результате применения марковской теории фильтрации случайных процессов, заключается в том, что эти алгоритмы сразу могут быть записаны в виде рекуррентных разностных соотношений или дифференциальных уравнений, что в ряде случаев становится их несомненным достоинством.

Интервалы времени между парными сеансами T_0 и смежными измерениями Δt являются ключевыми значениями, влияющими на основные характеристики дифференциального РСА интерферометра. Например, рассмотрим условия морской поверхности, на которой кроме местных рельефных изменений: волн, приливов, отливов, сложных береговых процессов с выходом внутренних волн, во избежание «разрушительных» фазовых отклонений между сеансами наблюдения, можно определить следующее предельное значение: $T_0^y \leq \Delta y / (100v_y) \approx 3...30$ мс, где Δy — разрешающая способность по горизонтальной дальности, $\Delta y \approx 3...5$ м; v_y — скорость движения волны, $v_y \approx 1...10$ м/с; T_0^f — смещение по доплеровской частоте, $T_0^f \leq (\lambda r_0 \sin \theta_0) / (100v_y V T_c) \approx 1...10$ мс, где $\lambda = 9$ см; $V \approx 7$ км/с; $T_c \approx 1$ с, $r_0 \sin \theta_0 \approx 600$ км. Первое ограничение $\{T_0^y\}$ получено из условия допустимого смещения по дальности между сеансами парного наблюдения (одна сотая часть от величины разрешения по горизонтальной дальности). Второе ограничение $\{T_0^f\}$ — из условия допустимого смещения по доплеровской частоте (одна сотая часть от величины разрешения по частоте).

Ограничения достаточно жёсткие и в самом критическом случае при $v_y \approx 10$ м/с расстояние между парными сеансами наблюдения не может превышать $B \approx 7...10$ м. Однако при условии спокойной морской поверхности или снижении условия допустимости, расстояние между сеансами наблюдения может быть увеличено на порядок, т. е. до $B \approx 50...100$ м.

При мультивременном наблюдении в одном проходе КА имеем k циклов измерения информационного параметра. В каждом k -м цикле меняющийся угол отклонения синтезированного луча определяется с помощью выражения:

$$\alpha_{mn}^k = \arcsin \left[\frac{\left(r_{mn}^0 \sin \theta_{mn}^0 \cdot \sin \alpha_{mn}^0 - k \Delta B \right)}{\left(r_{mn}^k \sin \theta_{mn}^k \right)} \right],$$

где r_{mn}^0, r_{mn}^k — наклонная дальность до центра m -, n -го элемента разрешения в момент времени $t = 0$ и k -м цикле соответственно, $r_{mn}^0, r_{mn}^k = R_3 \cos(\theta_{mn}^k + \beta_0) / \sin \theta_{mn}^k$; R_3 — радиус Земли, $R_3 \approx 6371$ км; β_0 — угол скольжения в момент времени $t = 0$, $\beta_0 = \arccos \left[(1 + H/R_3) \sin \theta_{mn}^0 \right]$; $\alpha_{mn}^0, \alpha_{mn}^k, \theta_{mn}^0, \theta_{mn}^k$ — азимутальное и угломестное отклонение антенны КА относительно центра m -, n -го элемента разрешения в момент времени $t = 0$ и k -м цикле соответственно.

Повторные циклы измерения следуют со сдвигом вдоль линии пути ΔB , размер которого больше интервала синтезирования и ограничивается динамикой процесса $\Delta_{mn}(t_k)$. Модель парных сигналов для каждого цикла измерения на входе РСА можно записать для каждого m -, n -го элемента разрешения следующим образом:

$$s_{mn}^k(t) = g \sum_n e_{mn} \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \left[r_{mn}^k(t) \right] \right\},$$

$$s_{mn}^k(t + T_0) = g \sum_n e_{mn} \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \left[r_{mn}^k(t) + \Delta r_{mn}^k(t) + \sin \alpha_{mn}^k \frac{h_{mn}^{k-1} + \Delta_{mn}^k}{r_{mn}^0} \cos(\theta_{mn}^k + \beta_0) B \right] \right\},$$

где g — множитель, учитывающий энергетические возможности РЛС (в том числе модуляцию диаграммы направленности антенны) для прожекторного обзора; e_{mn} — множитель РЛР; $\Delta r_{mn}^k(t)$ — отклонение дальности во втором сеансе наблюдения k -го цикла измерения относительно «ровной» поверхности Земли.

Алгоритм обработки траекторного сигнала

Уравнение наблюдаемого сигнала с одним носителем РСА имеет вид:

$$\bar{\xi}_{mn}(t) = \mathbf{s}_{mn}(t, \bar{\Delta}_{mn}) + \mathbf{n}_{mn}(t),$$

где $\bar{\xi}_{mn}(t)$ — вектор-функция наблюдаемых сигналов в k циклах для m -й разрешаемой полосы дальности, $\bar{\xi}_{mn}(t) = \left\| \xi_{mn}^0(t) \dots \xi_{mn}^k(t) \right\|^T$; $\mathbf{s}_{mn}(t, \bar{\Delta}_{mn})$ — вектор-функция сигналов РСА, $\mathbf{s}_{mn}(t, \bar{\Delta}_{mn}) = \left\| s_{mn}^0(t) \dots s_{mn}^k(t) \right\|^T$; $\mathbf{n}_{mn}(t)$ — вектор-функция мешающих шумов приёма, $\mathbf{n}_{mn}(t) = \left\| n_{mn}^0(t) \dots n_{mn}^k(t) \right\|^T$.

