

# РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАДИОЛОКАЦИИ, РАДИОНАВИГАЦИИ, СВЯЗИ И ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

УДК 621.396.96

А. А. БЕЗВЕСИЛЬНЫЙ, Е. Н. ГОРОВОЙ, Д. М. ВАВРИВ

Радиоастрономический институт НАН Украины,  
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина  
E-mail: vavriv@rian.kharkov.ua

## ЛОКАЛЬНО-КВАДРАТИЧНАЯ АВТОФОКУСИРОВКА ПО СМЕЩЕНИЮ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ РАДИОЛОКАТОРОВ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ

*Нескомпенсированные фазовые ошибки приводят к ухудшению качества радиолокационных изображений, полученных с помощью радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА). Этот эффект особенно заметно проявляется в системах с высоким пространственным разрешением. Предлагается новый подход для оценки остаточных фазовых ошибок в радиолокационных сигналах РСА бокового обзора. Основная идея метода состоит в оценке локальных квадратичных ошибок на коротких временных интервалах с последующим восстановлением неизвестной фазовой ошибки на временных интервалах произвольной длины. Для локальной оценки используется алгоритм автофокусировки по смещению изображений – Map-Drift Autofocus (MDA). Эффективность предложенного метода подтверждена примерами реальных радиолокационных данных.*

*Ключевые слова:* радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА), ошибки движения, автофокусировка, компенсация ошибок движения

### 1. Введение

Неучтенные траекторные отклонения самолета являются одним из основных факторов, существенно влияющих на качество получаемых радиолокационных изображений (РЛИ) в радиолокаторах с синтезированной апертурой (РСА) [1–3]. Для компенсации этих отклонений необходимо проводить высокоточные измерения траектории полета [2]. Однако требования к точности таких измерений в РСА с пространственным разрешением лучше 1 м становятся настолько высокими, что даже современные системы навигации не полностью их обеспечивают. Для решения этой проблемы были предложены различные методы автофокусировки изображений [4–13]. Суть этих методов сводится к оценке траекторных отклонений путем анализа отраженного радиолокационного сигнала с последующей их компенсацией при построении РСА изображений.

В зависимости от подхода к оценке неизвестных фазовых ошибок методы автофокусировки разделяют на параметрические и непараметрические. В параметрических методах вводится математическая модель фазовой ошибки и ищутся параметры этой модели. Непараметрические методы не используют модели и ищут фазовую ошибку в виде произвольной функции.

Самым известным непараметрическим методом автофокусировки является метод оценки градиента фазовой ошибки (Phase Gradient Autofocus (PGA)) [4–5]. Этот метод позволяет производить оценку градиента произвольной фазовой ошибки без привязки к определенной модели. Однако он разработан только применительно к прожекторному режиму работы РСА. Применение этого алгоритма для наиболее часто используемого режима бокового обзора связано с рядом сложностей и ограничений [5].

Самым распространенным параметрическим методом является метод автофокусировки по

© А. А. Безвесильный, Е. Н. Горовой, Д. М. Ваврив, 2012

смещению изображений (Map-Drift Autofocus (MDA)) [3, 6]. Его идея основана на том, что при построении двух изображений одного и того же участка местности под немного разными углами наблюдения (такие изображения называются “взглядами”) наличие квадратичной фазовой ошибки приводит к расфокусировке и смещению изображений по азимуту в противоположных направлениях [3]. Оценка этого смещения по положению максимума взаимной корреляции изображений дает возможность найти величину квадратичной фазовой ошибки.

Важным преимуществом метода автофокусировки по смещению изображений является тот факт, что этот метод не требует обязательного наличия ярких точечных отражателей на изображениях в отличие от, например, метода оценки градиента фазы. Для надежной оценки смещения изображений достаточно наличия контрастных участков, содержащих границы, радиотени или другие детали сцены.

Недавно был предложен когерентный алгоритм автофокусировки по смещению изображений (Coherent Map-Drift Autofocus (CMDA)) [6]. В этом методе производится расчет корреляции РСА изображений в комплексном виде. Преимущество данного подхода состоит в том, что ширина главного лепестка корреляционной функции не зависит от величины неизвестной фазовой ошибки.

Существуют также параметрические методы, в которых производится оценка неизвестной квадратичной фазовой ошибки с помощью анализа доплеровских спектров радиолокационных сигналов. К наиболее часто применяемым методам относят фазоразностный метод (Phase Difference (PD)) [3] и метод смещения и корреляции (Shift and Correlate (SAC)) [12, 13]. Главное отличие между этими методами состоит в основном в способе вычисления взаимной корреляции спектров.

Для повышения точности аппроксимации фазовой ошибки часто используется многоапертурный подход, который позволяет оценивать неизвестную фазовую ошибку в виде полинома некоторой степени. В этом подходе измеряются относительные сдвиги между несколькими изображениями, которые используются для оценки коэффициентов модельного полинома. На практике максимальная степень полинома ограниче-

на точностью вычисления корреляции [3]. Было предложено также несколько альтернативных параметрических методов, которые используют другие базисные функции для представления неизвестной фазовой ошибки [7, 8, 10].

Обычно обработка данных РСА проводится в кадровом режиме, когда поток данных делится на довольно большие блоки, по каждому из которых строится один кадр изображения сцены, например размером  $3 \times 3$  км (по дальности и по азимуту). Деление на кадры требуется в первую очередь для реализации коррекции ошибок движения (для каждого кадра вводятся опорная прямая полета и опорные параметры). Длительность одного кадра во много раз (обычно в десятки раз) превышает время синтезирования. Будем говорить о длительности одного кадра как о “длинном интервале обработки” в отличие от значительно более короткой длительности синтезированной апертуры.

Для РСА бокового обзора, независимо от выбранного метода автофокусировки, существует проблема оценки неизвестной фазовой ошибки на длинном интервале обработки (на длине кадра). Суть проблемы состоит в том, что в режиме бокового обзора сигнал от произвольного точечного отражателя присутствует в отраженном сигнале в течение ограниченного времени, пока отражатель находится в луче реальной антенны. Следовательно, автофокусировка по некоторому выбранному участку местности позволяет найти только малый фрагмент неизвестной фазовой ошибки на том небольшом отрезке времени, на котором присутствуют сигналы от всех точек выбранного участка сцены. Этот интервал мы будем называть “коротким интервалом обработки”. Даже в случае точной оценки фрагментов фазовой ошибки на коротких интервалах существует проблема объединения найденных фрагментов для восстановления фазовой ошибки на всей длине кадра.

