

II Всероссийская научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» - «Муром 2018»

Фазовый мониторинг динамических процессов с помощью авиационного комплекса РСА

М.И. Бабокин¹, А.В. Ефимов¹, В.Г. Степин²

¹ЗАО «Аэрокон», 140187, г. Жуковский, Московская обл., ул. Жуковского, 1, e-mail: m.baboki@hotmail.ru; alexef73@mail.ru

²АО НИИ приборостроения имени В.В. Тихомирова, 140180, г. Жуковский, Московская обл., ул. Гагарина, д.3, e-mail: vitalii.stepin@mail.ru

Подробно изложен метод однопроходного фазового мониторинга динамических процессов на водной поверхности. На математической модели показана связь принимаемого сигнала от поверхности с изменением фазы и других параметров. Приведены результаты обработки реальных сигналов и произведена визуальная оценка амплитудного и фазового портретов.

Explicitly the method of one-pass phase monitoring of dynamic processes on water surface is explained. The dependence of the echo-signal from a surface with phase change and other parameters is shown on a mathematical model. Results of real signals processing are given and visual assessment of amplitude and phase portraits is made.

Известно [1–4], что получаемые в радиолокаторе с синтезированием апертуры антенны (РСА) радиолокационные изображения (РЛИ) передают характерные особенности местности и объектов благодаря их различиям в функции отражения. Таким образом, формируется амплитудный портрет, то есть такое РЛИ, интенсивность каждой точки которого пропорциональна амплитуде отраженного сигнала от соответствующего разрешаемого участка поверхности.

Однако движение объектов, изменение их отражающих свойств во времени, по частоте и координатам определяют не только амплитудные различия, но и фазовые. Причем, в когерентных радиолокационных системах фаза является наиболее чувствительным параметром сигнала. Например, при изменении расстояния до цели на один сантиметр влечет за собой изменение фазы сигнала на 180° (в сантиметровом диапазоне волн), при этом амплитуда сигнала и задержка огибающей остаются практически неизменными. Благодаря высокой чувствительности, использование фазовой информации в РСА позволяет значительно повысить эффективность решения всех тактических задач. Поэтому можно формировать изображения, интенсивность каждой точки которого пропорциональна разности фаз сигналов соответствующего разрешаемого участка поверхности. Подобный фазовый мониторинг поверхности и объектов на ней также называют *фазовым портретированием* [1–3].

Для обнаружения изменений на поверхности дифференциальный РСА интерферометр использует многопроходную схему, когда медленные изменения во времени проявляются через длительное время. Помимо медленных процессов на поверхности часто проявляются быстротекущие такие, как движения объектов, волны, сходы вод, селей, ветровые движения и т.п. В этих случаях вполне применим комплекс РСА с переднебоковым обзором для организации однопроходного дифференциального интерферометра [3,5].

Цель работы – рассмотреть авиационный однопроходной дифференциальный РСА интерферометр при переднебоковом обзоре для анализа динамических процессов, возникающих на водной поверхности.

На рис. 1 представлена геометрическая схема однопроходного дифференциального интерферометра при переднебоковом обзоре с одним авиационным носителем РСА для

обнаружения «быстрых» подвижек водной поверхности или быстротекущих процессов на ней.