Сообщение о сдвиге земной (морской) поверхности представляется в виде $\bar{\Delta}_{mn} = \left\| \Delta_{m0}^0 \dots \Delta_{mn}^k \right\|$. Искажающий голограмму пространственный шум $n_{mn}^k(t)$ можно считать белым комплексным гауссовским шумом с нулевым математическим ожиданием и корреляционной функцией $R_{\Delta}(r_{mn} - r_{mn+1}, t_1 - t_2, t_i - t_{i+1}) = N_{\Delta} \delta(r_{mn} - r_{mn+1}, t_1 - t_2, t_i - t_{i+1})$.

Особенность синтеза алгоритма фильтрации (оценивания) сдвигов поверхности заключается в том, что анализируемые параметры $\bar{\Delta}_{mn}$ нелинейно связаны с наблюдением $\bar{\xi}_{mn}(t)$. При этом текущая апостериорная плотность вероятности $p \left\{ \Delta_{mn}^k \mid \xi_{mn}^k \right\}$ сообщения Δ_{mn}^k не будет гауссовской даже при гауссовском априорном распределении $p_{ap} \left(\Delta_{mn}^k \right)$, и уже

не удастся записать точного и простого аналитического выражения для вычисления оптимальной оценки $\hat{\Delta}_{mn}^k$.

Для получения алгоритма фильтрации (оценивания) сдвигов земной поверхности воспользуемся методом текущей линеаризации (Тихонов, Харисов, 2004), который заключается в разложении сигнала в ряд Тейлора по компонентам вектора Δ_{mn}^k в окрестности экстраполированной оценки $\bar{\Delta}_{mn}^k$:

$$\mathbf{s}(t, \bar{\Delta}_{mn}^k) = \mathbf{s}(t, \bar{\Delta}_{mn}^k) + \frac{\partial}{\partial \Delta} \mathbf{s}(t, \bar{\Delta}_{mn}^k) \times (\Delta_{mn}^k - \bar{\Delta}_{mn}^k). \quad (2)$$

Подобное (2) разложение определяет гауссовское приближение для апостериорной плотности вероятности:

$$p_{ap}(\Delta_{mn}^k | \xi_{mn}^k) \approx C_2 \exp \left\{ - \left[\frac{\Delta_{mn}^{k*} \Delta_{mn}^{kT}}{N_\Delta} \right] \int_{t_{k-1}}^{t_k} \frac{\partial}{\partial h} \mathbf{s}(t, \bar{\Delta}_{mn}^k)^2 dt + \left[\frac{2}{N_\Delta} \right] \text{Re} \left[\bar{\Delta}_{mn}^k \int_{t_{k-1}}^{t_k} \frac{\partial}{\partial \Delta} \mathbf{s}(t, \bar{\Delta}_{mn}^k)^* \bar{\xi}(t)^T dt \right] \right\}.$$

Учитывая принятую математическую модель сигнала и дискретность РЛР, апостериорную оценку сдвигов можно получить следующим образом (Бабокин, 2010):

$$\left. \begin{aligned} \hat{\Delta}_{mn}^k &\approx \bar{\Delta}_{mn}^k + \left[\frac{\mathbf{R}_\Delta^k}{N_0} \right] \left[\mathbf{P}_k(t, \bar{\Delta}_{mn}^k) - \mathbf{Q}_k(t, \bar{\Delta}_{mn}^k) \right]; \\ \mathbf{P}_k(t, \bar{\Delta}_{mn}^k) &= \int_{t_{k-1}}^{t_{k-1}+T_0+T} \frac{\partial}{\partial \Delta} \mathbf{s}_{mn}(t, \bar{\Delta}_{mn}^k) \times \xi(t)^T dt; \\ \mathbf{Q}_k(t, \bar{\Delta}_{mn}^k) &= \int_{t_{k-1}}^{t_{k-1}+T_0+T} \frac{\partial}{\partial \Delta} \mathbf{s}_{mn}(t, \bar{\Delta}_{mn}^k)^* \times \mathbf{s}_{mn}(t, \bar{\Delta}_{mn}^k)^T dt; \\ \frac{1}{\mathbf{R}_\Delta^k} &\approx \frac{1}{\mathbf{R}_\Delta^{k-1} + \mathbf{D}_\Delta} + \frac{1}{N_0} \int_{t_{k-1}}^{t_k+t} \frac{\partial}{\partial \Delta} \mathbf{s}_{mn}(t, \bar{\Delta}_{mn}^k) \times \mathbf{s}_{mn}(t, \bar{\Delta}_{mn}^k)^T dt, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $\bar{\Delta}_{mn}^k$ — прогнозируемая оценка смещений, $\bar{\Delta}_{mn}^k = \gamma_{\Delta}^{k-1} \bar{\Delta}_{mn}^{k-1}$; $\mathbf{s}_{mn}(t, \bar{\Delta}_{mn}^k)$ — вектор-функция прогнозируемой модели смещений, $\mathbf{s}_{mn}(t, \bar{\Delta}_{mn}^k) = \|\mathbf{s}_{mn}^0(t) \dots \mathbf{s}_{mn}^k(t)\|^T$, отдельные составляющие которой определяются аналогично выражениям (3) согласно уравнениям (Бабокин, 2010):

