

DOI 10.24412/2221-2574-2022-1-14-22

УДК 621.396.962.33

УВЕЛИЧЕНИЕ ГЛУБИНЫ АВТОФОКУСИРОВКИ В РСА АВИАЦИОННОГО БАЗИРОВАНИЯ

Карпов Олег Анатольевич

доктор технических наук, старший научный сотрудник ЗАО «АЭРОКОН».

E-mail: karp.smtp@mail.ru

Савостьянов Владимир Юрьевич

кандидат технических наук, доцент, ведущий инженер ЗАО «АЭРОКОН».

E-mail: v-savostyanov@yandex.ru

Цветков Олег Евгеньевич

кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник ЗАО «АЭРОКОН».

E-mail: al.vetckov@yandex.ru

Адрес: 140180, Российская Федерация, Московская обл., г. Жуковский, ул. Жуковского, д. 1.

Аннотация: Для повышения качества радиолокационного изображения в РСА авиационного базирования необходимо при обработке сигналов учитывать изменение функции траекторной фазовой ошибки от расстояния до поверхности. В статье рассматривается возможность использования для этого дифференциальных поправок, получаемых в результате выполнения автофокусировки в трёх точках зоны обзора по дальности. Приведены описание алгоритма и результаты его моделирования. Показано, что после применения предложенного алгоритма автофокусировки остаточные погрешности практически не зависят от дальности и примерно в 10 раз меньше, чем для алгоритма автофокусировки в центре кадра.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированием апертуры антенны (РСА), флуктуации фазы траекторного сигнала, автофокусировка радиолокационного изображения, траекторный сигнал, радиолокационное изображение, флуктуации фазы, автофокусировка, моделирование.

Введение

Как известно [1–4], наиболее серьёзной причиной ухудшения качества изображения в радиолокаторах с синтезированием апертуры антенны (РСА) является расфокусировка изображения, вызванная нарушением когерентности обработки сигналов, принимаемых на интервале синтезирования. Основными причинами искажений фазы сигнала являются нестабильность траектории и упругие колебания конструкции летательного аппарата, а также фазовая нестабильность приёмо-передающего тракта РСА и электрическая неоднородность среды распространения радиоволн [1–3].

В современных РСА компенсация флуктуаций фазы траекторного сигнала осуществляется сначала по информации от навигационной системы (НС), а затем – с помощью автофокусировки радиолокационного изображения (РЛИ), в которой тем или иным образом оцениваются флуктуации фаз сигналов по самим траекторным сигналам или РЛИ, и с учётом полученных оценок осуществляется

устранение искажений [1, 2].

В настоящее время известно множество алгоритмов автофокусировки, позволяющих достичь требуемого качества РЛИ и различающихся методами реализации (параметрические [4, 5] и непараметрические [6, 7]), применяемыми критериями (по минимуму среднего квадрата ошибки [8], минимуму энтропии [6, 9], максимуму контрастности [10, 11], по максимуму четкости [12, 13] и т.д.), организацией обработки данных (однократные [14] и итерационные [15]), зависимостью от положения объекта (пространственно-инвариантные и пространственно-зависимые) и уровнем автоматизации (интерактивные и автономные). Такое разнообразие критериев, приводящих, вообще говоря, к разным результатам оптимизации, подталкивает исследователей к поиску универсальных решений [15], а дефицит вычислительных ресурсов бортового оборудования носителя РСА – к поиску быстрых алгоритмов автофокусировки [14]. В любом случае решение этой сложной задачи приводит к ком-