Для нахождения произвольной фазовой ошибки на длинном временном интервале нами предложен новый подход к оценке фазовых ошибок, который мы назвали алгоритм локально-квадратичной автофокусировки по смещению изображений (Local-Quadratic Map-Drift Autofocus (LQMDA)). Его идея состоит в определении значений второй производной фазовой ошибки путем оценивания локальных квадратичных ошибок на малых вре-

менных интервалах. После этого произвольная фазовая ошибка на временном интервале большой длины восстанавливается путем соответствующего двойного интегрирования. Для оценки локальных квадратичных ошибок используется метод автофокусировки по смещению РСА изображений (Map-Drift Autofocus (MDA)). РСА изображения на коротких интервалах времени формируются с помощью дальностно-доплеровского алгоритма (Range-Doppler Algorithm (RDA)).

Стоит подчеркнуть, что мы не используем модель фазовой ошибки на длинном интервале, так как это делается в стандартных параметрических методах. Параметрический алгоритм автофокусировки по смещению изображений применяется только на коротких временных интервалах, на которых квадратичная аппроксимация обеспечивает необходимую точность. Поэтому предложенный алгоритм автофокусировки применительно к длинному интервалу можно считать непараметрическим.

Статья организована следующим образом. В разделе 2 изложен принцип представления произвольной фазовой ошибки с помощью локальных квадратичных ошибок на коротких интервалах. В разделе 3 описаны особенности применения дальностно-доплеровского алгоритма синтезирования на коротких временных интервалах. В разделе 4 рассмотрен алгоритм оценивания локальных квадратичных ошибок путем автофокусировки по смещению изображений на коротких временных интервалах. Раздел 5 посвящен практической реализации предложенного метода автофокусировки. В этом разделе приведены структурные схемы и описаны основные этапы разработанных алгоритмов. В разделе 6 приведены примеры реальных РСА изображений, иллюстрирующие эффективность предложенного метода автофокусировки.

## 2. Представление произвольной фазовой ошибки с помощью локальных квадратичных аппроксимаций

Наиболее часто используемыми алгоритмами РСА обработки являются блочные алгоритмы, к которым, в частности, относится дальностно-доплеровский алгоритм (Range-Doppler Algorithm (RDA)) [14]. Эффективность этого метода достигается за счет выполнения коррекции миграции

сигналов по дальности в частотной области и синтезирования апертуры по азимуту с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ). Как правило, размер блока данных по азимуту выбирается во много раз больше рассматриваемого интервала синтезирования.

Дальностно-доплеровский алгоритм предполагает, что самолет движется с постоянной скоростью на постоянной высоте и углы ориентации реальной антенны остаются постоянными. Однако в реальных условиях эти требования не выполняются. Нестабильности полета приводят к ухудшению качества получаемых РЛИ. Далее мы будем рассматривать только траекторные отклонения, т. к. вариации ориентации реальной антенны могут быть компенсированы с помощью стабилизации антенны или методами радиометрической коррекции [15].

Точно измеренные траекторные отклонения могут быть компенсированы с помощью стандартных методов компенсации траекторных отклонений [2], которые включают в себя коррекцию ошибок миграции и фазовую компенсацию.

Главная проблема компенсации траекторных отклонений состоит в том, что даже современные навигационные системы не обеспечивают необходимую точность измерения траектории. В результате в радиолокационном сигнале даже после применения коррекции ошибок движения все еще присутствуют остаточные фазовые ошибки.

Рассмотрим принятый радиолокационный сигнал  $s(t)$  после сжатия по дальности, коррекции миграции по дальности, а также после применения процедуры компенсации траекторных отклонений, измеренных навигационной системой. Тогда

$$s(t) = s_{ref}(t) \exp[i\varphi_E(t)], \quad (1)$$

где  $s_{ref}(t)$  – сигнал, который соответствует прямолинейному полету,  $\varphi_E(t)$  – остаточная фазовая ошибка на выбранной дальности. Таким образом, необходимо решить задачу об оценке остаточной фазовой ошибки  $\varphi_E(t)$  на длине кадра  $T_{FR}$ .

Разделим временной интервал  $T_{FR}$  на короткие интервалы  $T_S$  с половинным перекрытием, центры которых определяются следующим образом:

$$t_n = (2n + 1)(T_S/2), \quad n = 0, 1, \dots, N. \quad (2)$$

Длительность интервала  $T_S$  будем выбирать достаточно короткой, чтобы фазовую ошибку на этом интервале можно было аппроксимировать параболой:

$$\varphi_E(t_n + \tau) \approx \varphi_E(t_n) + \varphi'_E(t_n)\tau + \varphi''_E(t_n)\tau^2/2, \quad (3)$$

где  $\tau$  – время внутри короткого интервала  $-T_S/2 < \tau < T_S/2$ .

Мы предлагаем производить оценку локальных квадратичных ошибок на каждом коротком интервале отдельно. Для этого используем алгоритм автофокусировки по смещению изображений, который подробно описан в разделе 4. В кратком изложении, согласно этому методу, короткий интервал  $T_S$  делится на две части, которые используются для построения двух РСА изображений. Наличие квадратичной ошибки (3) приводит к смещению этих изображений в противоположных направлениях, а также к расфокусировке. Измерение этого смещения позволяет найти коэффициент квадратичной ошибки  $\varphi''_E(t_n)$ . Постоянный член  $\varphi_E(t_n)$  не влияет на оценку смещения, как и линейный член  $\varphi'_E(t_n)\tau$ , который приводит к сдвигу двух изображений в одном направлении.

Очевидно, что точность аппроксимации фазовой ошибки параболой на коротком интервале улучшается с уменьшением длины этого интервала. Но при этом необходимо учитывать, что при уменьшении интервала  $T_S$  величина смещения между двумя изображениями, которые были по нему получены, также будет уменьшаться. Следовательно, точность измерения локальной квадратичной ошибки  $\varphi''_E(t_n)$  будет падать, что в свою очередь приведет к ошибкам оценки фазы. Как результат существует оптимальное значение интервала  $T_S$ , которое необходимо выбирать для каждой конкретной РСА системы и платформы.

После проведения локальных оценок на всех коротких интервалах мы получаем временной ряд квадратичных коэффициентов локальных фазовых ошибок. При условии достаточно точной оценки этот ряд представляет собой значения второй производной искомой фазовой ошибки в центрах коротких интервалов  $t_n$  (2), что проиллюстрировано на рис. 1.