$$\left. \begin{aligned} s_{mn}^k(t) &= g \sum_n \hat{e}_{mn} \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \left[r_{mn}^k(t) + \Delta r_{mn}^k(t) + \sin \alpha_{mn}^k \frac{\hat{h}_{mn}^{k-1} + \bar{\Delta}_{mn}^k}{r_{mn}^0} \cos(\theta_{mn}^k + \beta_0) \Delta B \right] \right\}; \\ \hat{h}_{mn}^{k-1} &\approx \mathbf{h}_{mn}^{k-1} + \left[\frac{\mathbf{R}_h^{k-1}}{N_0} \right] \left[\mathbf{P}_{k-1}(t, \mathbf{h}_{mn}^{k-1}) - \mathbf{Q}_{k-1}(t, \mathbf{h}_{mn}^{k-1}) \right]; \\ \mathbf{P}_{k-1}(t, \mathbf{h}_{mn}^{k-1}) &= \int_{t_{k-1}}^{t_{k-1}+T_0+T} \frac{\partial}{\partial h} \mathbf{s}_{mn}(t, \mathbf{h}_{mn}^{k-1}) \times \xi(t)^T dt; \\ \mathbf{Q}_{k-1}(t, \mathbf{h}_{mn}^{k-1}) &= \int_{t_{k-1}}^{t_{k-1}+T_0+T} \frac{\partial}{\partial h} \mathbf{s}_{mn}(t, \mathbf{h}_{mn}^{k-1})^* \times \mathbf{s}_{mn}(t, \mathbf{h}_{mn}^{k-1})^T dt; \\ \frac{1}{\mathbf{R}_h^{k-1}} &\approx \frac{1}{\mathbf{R}_h^{k-2} + \mathbf{D}_h} + \frac{1}{N_0} \int_{t_{k-1}}^{t_k+t} \frac{\partial}{\partial h} \mathbf{s}_{mn}(t, \mathbf{h}_{mn}^{k-1}) \times \mathbf{s}_{mn}(t, \mathbf{h}_{mn}^{k-1})^T dt, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $\mathbf{P}_k(t, \bar{\Delta}_{mn}^k)$, $\mathbf{Q}_k(t, \bar{\Delta}_{mn}^k)$ и $\mathbf{P}_{k-1}(t, \mathbf{h}_{mn}^{k-1})$, $\mathbf{Q}_{k-1}(t, \mathbf{h}_{mn}^{k-1})$ — ковариационные матрицы оценок смещений и местного рельефа, рассчитанные по наблюдаемому сигналу и прогнозированной модели; \mathbf{R}_Δ^k и \mathbf{R}_h^{k-1} — матрицы дисперсии ошибок фильтрации оценок смещений и рельефа; \mathbf{D}_Δ и \mathbf{D}_h — матрицы дисперсии формирующих шумов оценок смещений и рельефа; \hat{e}_{mn} — оценка РЛР; \hat{h}_{mn}^{k-1} — апостериорная оценка местного рельефа; \mathbf{h}_{mn}^{k-1} — прогнозированная оценка местного рельефа.

Алгоритм (3), (4) описывает процесс рекуррентной нелинейной фильтрации сдвигов земной поверхности по данным мультивременного РСА интерферометра при скошенном обзоре поверхности, полученный методом текущей линеаризации. При условии значительного превышения отражённого от поверхности сигнала над шумами приёмника для двух циклов измерения данный алгоритм можно упростить до вида:

$$\hat{\Delta}_{mn} \approx \frac{\lambda r_{mn}^0}{4\pi\Delta B \sin \alpha_0 \cdot \cos(\theta_{mn} + \beta_0)} \arg \left\{ \frac{\hat{e}_{mn}^1 (\hat{e}_{mn}^2)^*}{\hat{e}_{mn}(0)^4} \right\}, \quad (5)$$

где $\hat{e}_{mn}^1 = \hat{e}_{mn}(0)\hat{e}_{mn}^*(T_0)$, $\hat{e}_{mn}^2 = \hat{e}_{mn}(0)\hat{e}_{mn}^*(T_0 + \Delta t)$; $\hat{e}_{mn}(0)$, $\hat{e}_{mn}(T_0)$ — оценки РЛР первой пары; $\hat{e}_{mn}(\Delta t)$, $\hat{e}_{mn}(T_0 + \Delta t)$ — оценки РЛР второй пары со смещением ΔB .