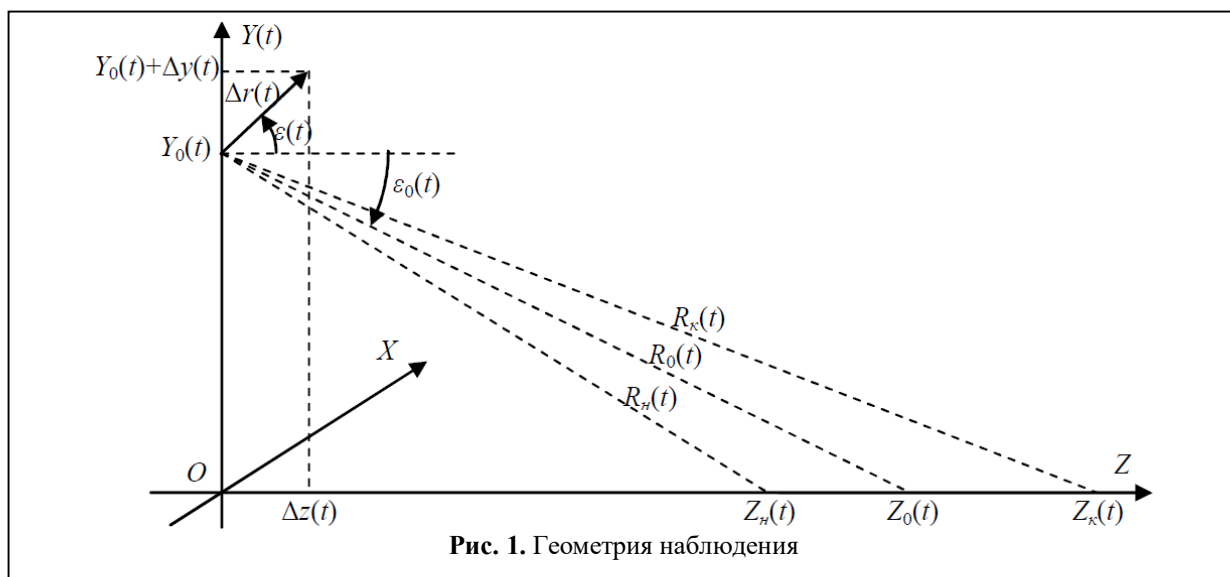


Рис. 1. Геометрия наблюдения

промиссу между качеством фокусировки и скоростью настройки.

Для РСА наибольший интерес представляют непараметрические автономные алгоритмы автофокусировки с различными критериями оценки качества РЛИ [6, 7]. Именно эти алгоритмы позволяют оперативно компенсировать флуктуации фазы траекторного сигнала практически любой формы, что особенно важно для лёгких летательных аппаратов авиационного базирования. Однако данные алгоритмы являются пространственно-инвариантными, поэтому остаётся ещё один очень важный вопрос: как, используя этот математический аппарат, наилучшим образом обеспечить надлежащее качество по всему полю РЛИ.

Целью работы является разработка эффективного алгоритма автофокусировки с компенсацией фазовых ошибок во всем диапазоне дальностей при синтезе радиолокационных изображений РСА авиационного базирования.

Постановка задачи

Определим подвижную систему координат (СК) $OXYZ$ (см. рис. 1), у которой в каждый момент времени $t = -T_c/2 \dots T_c/2$ (T_c — время синтезирования) ось OY совпадает с местной вертикалью и проходит через точку предполагаемого положения фазового центра (ФЦА) РСА, точка центра РЛИ всегда находится

на оси OZ , а ось OX дополняет СК до правой тройки.

Примем, что движение РСА задано прямолинейным и горизонтальным, обзор боковым, а геометрия наблюдения в СК $OXYZ$ определена параметрами:

- $Y_0(t)$ — высота РСА над поверхностью;
- $Z_n(t)$ и $Z_k(t)$ — координаты начала и конца зоны обзора по дальности в проекции на плоскость XOZ ;

$$R_n(t) = \sqrt{(Y_0(t))^2 + (Z_n(t))^2} \quad \text{и}$$

$R_k(t) = \sqrt{(Y_0(t))^2 + (Z_k(t))^2}$ — значения наклонной дальности до начала и конца зоны обзора по дальности;

$$\varepsilon_0(t) = -\frac{\text{atan}(Y_0(t)/Z_n(t)) + \text{atan}(Y_0(t)/Z_k(t))}{2}$$

— среднее значение угла визирования зоны обзора по дальности;

$$Z_0(t) = -\frac{Y_0(t)}{\tan(\varepsilon_0(t))}$$

— координата z для угла визирования $\varepsilon_0(t)$;

$$R_0(t) = \sqrt{(Y_0(t))^2 + (Z_0(t))^2}$$

— значение наклонной дальности для угла визирования $\varepsilon_0(t)$.
Для каждого момента времени t неучтённое траекторное отклонение ФЦА РСА представим в виде вектора, имеющего модуль $\Delta r(t)$