Для восстановления неизвестной фазовой ошибки необходимо выполнить двойное интегрирование полученного временного ряда значений вто-

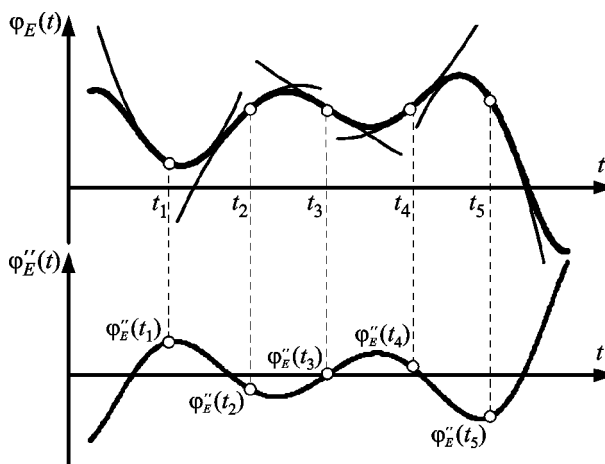


Рис. 1. Неизвестная произвольная остаточная ошибка, аппроксимирующие параболы и оцененная вторая производная фазовой ошибки

рой производной. Стоит отметить, что значения второй производной необходимо определять с частотой повторения импульсов, так как фазовая компенсация должна производиться для каждого импульса радиолокационных данных. После проведения интегрирования мы восстанавливаем искомую фазовую ошибку  $\varphi_E(t)$ .

Очевидно, что интегрирование приводит к возникновению неизвестных констант интегрирования. Кроме того, шум оценки, который неизбежно возникает, приводит к линейным трендам после интегрирования. Для решения этих проблем, как будет описано в разделе 5, мы используем траекторию, измеренную навигационной системой, в качестве опорной в предположении, что остаточные фазовые ошибки не имеют линейных трендов на длине блока данных.

В следующем разделе рассматриваются особенности применения дальностно-доплеровского алгоритма на коротких временных интервалах для построения двух изображений для автофокусировки.

### 3. Дальностно-доплеровский алгоритм на коротком интервале обработки

Как уже отмечалось, стандартный дальностно-доплеровский алгоритм применяется к блокам данных, длительность которых во много раз превышает требуемое время синтеза. В нашем случае, когда для автофокусировки нужно строить РСА изображения по данным, собранным

на коротких интервалах  $T_S$ , стандартная схема дальностно-доплеровского алгоритма не работает. В этом разделе мы рассмотрим особенности формирования РСА изображений на коротком интервале данных и покажем, как необходимо модифицировать дальностно-доплеровский алгоритм, чтобы его можно было применять в таком случае.

РСА изображение, построенное по короткому блоку данных, будет отображать местность, которая освещалась лучом реальной антенны в течение времени  $T_S$ . За это время самолет перемещается по траектории на расстояние

$$L_S = VT_S, \quad (4)$$

где  $V$  – скорость самолета. На рис. 2 показаны три положения пятна антенны на поверхности земли, которые соответствуют положениям самолета в начале, середине и в конце короткого интервала обработки. Заштрихованная область на рис. 2 соответствует местности, которая будет присутствовать на двух РСА изображениях, построенных по первой и второй половинам короткого интервала обработки  $L_S$  для автофокусировки. Размер этой области перекрытия  $L_{OVL}$  определяется размером пятна антенны  $L_A$ , зависящим от дальности  $R$  (для случая бокового обзора),

$$L_A \approx R\theta_A, \quad (5)$$

где  $\theta_A$  – ширина диаграммы направленности физической антенны в азимутальном направлении, и длиной короткого интервала  $L_S$  (4):

$$L_{OVL} = L_A - L_S. \quad (6)$$

Любая точка на земле в области перекрытия остается в луче реальной антенны в течение времени  $T_S$  и вносит свой вклад в собранные радиолокационные данные. Это означает, что мы можем использовать этот участок местности для оценки локальной фазовой ошибки на рассматриваемом коротком интервале.

Для того чтобы область перекрытия (6) была достаточно большой, нужно, чтобы длина короткого интервала обработки (4) была существенно меньше, чем размер пятна реальной антенны (5). Кроме того, напомним, что интервал должен быть достаточно коротким, чтобы можно было ограничиться квадратичной аппроксимацией фазовой ошибки (2), как было описано в разделе 2.

При обработке данных, собранных на коротком интервале, длина этого интервала фактически представляет собой длину синтезированной апертуры и, таким образом, задает разрешение  $\rho$  по азимуту:

$$L_S = K_w \frac{\lambda R}{2\rho}, \quad (7)$$

где  $K_w$  – коэффициент весового окна синтезированной апертуры  $w_s$ , а  $\lambda$  – длина волны радиолокатора (формула записана для случая бокового обзора). При делении короткого интервала на две части для автофокусировки разрешение, очевидно, ухудшается в два раза. Следовательно, можно сделать вывод, что разрешение на изображениях, построенных для автофокусировки, ограничено и может быть хуже, чем требуемое разрешение на конечном изображении.

Например, в случае  $R = 4$  км и  $\theta_A = 10^\circ$  размер пятна антенны  $L_A$  (5) составляет около 700 м.

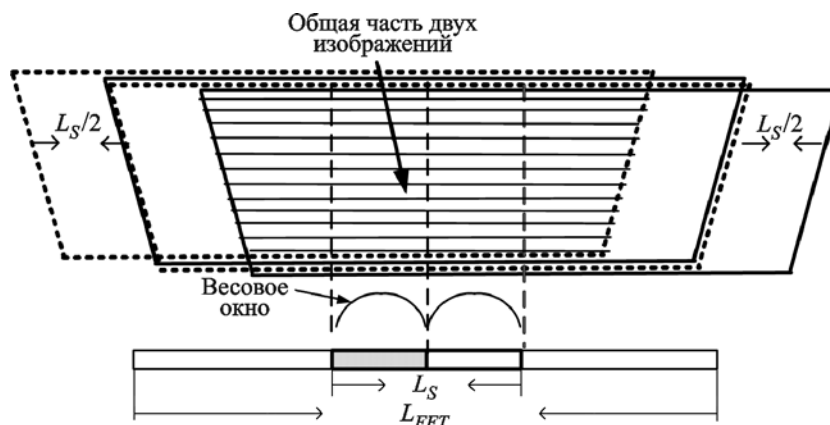


Рис. 2. Радиолокационные данные и пятна реальной антенны на земле

Для параметров  $\lambda = 3$  см,  $\rho = 3$  м (6 м при делении интервала пополам) и  $K_w = 1.3$  на той же дальности  $R = 4$  км мы получаем длину синтезированной апертуры  $L_S$  (4), равную всего 26 м.

Таким образом, на двух РСА изображениях, построенных по половинам короткого интервала, будет присутствовать практически один и тот же участок местности, примерно равный пятну антенны. С помощью алгоритма автофокусировки по смещению изображений можно будет оценить локальную квадратичную фазовую ошибку на коротком интервале.