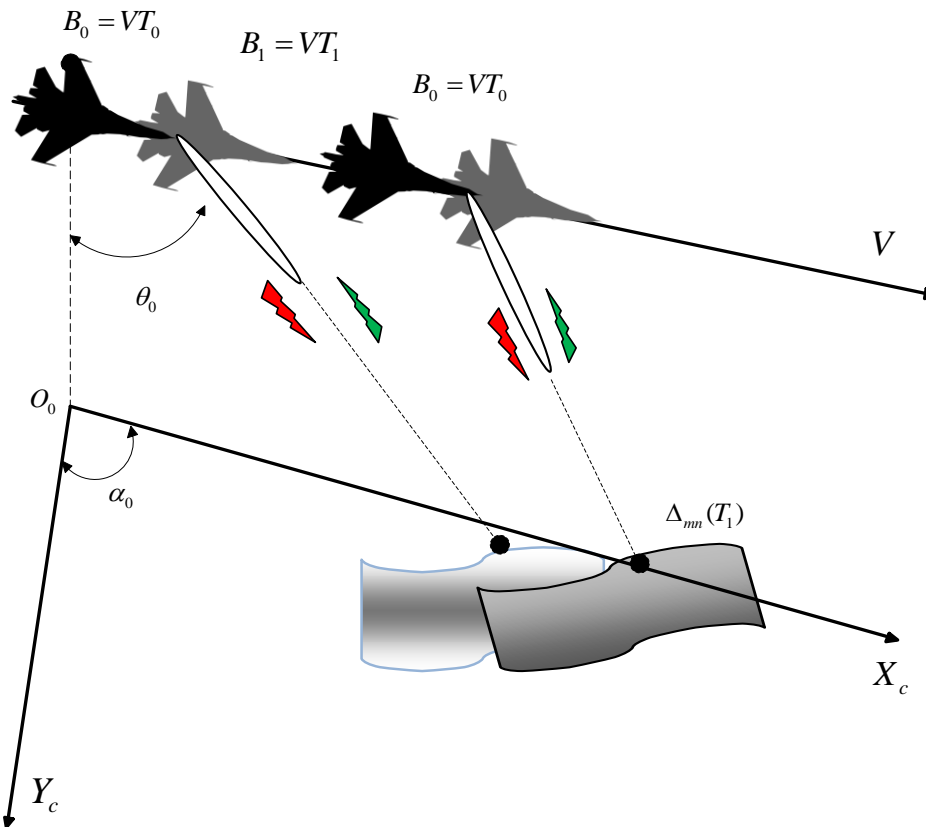


Рис. 1. Геометрическая схема однопроходного дифференциального интерферометра при переднебоковом обзоре.

Наблюдение за выбранным участком водной поверхности производится РСА некоторое время T , в несколько раз превышающее время синтезирования апертуры антенны T_c .

На данном рисунке представлено два сеанса, необходимых для организации интерферометрической пары через базу $B_0 = VT_0$, которая определяется как смещение сеансов наблюдения вдоль оси O_0X_c , $T_0 = T_c / (4 \dots 8)$ [5,6]. Затем, через интервал $B_1 = VT_1$, формируется другая интерферометрическая пара сеансов наблюдения с тем же смещением B_0 . Получаем два разнесённых во времени на T_1 измерения интерферометра по одной и той же наблюдаемой поверхности.

Таким образом, два интерферометра формируются за счёт естественного пролёта носителя на входе и выходе интервала наблюдения РСА.

При описании поверхности в матричном виде возможно использование разностного уравнения для дискретного времени:

$$h_{mn}(t_i) = f(h_{mn}(t_{i-1})),$$

где $h_{mn}(t_i)$ – значение относительного рельефа поверхности соответствующего элемента разрешения РЛИ,

t_i, t_{i-1} – дискретное время, соответствующее моментам картографирования определенного участка поверхности,

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

В известной литературе [7,8] описывается линейная аппроксимация разностного уравнения:

$$h_{mn}(t_i) = h_{mn}(t_{i-1}) + \Delta_{mn}(t_i),$$

где $\Delta_{mn}(t_i)$ – неизвестный сдвиг рельефа поверхности, который можно представить в виде:

$$\Delta_{mn}(t_i) = \Delta_{mn} = \beta_{\Delta}(t_{i-1})\Delta_{mn}(t_{i-1}) + n_{\Delta}(t_i),$$

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

$n_{\Delta}(t_i)$ – выборки формирующего белого шума с нулевым математическим ожиданием (МО) и дисперсией.

Заметим, что каждое значение $\Delta_{mn}(t_i)$ зависит только от значения в предыдущий момент времени и не зависит от более ранних отсчетов (свойство марковской последовательности [7]).

Уравнение полученного сигнала с одним носителем РСА при переднебоковом обзоре можно записать следующим образом:

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

где $\xi_m(t) = \left\| \xi_m^0(t) \dots \xi_m^i(t) \dots \xi_m^I(t) \right\|^T$ – вектор-функция наблюдаемых сигналов в $I-1$ временных измерениях для m -ой разрешаемой полосы дальности;

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

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

$$\text{Сдвиг местного рельефа является вектор-столбцом: } \Delta_m^i = \left\| \Delta_{m0}^i \dots \Delta_{mn}^i \dots \right\|^T.$$

Отраженный сигнал и сообщение связаны нелинейной зависимостью, по этой причине воспользуемся методом марковской теории нелинейной фильтрации [2,7]. По этому методу алгоритм оценки сдвигов поверхности при переднебоковом обзоре будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{\Delta}_{mn} \approx \hat{\Delta}_{mn}^{\rho} + \left(\frac{R_{m\Delta}}{N_0} \right) \left\{ P_m(t, \Delta) - Q_m(t, \Delta) \right\},$$

$$\text{где } P_m(t, \Delta) = \int_{t_{i-1}}^{t_i} \frac{\partial}{\partial \Delta} \hat{s}_m(t, \Delta)^{\rho} * \xi(t)^T dt, \quad Q_m(t, \Delta) = \int_{t_{i-1}}^{t_i} \frac{\partial}{\partial \Delta} \hat{s}_m(t, \Delta)^{\rho} * \hat{s}_m(t, \Delta)^{\rho T} dt,$$