В этом случае при минимизации относительной ошибки оценивания \hat{h}_{mn} в выражении (4) в смежных циклах дисперсию ошибки оценивания можно определить с помощью соотношения:

$$\sigma_\Delta^2 \approx \left(\frac{\lambda r_0}{4\pi\Delta B \sin \alpha_0 \cdot \sin \theta_0} \right)^2 q^{-2} n_{\text{уср}}^{-1} \gamma^{-2},$$

где γ — коэффициент корреляции парных сигналов в ДИРСА, $\gamma \approx \sin \left(\frac{2\pi B_0 \Delta y}{\lambda r_0} \right) / \left(\frac{2\pi B_0 \Delta y}{\lambda r_0} \right)$; q — отношение сигнал/шум; $n_{\text{уср}}$ — коэффициент усреднения измерений.

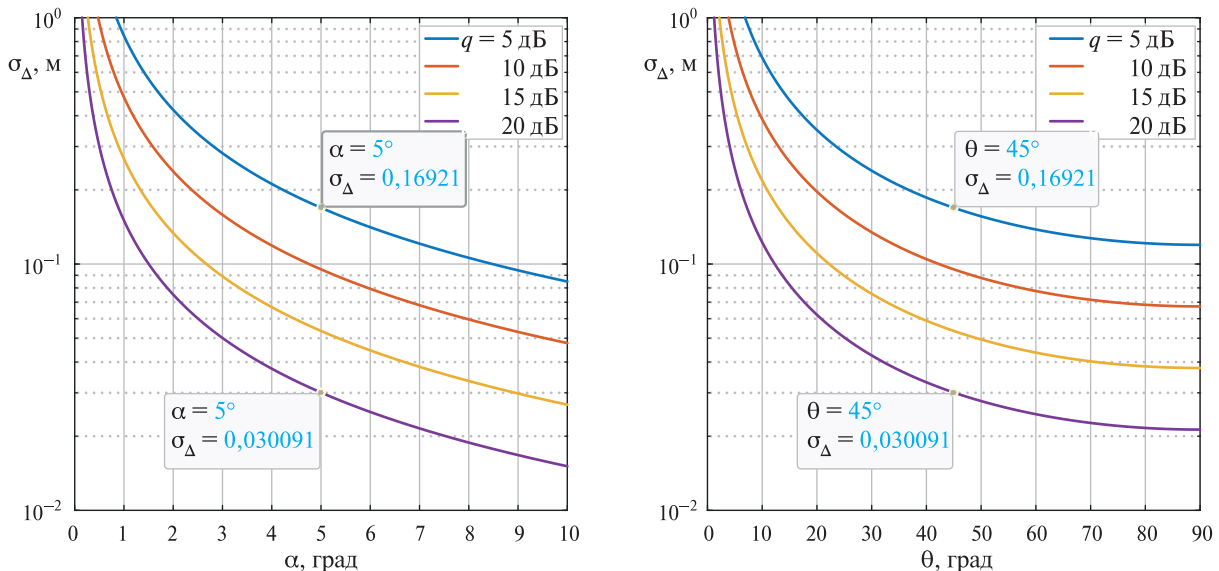


Рис. 2. Потенциальная точность оценивания сдвигов земной поверхности:
 а — $\theta_0 = 45^\circ$; б — $\alpha_0 = 5^\circ$; $r_0 = 735$ км, $B = 7$ км, $B_0 = 100$ м, $\lambda = 9$ см, $\Delta y = 10$ м

На рис. 2 представлены зависимости ошибки оценивания сдвигов земной поверхности от азимутального угла отклонения α_0 (см. рис. 2а) и от угломестного угла отклонения θ_0 (см.

рис. 2б). Расчёты проводились для различного отношения сигнал/шум на выходе системы обработки РСА, учитывался также эффект усреднения пространственно коррелированных значений при $n_{\text{уср}} \approx 100$.

Как следует из рис. 2, потенциальная точность оценивания оперативных сдвигов земной или морской поверхности может достигать десятых долей метра при скошенном обзоре в единицы градусов. Естественно предположить, что формирование нескольких циклов измерения и совместная обработка в соответствии с алгоритмами (4), (5) позволят значительно повысить точность измерения.

Экспериментальная проверка работоспособности

Проверка работоспособности квазиоптимальных алгоритмов дифференциального однопроходного интерферометра проводилась на реальных сигналах космического комплекса РСА (Турук и др., 2017). Параметры ДИРСА: разрешающая способность по дальности и азимуту $\Delta x \approx \Delta y \approx 10$ м, пространственное разнесение $B_0 \approx 100$ м и $\Delta B \approx 7$ км с одним циклом измерения или двумя парами сеансов наблюдения.

На рис. 3–5 (см. с. 126) представлена иллюстрация возможности однопроходного ДИРСА по обнаружению «быстрых» подвижек (сдвигов) морской поверхности при скошенном обзоре $\alpha \approx 1,2^\circ$ на примере наблюдения за выходом внутренних волн в районе сложной береговой структуры (см. рис. 3), сброса вод приморского района (см. рис. 4) и залива со сложной внутренней структурой (см. рис. 5).