Рассмотрим теперь особенности обработки данных в частотной области. Ширина доплеровского спектра радиолокационных данных, как известно, определяется шириной луча реальной антенны, которая в режиме бокового обзора и при условии постоянной ориентации антенны определяется как

$$\Delta F_A \approx \frac{2}{\lambda} V \theta_A. \quad (8)$$

Очевидно, что на протяжении накопления на коротком интервале обработки отдельные точечные отражатели будут находиться в разных частях луча антенны, а полосы доплеровских частот от каждого точечного отражателя – в разных частях доплеровского спектра, как проиллюстрировано на рис. 3. Центральная частота  $F_T$  каждой из полос определяется положением точечного отражателя в луче реальной антенны в момент времени  $T_S/2$ . Ширина полосы частот  $\Delta F_\rho$

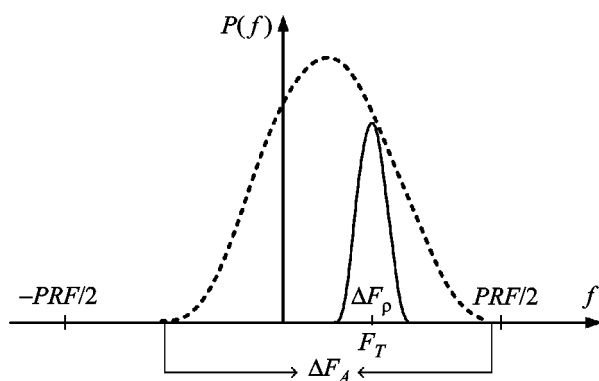


Рис. 3. Радиолокационные данные в частотной области: пунктирная линия – доплеровский спектр от всех отражателей в пятне антенны, сплошная линия – спектр от произвольного отдельного точечного отражателя

сигнала от точечной цели связана с длиной интервала (7) и, следовательно, с разрешением  $\rho$ :

$$\Delta F_\rho = K_w \frac{V}{\rho}. \quad (9)$$

Так как сигналы от разных точечных отражателей находятся в разных частях доплеровского спектра, то в отличие от стандартного дальностно-доплеровского алгоритма, в котором обрабатывается только полоса  $\Delta F_\rho$  (9), необходимо обрабатывать весь спектр  $\Delta F_A$  (8), чтобы построить РСА изображение всех точечных отражателей, которые находились в луче антенны на рассматриваемом коротком интервале данных  $T_S$ .

Еще один важный момент связан с применением весового окна при синтезировании апертуры. В стандартном дальностно-доплеровском алгоритме сигнал от всех точечных отражателей присутствует на всех доплеровских частотах, поэтому взвешивание применяется в частотной области. В случае короткого интервала необходимо применять весовое окно во временной области. Тогда после перехода в частотную область спектры всех точечных отражателей будут правильно взвешены (рис. 3).

В нижней части рис. 2 показан временной буфер данных на произвольной дальности. Общая длина буфера данных  $L_{FFT}$  выбирается таким образом, чтобы корректно вычислялась линейная свертка в частотной области, а именно  $L_{FFT} = L_S + L_A$ . Здесь же показаны два весовых окна, применяемые по очереди отдельно для двух половин короткого интервала (вторая половина при этом заменяется нулями). После обработки всей полосы доплеровских частот  $\Delta F_A$  мы получим два РСА изображения местности для автофокусировки.

#### 4. Оценка локальных квадратичных ошибок по смещениям РСА изображений

Входными параметрами для алгоритма автофокусировки по смещению изображений являются два изображения, полученные на коротком интервале  $T_S$ :

$$I_1(t) = \frac{2}{T_S} \int_{-T_S/2}^0 w_S(\tau + T_S/4) s(\tau) h^*(\tau - t) d\tau, \quad (10)$$

$$I_2(t) = \frac{2}{T_S} \int_0^{T_S/2} w_S(\tau - T_S/4) s(\tau) h^*(\tau - t) d\tau. \quad (11)$$

Здесь символ “\*” означает комплексное сопряжение. Опорная функция

$$h(t) = \exp\left[2\pi i \left(F_{DC} t + F_{DR} t^2 / 2\right)\right], \quad (12)$$

где  $F_{DC}$  – доплеровский центроид,  $F_{DR}$  – фокусирующий коэффициент, определяется на максимальном интервале синтезирования

$$-T_A/2 \leq t \leq T_A/2, \quad T_A = L_A/V. \quad (13)$$

При таком рассмотрении алгоритм автофокусировки по смещению изображений можно назвать “локальным алгоритмом автофокусировки по смещению”, так как в этом подходе данные делятся на две части и мы оцениваем локальную квадратичную ошибку в данных. Это рассмотрение отличается от стандартного алгоритма автофокусировки по смещению изображений [3, 12–13], где квадратичная ошибка ищется в опорной функции.

В случае применения дальностно-доплеровского алгоритма РСА синтезирование апертуры выполняется в частотной области по формулам:

$$I_{1,2}(t) = \int_{-\Delta F_A/2}^{\Delta F_A/2} S_{1,2}(f) H^*(f) \exp(2\pi i f t) df,$$

$$S_1(f) = \frac{2}{T_S} \int_{-T_S/2}^0 w_S(\tau + T_S/4) s(\tau) \exp(-2\pi i f \tau) d\tau,$$

$$S_2(f) = \frac{2}{T_S} \int_0^{T_S/2} w_S(\tau - T_S/4) s(\tau) \exp(-2\pi i f \tau) d\tau,$$

$$H(f) = \int_{-T_A/2}^{T_A/2} h(t) \exp(-2\pi i f t) dt.$$

Как уже было сказано в предыдущем разделе, весовое окно  $w_S(\tau)$  применяется во временной области для правильного взвешивания спектров от всех точечных отражателей. Кроме того, для получения каждого РСА изображения производится обработка всего доплеровского спектра  $\Delta F_A$ .

Получим связь между квадратичной ошибкой и сдвигом между двумя изображениями. Для этого запишем сигнал от точечной цели (1) в виде:

$$s(\tau) = w_A(\tau - t_p) \exp\left[2\pi i \left(F_{DC}(\tau - t_p) + F_{DR}(\tau - t_p)^2 / 2 + \Delta F_{DR}^E \tau^2 / 2\right)\right], \quad (14)$$

где  $\Delta F_{DR}^E = \phi''_E(t_n)/(2\pi)$  – локальная квадратичная ошибка. Здесь мы не рассматриваем линейный член фазовой ошибки (2), так как он приводит к сдвигу обоих изображений в одном направлении. Весовое окно  $w_A(t)$  описывает окно реальной антенны. Величина  $t_p$  соответствует моменту времени, когда точечная цель пересекает центр луча реальной антенны на выбранной дальности  $R$ .