$R_{m\Delta}$ – матрица дисперсий ошибок фильтрации,

$$\hat{s}_m(t + B_0 l, \Delta) = \hat{g}(t + B_0 l) \cdot \sum_n \hat{e}_{mn} \times \\ \times \exp \left\{ -j \left[\Delta \varphi_{mn}(t + B_0 l) + \frac{4\pi}{\lambda} \left(\hat{\Delta}_{mn}^{\rho} \right) \left(1 + \frac{B_0 * l \cos(\theta_{0mn}) \sin(\alpha_0)}{2R_0} \right) \cos(\theta_{0m}) \right] \right\},$$

\hat{e}_{mn} – элемент оцененной матрицы радиолокационного рельефа;

$\Delta \varphi_{mn}(t + B_0 l)$ – изменение фазы сигнала точечного отражателя на поверхности;

$\hat{\Delta}_{mn}^{\rho}$ – прогнозируемая оценка сдвига (если данные отсутствуют, то $\hat{\Delta}_{mn}^{\rho} = 0$);

θ_{0m} – угол падения;

α_0 – угол отклонения от нормали к вектору движения [8].

С помощью представляемого метода возможно оценить фазовые отклонения и динамику водной поверхности в реальном времени.

Экспериментальная обработка проводилась по реальным сигналам, полученным с помощью радиолокационной системы управления (РЛСУ) «Барс» при обзоре земной поверхности (пространственное разрешение ~ 10 м, дальность ~ 40 км, $\alpha_0 \approx 30...40^\circ$).

На рис. 2 показаны амплитудный (рис. 2,а) и фазовые портреты (рис. 2,б,в,г) района реки и населенного пункта.