На рис. 3а, 4а, 5а приводятся РЛИ, а на рис. 3б, 4б, 5б — карты подвижек в виде матрицы амплитуды, величина которой пропорциональна фазовому отклонению из-за подвижек морской поверхности. Весь диапазон наблюдаемых быстротекущих процессов в данном случае определяется следующим образом: синий цвет характеризует минимальное значение (0 м), жёлтый — максимальное (от 2,0 до 2,5 м), белые участки на цветных изображениях сопровождают области «разрыва фаз», характерные для сложных объектов с изменчивой структурой.

Ярче всего на рис. 3, 4 проявляется выход внутренних волн на сложной береговой структуре: крутой берег с резкими отклонениями от доминирующей береговой линии. На рис. 4 можно выделить область схода вод с берега в море: реки, водоёмы и т. п. Рисунок 5 отличается тем, что внутренние волны со стороны моря проникают в залив, и «подчёркивают» сложную донную структуру, возможно искусственного происхождения.

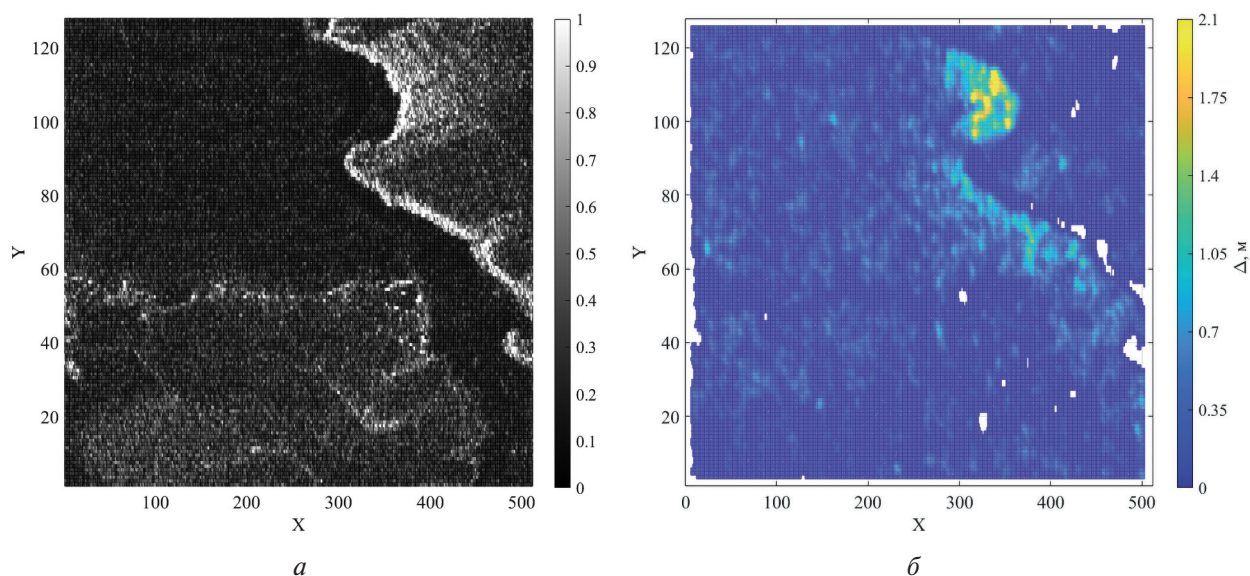


Рис. 3. Береговой участок: а — фрагмент кадра РЛИ; б — карта сдвигов в кадре РЛИ

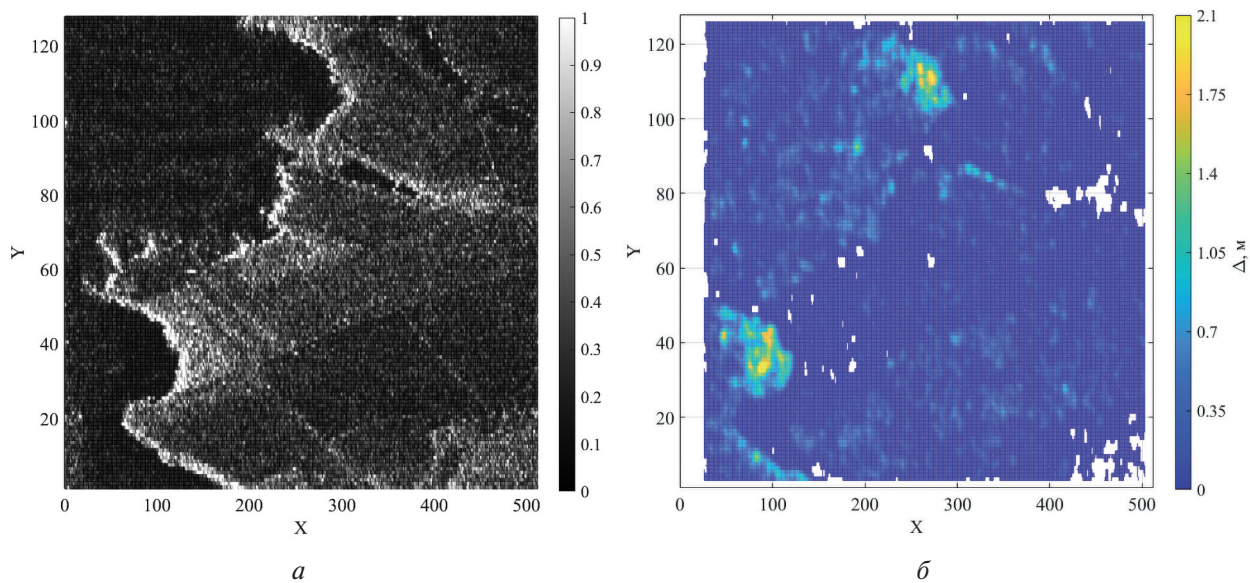


Рис. 4. Береговой залив: *a* — фрагмент кадра РЛИ; *б* — карта сдвигов в кадре РЛИ