Связь между коэффициентом квадратичной ошибки и сдвигом между РСА изображениями можно получить с помощью подстановки опорной функции (12) и сигнала (14) в формулы (10) и (11). Для простоты можно пренебречь весовым окном реальной антенны  $w_A(t)$  на интервале (13) и использовать прямоугольное весовое окно  $w_S(t)$  при обработке радиолокационного сигнала. Тогда, после приведения (10) и (11) к симметричным пределам, взятия модуля (корреляция вычисляется для модулей) и некоторых элементарных выкладок, получим:

$$I_1(t) = \frac{2}{T_S} \left| \int_{-T_S/4}^{T_S/4} \exp\left[2\pi i \left(-F_{DR} t_p \tau + \Delta F_{DR}^E \tau^2 / 2 - \Delta F_{DR}^E \tau T_S / 4\right)\right] \exp[2\pi i (F_{DR} t \tau)] d\tau \right|, \quad (15)$$

$$I_2(t) = \frac{2}{T_S} \left| \int_{-T_S/4}^{T_S/4} \exp\left[2\pi i \left(-F_{DR} t_p \tau + \Delta F_{DR}^E \tau^2 / 2 + \Delta F_{DR}^E \tau T_S / 4\right)\right] \exp[2\pi i (F_{DR} t \tau)] d\tau \right|. \quad (16)$$

Фазовым множителем  $\exp(\pi i \Delta F_{DR}^E \tau^2)$  в (15), (16) можно пренебречь, так как он приводит только к расфокусировке синтезированных лучей и не влияет на смещение двух изображений. Кроме того, при рассмотрении алгоритма автофокусировки по смещению изображений на коротких временных интервалах величина этой расфокусировки небольшая. С учетом указанных упрощений интегралы (15) и (16) вычисляются аналитически:

$$|I_1(t)| = \left| \text{sinc} \left\{ \pi \left[ F_{DR}(t - t_p) - \Delta F_{DR}^E (T_S/4) \right] (T_S/2) \right\} \right|, \quad (17)$$

$$|I_2(t)| = \left| \text{sinc} \left\{ \pi \left[ F_{DR}(t - t_p) + \Delta F_{DR}^E (T_S/4) \right] (T_S/2) \right\} \right|. \quad (18)$$

Точечная цель на изображениях смещена из своего настоящего положения  $t = t_p$  в новые положения  $t_{1\max}$  и  $t_{2\max}$ , которые определяются максимумами функций (17), (18). Тогда связь между сдвигом изображений и коэффициентом квадратичной ошибки дается следующим выражением:

$$\Delta t_{\max} = t_{2\max} - t_{1\max} = \frac{\Delta F_{DR}^E (T_S/2)}{F_{DR}}. \quad (19)$$

Сдвиг (19), как правило, измеряется по положению максимума корреляционной функции двух изображений:

$$R(\Delta t) = \int |I_1(t)|^2 |I_2(t + \Delta t)|^2 dt. \quad (20)$$

Для повышения точности нахождения положения корреляционного максимума (20) полученные РСА изображения представляют в логарифмической шкале. Кроме того, для выделения контрастных частей и уменьшения влияния ярких точек необходимо проводить локальное усреднение и нормирование изображений.

## 5. Практическая реализация алгоритма автофокусировки

Все вышеизложенные идеи использованы в предложенном методе автофокусировки для РСА бокового обзора – методе локально-квадратичной автофокусировки по смещению изображений (Local-Quadratic Map-Drift Autofocus (LQMDA)). Основные этапы метода показаны на рис. 4.

Перед применением автофокусировки должна быть выполнена стандартная компенсация оши-

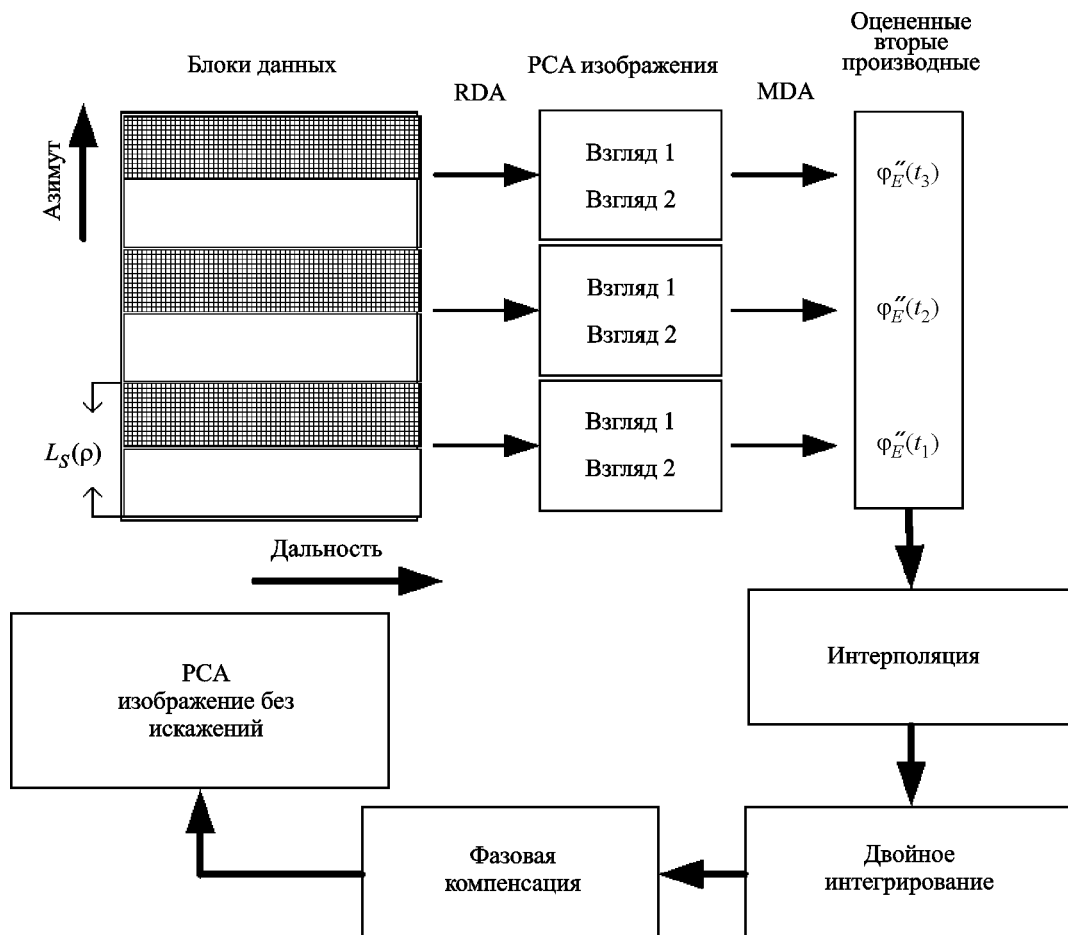


Рис. 4. Блок-схема алгоритма автофокусировки LQMDA



бок движения в радиолокационных данных с использованием реальной траектории полета, измеренной навигационной системой. Алгоритм автофокусировки используется для оценки остаточных фазовых ошибок.