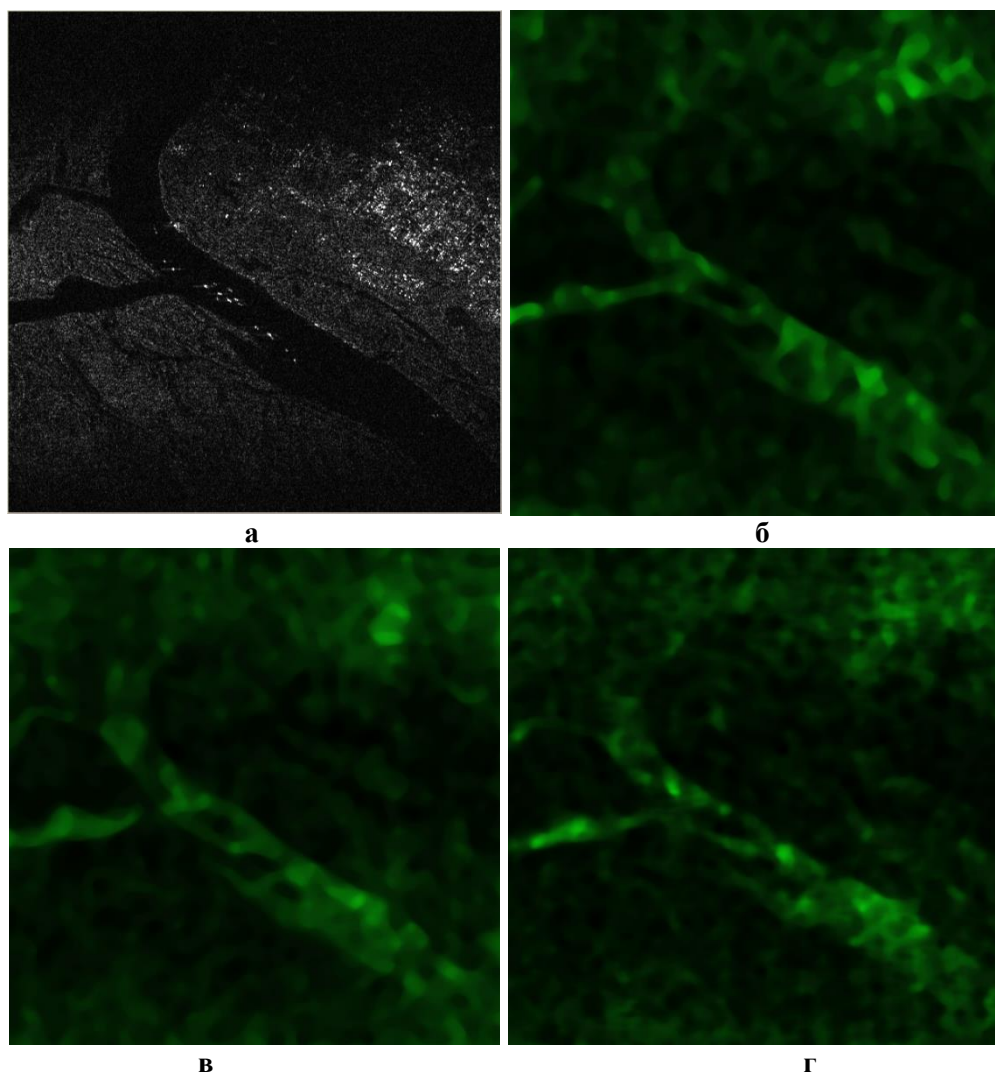


Рис. 2. Амплитудный и фазовые портреты земной поверхности.

На кадрах, изображенных на рис. 2,б,в и г проявляются динамические процессы – волны на реке. Соответствующие им отраженные сигналы были получены через каждые 0,5 секунд. На фазовых портретах можно определить направление течения. Также ярко выражен участок с быстрым течением, хотя на рис. 2,а этого не видно.

Следующий результат получен при наблюдении комплексом РСА территории Волжской ГЭС, где априорно известна динамика водной поверхности. Результаты обработки представлены на рис. 3.

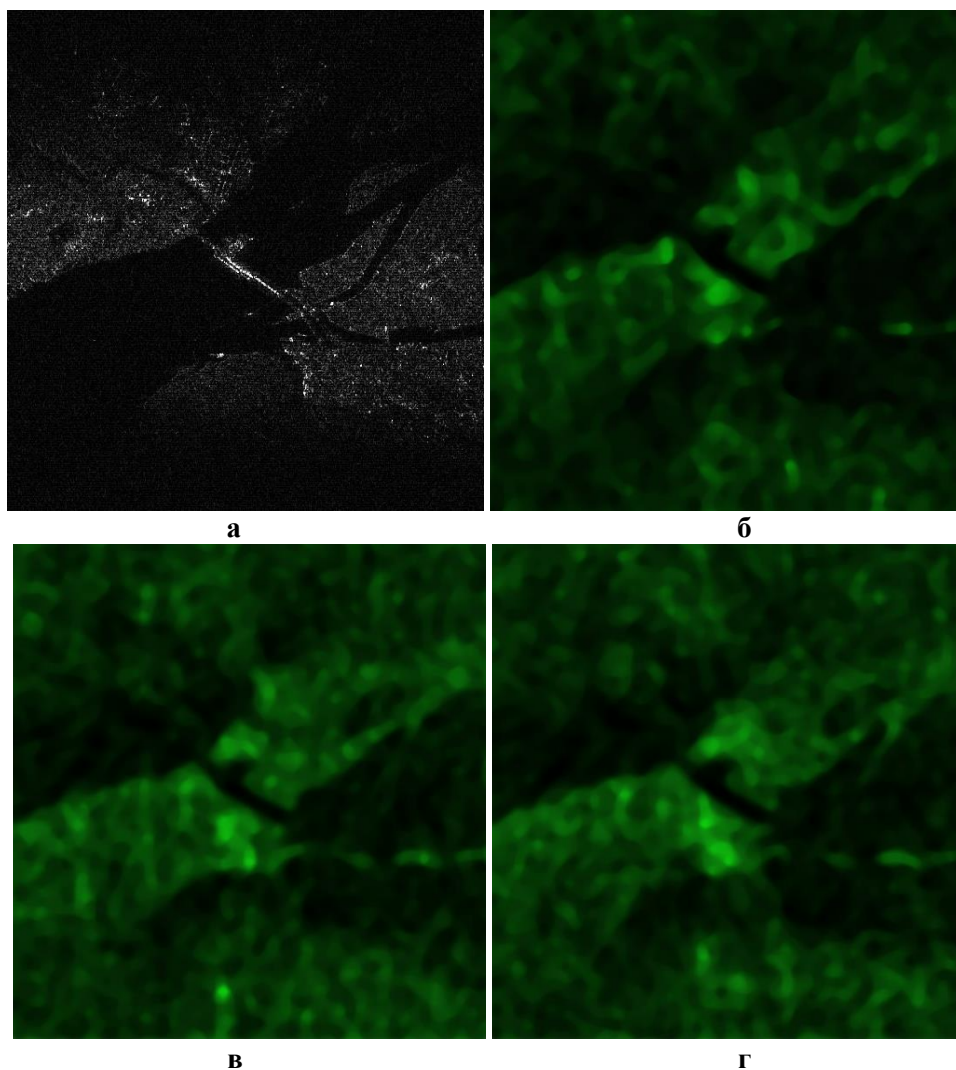


Рис. 3 Амплитудный и фазовые портреты территории Волжской ГЭС.