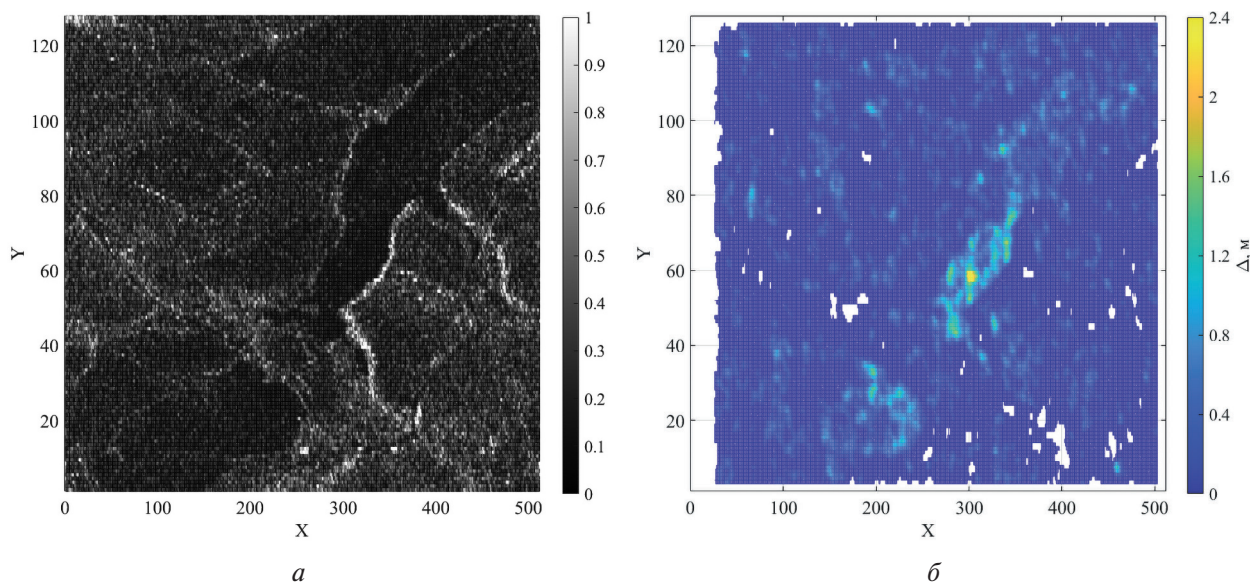


Рис. 5. Сход вод в заливе: *a* — фрагмент кадра РЛИ; *б* — карта сдвигов в кадре РЛИ

Анализ структуры изображений на *рис. 3–5* показывает, что имеется возможность оценки порога обнаружения с учётом усреднения и выделения участков оперативных подъёмов (опусканий) поверхности, тем самым обеспечивая обнаружение кратковременных изменений на поверхности Земли.

Заключение

На современном этапе перед дифференциальными интерферометрическими комплексами РСА обоснованно ставится задача обнаружения относительно быстрых смещений в кадре РЛИ, протекающих во времени и в пространстве, с целью наблюдения за процессами и явлениями на земной поверхности.

Использование однопроходного способа построения ДИРСА для решения различных прикладных задач позволяет формировать разнообразные варианты методов и алгоритмов

квазилинейного обнаружения таких процессов при потенциальной точности оценивания смещений, сравнимой с длиной волны излучения.

В настоящей работе обоснована модель сигнала однопроходного РСА интерферометра при скошенном обзоре, получены квазиоптимальные алгоритмы комплексной обработки интерферометрических измерений парных мультитременных сигналов и оценена точность измерения смещений на земной или морской поверхности, а также проведена экспериментальная отработка и проверка полученных алгоритмов с положительным результатом.

Представленные результаты экспериментов, анализа достоинств и ограничений рассмотренного ДИРСА 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 фазоразностной обработки многомерных сигналов.