На первом этапе радиолокационные данные делятся на блоки малого размера в азимутальном направлении. Далее каждый блок делится пополам и обрабатывается с помощью дальностно-доплеровского алгоритма, модифицированного для обработки данных на коротких временных интервалах. В результате мы получаем два независимых РСА изображения, которые используются для оценки локальной квадратичной фазовой ошибки с помощью алгоритма автофокусировки по смещению изображений для каждого блока. После нахождения локальных оценок мы получаем последовательность вторых производных фазовой ошибки (рис. 1). Тогда произвольная остаточная фазовая ошибка может быть восстановлена с помощью двойного интегрирования.

Как уже говорилось, при проведении двойного интегрирования необходимо найти и компенсировать неизвестные константы интегрирования и линейные тренды, возникающие из-за шума оценки второй производной. Отметим причины возникновения линейных трендов. Случайный процесс, который получается в результате интегрирования стационарного шума (в нашем случае шума оценки), будет иметь дисперсию, линейно растущую во времени. При рассмотрении одной реализации такого случайного процесса описанный рост дисперсии будет выглядеть как случайный линейный тренд. Поскольку автофокусировка применяется для нахождения остаточных ошибок, т. е. после применения компенсации ошибок на основе данных навигационной системы, мы можем считать, что ни в первой производной остаточной фазовой ошибки, ни в самой ошибке не должно быть каких-либо линейных трендов на всей длине кадра, вызванных некомпенсированными траекторными отклонениями. Другими словами, некомпенсированные траекторные отклонения носят локальный характер. Поэтому неизвестные постоянные интегрирования и линейные тренды можно легко найти и компенсировать следующим образом. После каждого интегрирования мы вписываем в полученную зависимость прямую линию по методу наименьших квадратов, после

чего вычитаем эту линию из найденной зависимости.

Математически эту процедуру можно записать так:

$$1) \text{ первое интегрирование, } \tilde{\varphi}'_E(t) = \int_0^t \varphi''_E(t) dt;$$

2) вписывание прямой линии,

$$A_1 t + B_1 = \text{FitLine}\{\tilde{\varphi}'_E(t)\};$$

$$3) \text{ компенсация, } \varphi'_E(t) = \tilde{\varphi}'_E(t) - (A_1 t + B_1);$$

$$4) \text{ второе интегрирование, } \tilde{\varphi}_E(t) = \int_0^t \varphi'_E(t) dt;$$

5) вписывание прямой линии,

$$A_2 t + B_2 = \text{FitLine}\{\tilde{\varphi}_E(t)\};$$

$$6) \text{ компенсация, } \varphi_E(t) = \tilde{\varphi}_E(t) - (A_2 t + B_2).$$

Здесь  $\varphi''_E(t)$  – это оцененный временной ряд второй производной;  $\tilde{\varphi}_E(t)$  и  $\tilde{\varphi}'_E(t)$  – промежуточные значения остаточной фазовой ошибки и ее первой производной, в которых присутствуют линейные тренды шума оценки и константы интегрирования;  $\varphi_E(t)$  – восстановленная остаточная фазовая ошибка.

Таким образом, в результате проведения вышеописанных операций мы находим временной ряд остаточной фазовой ошибки. Далее производится ее компенсация в радиолокационных данных. После применения алгоритма РСА обработки к откорректированным радиолокационным данным мы получаем хорошо сфокусированное РСА изображение.

Предложенный алгоритм автофокусировки может быть легко сопряжен со стандартным дальностно-доплеровским алгоритмом, который применяется ко всему кадру. Структурная схема такой обработки с применением предложенного алгоритма автофокусировки показана на рис. 5. На первом этапе обработки выполняется сжатие радиолокационных данных по дальности и процедура компенсации ошибок движения без учета зависимости от дальности. После этого производится коррекция миграции по дальности в частотной области. Далее выполняется процедура компенсации ошибок движения с учетом зависимости от дальности. Стоит отметить, что в компенсации, описанной выше, используются траекторные измерения, полученные навигационной системой. Предложенный алгоритм автофокусировки используется для оценки остаточной фазовой ошибки в радиолокационном сигнале. Затем

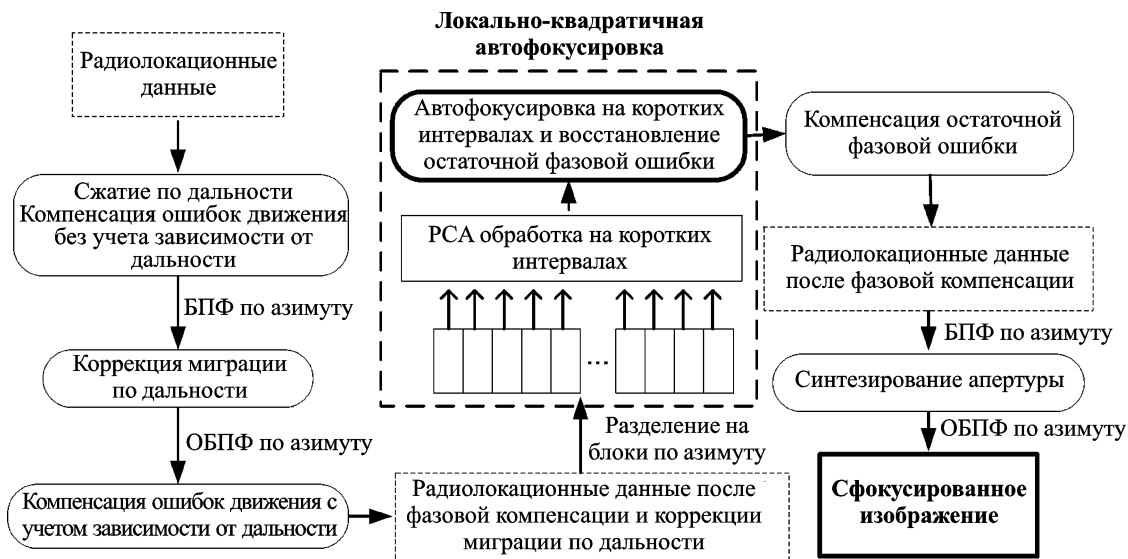


Рис. 5. Применение алгоритма локально-квадратичной автофокусировки по смещению изображений в рамках стандартного дальностно-доплеровский алгоритма

найденная остаточная фазовая ошибка компенсируется в радиолокационном сигнале. На последнем этапе производится синтезирование апертуры в частотной области в соответствии со стандартным дальностно-доплеровским алгоритмом.