Как и в предыдущем случае, изображение а – амплитудный портрет, б, в, г – фазовые портреты, которые являются результатом обработки сигналов, полученных через каждые 0,5 с. Можно легко обнаружить волны, причем самые большие находятся у дамбы. Также можно определить направление течения реки. Если рассматривать амплитудный портрет, то подобного не наблюдается.

Еще один пример выявления сдвигов водной поверхности представлен на рис. 4. Рассматривая РЛИ земной поверхности (рис.4,а), можно заметить несколько водоемов (относительно большие участки черного цвета), а на фазовом портрете (рис.4,б) видно, что это не просто водная поверхность, но и «быстрые» сдвиги и течение (максимальная яркость).

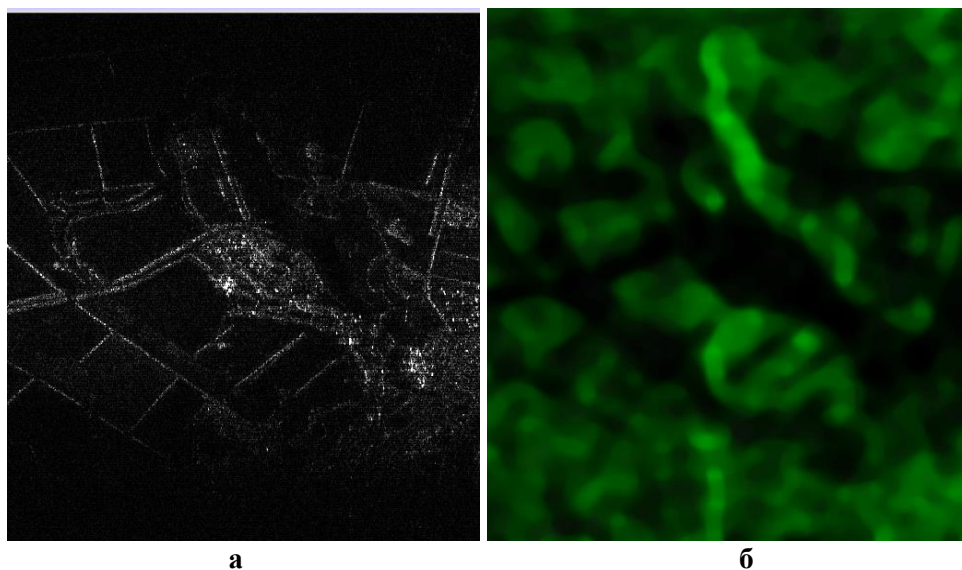


Рис. 4. Амплитудный и фазовый портрет населенного пункта.

Анализируя представленные результаты, можно сделать вывод, что метод дифференциального фазового мониторинга эффективно выявляет динамику водной поверхности и может служить дополнительным и ценным источником информации.

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. – 368 с.
2. Бабокин М.И. Измерение сдвигов земной поверхности в комплексах дистанционного зондирования Земли // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2010. № 8. С.25-34.
3. Бабокин М.И., Костров В.В., Толстов Е.Ф. Фазовый портрет в космических РСА радиовидения // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2017. № 4. С.4-14.
4. Лавров А.А. Радиолокационный скоростной портрет. Основы теории. Монография. – М.: Радиотехника, 2013. – 160 с. (Научная серия «Бортовые аэронавигационные системы»).
5. Бабокин М.И., Толстов Е.Ф. Фазовое портретирование в многоканальных РСА // 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.287-297.
6. Бабокин М.И. Оценка состояния взволнованной морской поверхности с помощью РСА // Радиотехника. 2009. №11. С.5-14.
7. Тихонов В.И. Оптимальный приём сигналов. – М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.
8. Бабокин М.И., Ефимов А.В., Карпов О.А., Титов М.П. Однопроходный интерферометр при переднебоковом обзоре // Радиотехника. 2014. №7. С.16-20.