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

Литература

1. *Бабокин М. И.* Авиационные и космические комплексы дистанционного зондирования Земли с интерферометрической обработкой многомерных сигналов: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2010. 336 с.
2. *Бабокин М. И., Карпов О. А.* Обнаружение сигнала подстилающей поверхности в РЛС с учётом его флуктуаций на интервале синтезирования // Вопросы радиоэлектроники. 2008. № 1. С. 148–160.
3. *Бабокин М. И., Шимкин П. Е.* Применение РСА космического базирования в режиме однопроходного переднебокового обзора для томографического исследования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 2. С. 49–59. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-49-59.
4. *Баскаков А. И., Жутяева Т. С., Лукашенко Ю. И.* Локационные методы исследования объектов и сред: учеб. для студентов учреждений высш. проф. образования / под ред. А. И. Баскакова. М.: Изд. центр «Академия», 2011. 384 с.
5. *Верба В. С., Неронский Л. Б., Осипов И. Г., Турук В. Э.* Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / под общ. ред. В. С. Вербы. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
6. *Волосюк В. К., Кравченко В. Ф.* Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации / под ред. В. Ф. Кравченко. М.: Физматлит, 2008. 704 с.
7. *Замятин А. В., Марков Н. Г.* Анализ динамики земной поверхности по данным дистанционного зондирования Земли. М.: Физматлит, 2007. 176 с.
8. *Захаров А. И.* Методы дистанционного зондирования Земли радарными с синтезируемой апертурой: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 2012. 370 с.
9. *Кондратенков Г. С., Фролов А. Ю.* Радиовидение: Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли: учеб. пособие для вузов / под. ред. Г. С. Кондратенкова. М.: Радиотехника, 2005. 368 с.
10. *Тихонов В. И., Харисов В. Н.* Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. М.: Радио и связь, 2004. 608 с.
11. *Турук В. Э., Верба В. С., Голованова М. В. и др.* РСА «Стриж» для малых космических аппаратов «Кондор-Э» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 5. С. 69–83. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-69-83.
12. *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. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-103-112.
13. *Школьный Л. А., Толстов Е. Ф., Детков А. Н.* Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений: учеб. для курсантов ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского / под ред. Л. А. Школьного. М.: Изд-во ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2008. 531 с.
14. *Fornaro G., Pascazio V.* SAR interferometry and tomography: Theory and applications // Academic Press Library in Signal Processing. 2014. V. 2. P. 1043–1117. DOI: 10.1016/B978-0-12-396500-4.00020-X.

15. 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 Sensing*. 2019. V. 11. No. 9. Article 1070. DOI: 10.3390/rs11091070.
16. Moreira A., Prats-Iraola P., Younis M. et al. A tutorial on synthetic aperture radar // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*. 2013. V. 1. No. 1. P. 6–43. DOI: 10.1109/MGRS.2013.2248301.
17. Ouchi K. Recent trend and advance of synthetic aperture radar with selected topics // *Remote Sensing*. 2013. V. 5. No. 2. P. 716–807. DOI: 10.3390/rs5020716.
18. Richards M.A. Fundamentals of radar signal processing. 3rd ed. N. Y.: McGraw Hill, 2022. 513 p.
19. Richards M.A., Melvin W.L., Sheer J.A. Principles of Modern Radar: Advanced techniques (Radar, Sonar and Navigation). SciTech Publ., 2013. 872 p.
20. Tebaldini S., Monti Guarnieri A. Methods and performances for multi-pass SAR interferometry // *Geoscience and Remote Sensing New Achievements*. 2010. P. 329–356. DOI: 10.5772/9112.
21. Zakharov A., Denisov P. Advantages and limitations of forward squint SAR in single-pass interferometric mapping of topography // *IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.* 2019. P. 8614–8616. DOI: 10.1109/IGARSS.2019.8900215.

Application of differential interferometric SAR in short-term Earth's surface changes detection

M. I. Babokin^{1,2}, P. E. Shimkin², V. G. Stepin²

¹ JSC Aerocon, Zhukovsky, Moscow Region 140180, Russia
E-mail: m.baboki57@mail.ru

² National Research University "Moscow Power Engineering Institute"
Moscow 111250, Russia
E-mails: shimkinpy@mpei.ru, stepin.vitalii@mail.ru

The features and main characteristics of a radar interferometric complex for Earth remote sensing based on a single-position space radar with a synthetic aperture antenna (SAR) operating in the single-pass forward-side observation mode are discussed in this paper. The conditions for operation and requirements for information support of the system for differential phase-difference signal processing, obtained from single-pass interferometric SAR (InSAR) data, are defined. The feasibility of the proposed approach to the construction of an InSAR complex for detecting rapidly occurring processes on the Earth's (sea) surface based on the relative phase shift of surface signals captured at different times is verified using real radar images obtained from open remote sensing data. The potential of using the proposed scheme for building an interferometric complex with a single SAR in orbit for solving the tasks of acquiring additional information on the Earth's surface state is demonstrated. Quasi-optimal algorithms for estimating the main target parameters are synthesized on the basis of methods of statistical estimation theory and optimal filtering.