Стоит отметить, что предложенный алгоритм локально-квадратичной автофокусировки может быть использован совместно с другими алгоритмами РСА обработки.

### 6. Экспериментальные результаты

В этом разделе проиллюстрирована эффективность предложенного алгоритма автофокусировки. Радиолокационные данные были получены с помощью РСА системы RIAN-SAR-X [16], разработанной в Радиоастрономическом институте Национальной академии наук Украины.

Пример ошибки наклонной дальности, вызванной отклонениями траектории полета самолета от прямой линии и измеренной навигационной системой с GPS-приемником, показан на рис. 6, а. Можно видеть, что ошибка наклонной дальности за 30 с полета достигает 10 м. Средняя скорость полета самолета была около 40 м/с, высота – около 1900 м. Остаточная фазовая ошибка, оцененная с помощью предложенного алгоритма LQMDA, показана на рис. 6, б. Как видно, значения этой ошибки демонстрирует вариации в пределах  $\pm 30$  см.

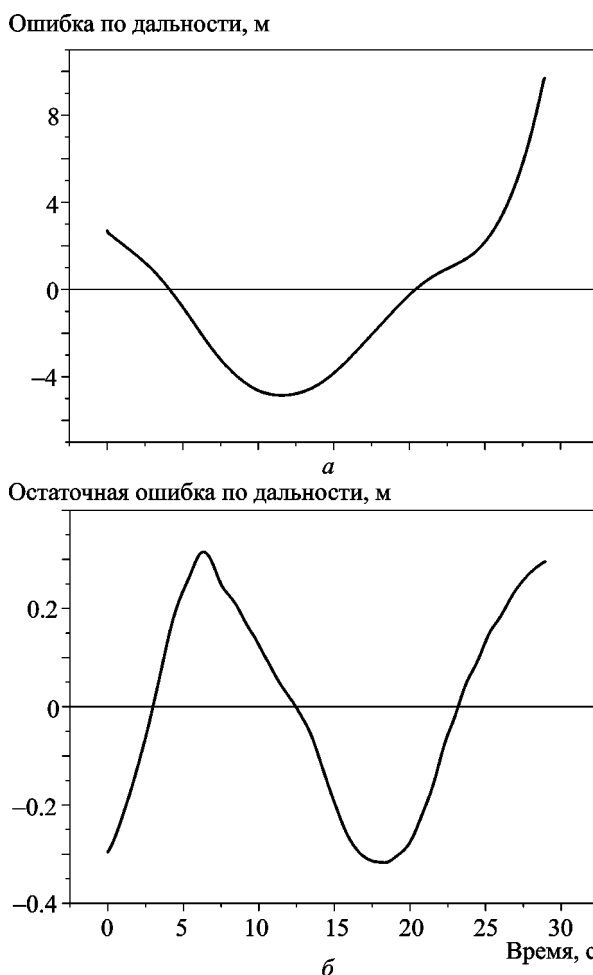


Рис. 6. Ошибка наклонной дальности, измеренная навигационной системой, (а) и остаточная ошибка по дальности, оцененная с помощью алгоритма LQMDA, (б)

На рис. 7, а приведено РСА изображение с разрешением 3 м и 25 взглядами, которое было получено с помощью дальностно-доплеровского алгоритма без применения методов автофокусировки. Видно, что остаточная фазовая ошибка, показанная на рис. 6, б, приводит к сильной расфокусировке РСА изображения. РСА изображение, построенное с использованием предложенного метода автофокусировки, приведено на рис. 7, б. Можно убедиться в том, что полученное РСА изображение хорошо сфокусировано. Сравнение рис. 7, а и 7, б подтверждает эффективность метода LQMDA.

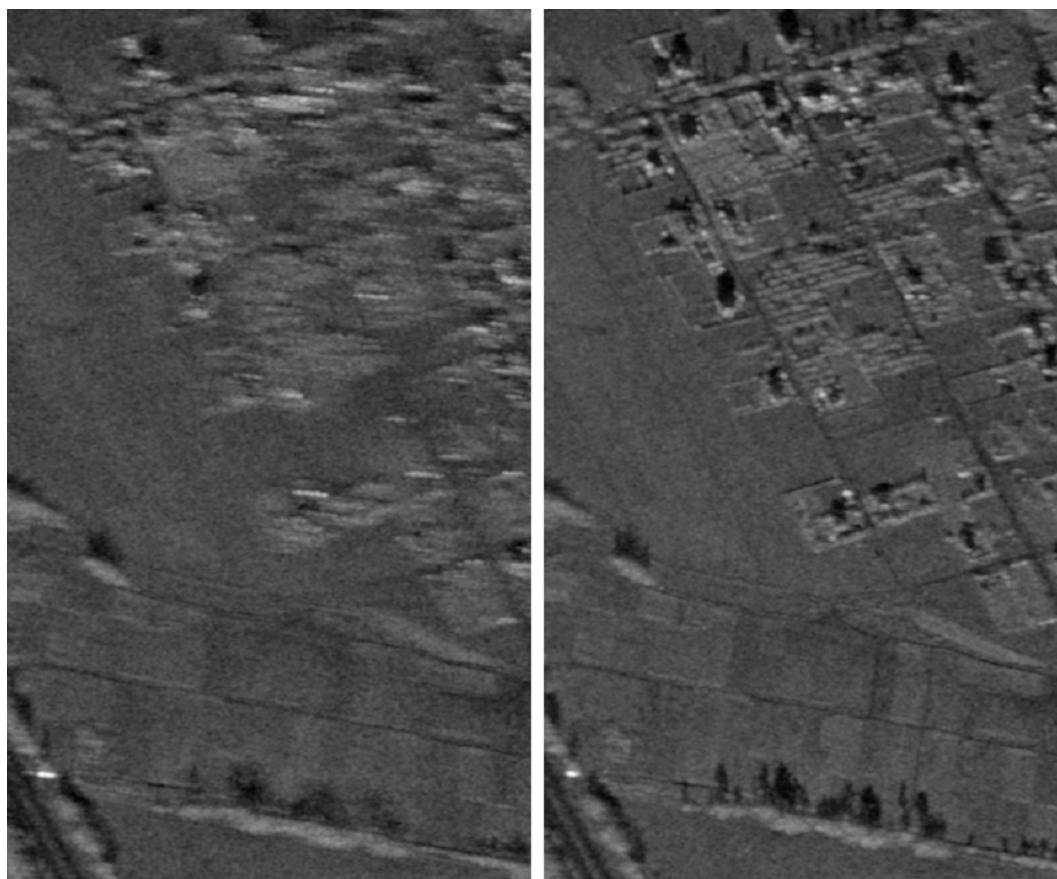
## 7. Заключение

Предложенный метод автофокусировки является эффективным инструментом для оценки фазовых ошибок для РСА бокового обзора. Ввиду ограниченной точности навигационных систем с GPS-

приемниками алгоритмы автофокусировки имеют ключевое значение в современных радиолокаторах с высокой разрешающей способностью. Разработанный метод позволяет оценивать и компенсировать остаточные фазовые ошибки в радиолокационном сигнале и существенно улучшать качество РСА изображений. Представленные экспериментальные результаты демонстрируют эффективность метода.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Oliver C. and Quegan S.* Understanding Synthetic Aperture Radar Images. – Norwood, MA: Artech House, 1998. – 480 pp.
2. *Franceschetti G. and Lanari R.* Synthetic Aperture Radar Processing. – Napoli: CRC Press, 1999. – 328 pp.
3. *Carrara W. G., Goodman R. S., and Majewski R. M.* Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms. – Boston, London: Artech House, 1995.
4. *Wahl D. E., Eichel P. H., Ghiglia D. C., and Jakowatz C. V. Jr.* Phase gradient autofocus – A robust tool for high resolution



а

б

Рис. 7. РСА изображение (25 взглядов, разрешение 3 м), построенное без автофокусировки (а) и с применением предложенного алгоритма LQMDA (б)

- phase correction // IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. 1994. – Vol. 30, No. 3. – P. 827–835.
5. *Wahl D. E., Jakowatz C. V. Jr., Thompson P. A., and Ghiglia D. C.* New approach to strip-map SAR autofocus // Digital Signal Processing Workshop, Sixth IEEE. – Yosemite National Park, CA (USA). – 1994. – P. 53–56.
  6. *Samczynski P. and Kulpa K.* Coherent mapdrift technique // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2010. – Vol. 48, No. 3. – P. 1505–1517.
  7. *Cantalloube H. M. J. and Nahum C. E.* Motion compensation and autofocus of range/Doppler or two-dimensional processing for airborne synthetic aperture radar // Aerosp. Sci. Technol. – 1988. – Vol. 2, Is. 4. – P. 251–263.
  8. *Cantalloube H. M. J. and Nahum C. E.* Multiscale local map-drift-driven multilateration SAR autofocus using fast polar format algorithm image synthesis // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2010. – Vol. 49, No. 10. – P. 3730–3736.
  9. *Bezvesilnyy O. O., Vinogradov V. V., and Vavriv D. M.* Estimating Doppler centroid and autofocusing for airborne SAR // Proc. Int. Radar Symp. IRS 2005. – Berlin (Germany). – 2005. – P. 59–63.
  10. *Calloway Terry M. and Donohoe Gregory W.* Subaperture autofocus for synthetic aperture radar // IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. – 1994. – Vol. 30, No. 2. – P. 617–621.
  11. *Moreira Joao R.* A new method of aircraft motion error extraction from radar raw data for real time motion compensation // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 1990. – Vol. 28, No. 4. – P. 620–626.
  12. *Dall J.* A fast autofocus algorithm for synthetic aperture radar processing // Proc. IEEE ICASSP-92, March, 1992, vol. 3. – San Francisco, CA (USA). – 1992. – P. III-5–III-8.
  13. *Dall J.* A new frequency domain autofocus algorithm for SAR // Proc. IEEE IGARSS'91, June 1991, vol. 2. – Helsinki (Finland). – 1991. – P. 1069–1072.
  14. *Cumming I. G. and Wong F. H.* Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation. – Norwood, MA: Artech House, 2005. – 625 pp.
  15. *Bezvesilnyy O. O., Gorovyi I. M., Vinogradov V. V., and Vavriv D. M.* Multi-look Radiometric Correction of SAR Images // Радиофизика и радиоастрономия. – 2011. – Т. 16, № 4. – С. 424–432.
  16. *Vavriv D. M., Bezvesilnyy O. O., Kozhin R. V., Vinogradov V. V., Volkov V. A., and Sekretarov S. S.* SAR Systems for Light-Weight Aircrafts // Proc. 2011 Microwaves, Radar and Remote Sensing Symp. MRRS-2011. – Kiev (Ukraine). 2011. – P. 15–19.

*O. O. Bezvesilnyy, S. M. Goroviy, D. M. Vavriv*

Радіоастрономічний інститут НАН України,  
вул. Червонопрапорна, 4, м. Харків, 61002, Україна

#### ЛОКАЛЬНО-КВАДРАТИЧНЕ АВТОФОКУСУВАННЯ ЗА ЗМІЩЕННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ ДЛЯ РАДІОЛОКАТОРІВ ІЗ СИНТЕЗОВАНОЮ АПЕРТУРОЮ

Некомпенсовані фазові помилки призводять до погіршення якості радіолокаційних зображень, отриманих за допомогою радіолокаторів із синтезованою апертурою (РСА). Особливо помітно цей ефект проявляється в системах із високим просторовим розрізненням. Пропонується новий підхід до оцінки залишкових фазових помилок в радіолокаційних сигналах РСА бічного огляду. Головна ідея методу полягає в оцінці локальних квадратичних помилок на коротких часових інтервалах із наступним відтворенням невідомої фазової помилки на часових інтервалах довільної довжини. Для локальної оцінки використовується алгоритм автофокусування за зміщенням зображень – Map-Drift Autofocus (MDA). Ефективність запропонованого методу підтверджена прикладами реальних радіолокаційних даних.

*O. O. Bezvesilnyy, I. M. Goroviy, and D. M. Vavriv*

Institute of Radio Astronomy, National Academy  
of Sciences of Ukraine,  
4, Chervonopraporna St., Kharkiv, 61002, Ukraine

#### LOCAL-QUADRATIC MAP-DRIFT AUTOFOCUS FOR SYNTHETIC APERTURE RADARS

Uncompensated phase errors lead to quality degradation of images obtained by synthetic aperture radars (SAR). This effect is especially critical for systems with high spatial resolution. A novel approach to estimating residual phase errors in stripmap SAR signals is suggested. The idea of the method is to estimate the local quadratic phase errors on short time intervals with the subsequent reconstruction of the unknown phase error on the time intervals of arbitrary length. The map-drift autofocus (MDA) algorithm is used for the local estimation. The performance of the proposed method is demonstrated with real radar data examples.

*Статья поступила в редакцию 16.05.2012*