Keywords: synthetic aperture radar (SAR), interferometric SAR (InSAR), differential interferometry method, experimental results

Accepted: 15.10.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-117-129

References

1. Babokin M.I., *Aviatsionnye i kosmicheskie komplekсы distantsionnogo zondirovaniya Zemli s interferometriческой obrabotkoi mnogomernykh signalov: Diss. dokt. tekhn. nauk* (Aviation and space complexes for remote sensing of the Earth with interferometric processing of multidimensional signals, Dr. techn. sci. thesis), Moscow, 2010, 336 p. (in Russian).
2. Babokin M.I., Karpov O.A., *Obnaruzhenie signala podstilayushchei poverhnosti v RLS s uchetom ego fluktuatsii na intervale sintezirovaniya* (Detection of the underlying surface signal in a radar taking into account

- its fluctuations in the synthesis interval), Moscow: Voprosy radioelektroniki, 2008, No. 1, pp. 148–160 (in Russian).
3. Babokin M. I., Shimkin P. E., Application of space-based SAR in single-pass squint mode in Earth tomographic study, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 2, pp. 49–59 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-49-59.
 4. Baskakov A. I., Zhutyayeva T. S., Lukashenko Yu. I., *Lokatsionnye metody issledovaniya ob'ektov i sred* (Location methods for studying objects and environments), A. I. Baskakov (ed.), Moscow: Izd. tsentr "Akademiya", 2011, 384 p. (in Russian).
 5. Verba V. S., Neronskii L. B., Osipov I. G., Turuk V. E., *Radiolokatsionnye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya* (Space-based radar systems for land survey), V. S. Verba (ed.), Moscow: Radiotekhnika, 2010, 680 p. (in Russian).
 6. Volosyuk V. K., Kravchenko V. F., *Statisticheskaya teoriya radiotekhnicheskikh sistem distantsionnogo zondirovaniya i radiolokatsii* (Statistical theory of radio engineering systems of remote sensing and radar), V. F. Kravchenko (ed.), Moscow: Fizmatlit, 2008, 704 p. (in Russian).
 7. Zamyatin A. V., Markov N. G., *Analiz dinamiki zemnoi poverkhnosti po dannym distantsionnogo zondirovaniya Zemli* (Analysis of Earth surface dynamics based on Earth remote sensing data), Moscow: Fizmatlit, 2007, 176 p. (in Russian).
 8. Zakharov A. I., *Metody distantsionnogo zondirovaniya Zemli radarami s sinteziruemoi aperturoi: Diss. dokt. fiz.-mat. nauk* (Earth remote sensing methods with synthetic aperture radars, Dr. phys. math. sci. thesis), Moscow, 2012, 370 p. (in Russian).
 9. Kondratenkov G. S., Frolov A. Yu., *Radiovidenie. Radiolokatsionnye sistemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli* (Radio vision. Radar systems for remote sensing of the Earth), G. S. Kondratenkov (ed.), Moscow: Radiotekhnika, 2005, 368 p. (in Russian).
 10. Tihonov V. I., Harisov V. N., *Statisticheskii analiz i sintez radiotekhnicheskikh ustroystv i sistem* (Statistical analysis and synthesis of radio engineering devices and systems), Moscow: Radio i svyaz', 2004, 908 p. (in Russian).
 11. Turuk V. E., Verba V. S., Golovanova M. V. et al., Strizh SAR for small Condor-E satellites, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 5, pp. 69–83 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-69-83.
 12. Shimkin P. E., Babokin M. I., Baskakov A. I., A study of accuracy of single-pass interferometric synthetic aperture radar with front-side view for measuring the Earth's surface, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 5, pp. 103–112 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-103-112.
 13. Shkolnyi L. A., Tolstov E. F., Detkov A. N., *Radiolokatsionnye sistemy vozduшной razvedki, deshifirovanie radiolokatsionnykh izobrazhenii* (Radar systems of aerial reconnaissance, decoding of radar images), L. A. Shkolnyi (ed.), Moscow: Izd. VVIA imeni prof. N. E. Zhukovskogo, 2008, 531 p. (in Russian).
 14. Fornaro G., Pascazio V., SAR interferometry and tomography. Theory and applications, *Academic Press Library in Signal Processing*, 2014, Vol. 2, pp. 1043–1117, DOI: 10.1016/B978-0-12-396500-4.00020-X.
 15. 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 Sensing*, 2019, Vol. 11, No. 9, Article 1070, DOI: 10.3390/rs11091070.
 16. Moreira A., Prats-Iraola P., Younis M. et al., A tutorial on synthetic aperture radar, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2013, Vol. 1, No. 1, pp. 6–43, DOI: 10.1109/MGRS.2013.2248301.
 17. Ouchi K., Recent trend and advance of synthetic aperture radar with selected topics, *Remote Sensing*, 2013, Vol. 5, No. 2, pp. 716–807, DOI: 10.3390/rs5020716.
 18. Richards M. A., *Fundamentals of radar signal processing*, 3rd ed., New York: McGraw Hill, 2022, 513 p.
 19. Richards M. A., Melvin W. L., Sheer J. A., *Principles of Modern Radar: Advanced techniques (Radar, Sonar and Navigation)*, SciTech Publishing, 2013, 872 p.
 20. Tebaldini S., Monti Guarnieri A., Methods and performances for multi-pass SAR interferometry, In: *Geoscience and Remote Sensing New Achievements*, 2010, pp. 329–356, DOI: 10.5772/9112.
 21. Zakharov A., Denisov P., Advantages and limitations of forward squint SAR in single-pass interferometric mapping of topography, *IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.*, Yokohama, 2019, pp. 8614–8616, DOI: 10.1109/IGARSS.2019.8900215.