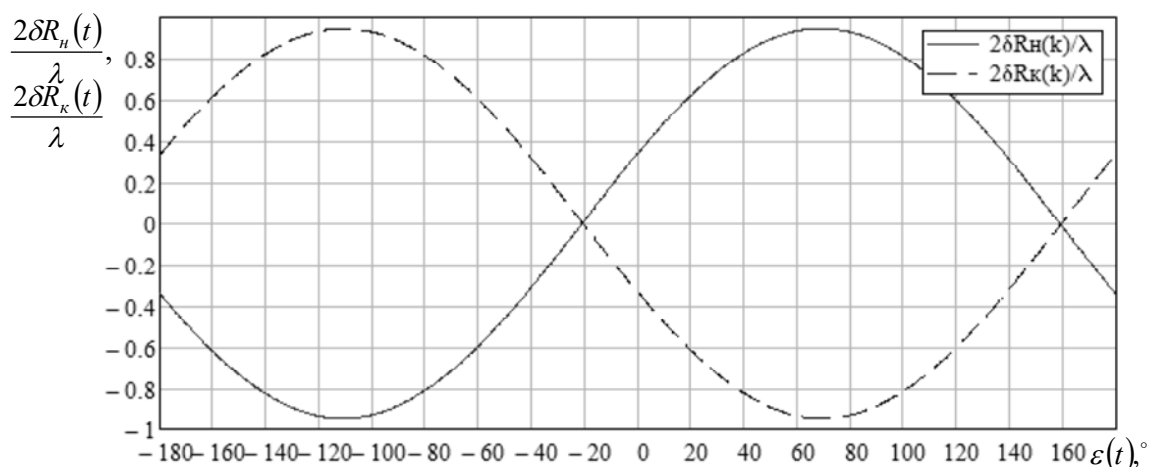


Рис. 2. Нормированные к $\lambda/2$ зависимости $\delta R_n(t)$ и $\delta R_k(t)$ от $\varepsilon(t)$

и угол $\varepsilon(t)$, где $\Delta y(t) = \Delta r(t) \cdot \sin(\varepsilon(t))$ и $\Delta z(t) = \Delta r(t) \cdot \cos(\varepsilon(t))$ — проекции вектора соответственно на оси OY и OZ (см. рис. 1).

Предположим, что на выходе алгоритма автофокусировки была оценена траекторная ошибка

$\Delta R_0(t) = \sqrt{(Y_0(t) + \Delta y(t))^2 + (Z_0(t) - \Delta z(t))^2} - R_0(t)$, соответствующая дальности $R_0(t)$. Тогда для других значений дальности $R(t)$ траекторная ошибка $\Delta R(t)$ будет

$$\Delta R(t) = \sqrt{(Y_0(t) + \Delta y(t))^2 + (Z(t) - \Delta z(t))^2} - R(t), \quad (1)$$

а изменение траекторной ошибки $\Delta R(t)$ по отношению к $\Delta R_0(t)$ (дифференциальная ошибка $\delta R(t)$) составит:

$$\begin{aligned} \delta R(t) &= \Delta R(t) - \Delta R_0(t) \approx \\ &\approx \left(\frac{Y_0(t)}{R_n(t)} - \frac{Y_0(t)}{R_0(t)} \right) \Delta y(t) - \left(\frac{Z_n(t)}{R_n(t)} - \frac{Z_0(t)}{R_0(t)} \right) \Delta z(t) = \\ &= \Delta r(t) \cdot \left(\left(\frac{Y_0(t)}{R_n(t)} - \frac{Y_0(t)}{R_0(t)} \right) \sin(\varepsilon(t)) - \right. \\ &\quad \left. - \left(\frac{Z_n(t)}{R_n(t)} - \frac{Z_0(t)}{R_0(t)} \right) \cos(\varepsilon(t)) \right). \quad (2) \end{aligned}$$

Из выражения (2) видно, что дифференциальная ошибка $\delta R(t)$ зависит не только от геометрии наблюдения и модуля ошибки $\Delta r(t)$, но

также от угла $\varepsilon(t)$. На рис. 2 для некоторого произвольного момента времени t в качестве примера показаны нормированные к половине длины волны $\lambda/2$ зависимости $\delta R(t)$ от $\varepsilon(t)$ для $R_n(t)$ ($\delta R_n(t)$) и $R_k(t)$ ($\delta R_k(t)$) при $Y_0(t) = 2$ км, $Z_0(t) = 5,6$ км, $Z_k(t) - Z_n(t) = 240$ м, $\lambda = 2$ см и $\Delta r(t) = 1$ м.

Найдя частную производную $\delta R(t)$ по $\varepsilon(t)$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \delta R(t)}{\partial \varepsilon(t)} &\approx \Delta r(t) \cdot \left(\left(\frac{Y_0(t)}{R(t)} - \frac{Y_0(t)}{R_0(t)} \right) \cos(\varepsilon(t)) + \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{Z(t)}{R(t)} - \frac{Z_0(t)}{R_0(t)} \right) \sin(\varepsilon(t)) \right) \end{aligned}$$

и приравняв её нулю, можно показать, что максимальное по модулю значение параметра $\delta R(t)$, примерно равно

$$\max \{ |\delta R(t)| \} \approx \Delta r(t) \frac{Y_0(t) \cdot (Z_0(t) - Z(t))}{R_0(t) R(t)},$$

соответствует углам, близким к $\varepsilon(t) = \varepsilon_0(t) \pm 90^\circ$. Это также видно из рис. 2, где для описанных выше условий наблюдения $\varepsilon_0(t) \approx -21^\circ$.

Если допустить, что для обеспечения когерентности обработки сигналов максимальная фазовая ошибка не должна превышать $\pi/8$, диапазон дальности $R_n(t) \dots R_k(t)$ следует разбивать на

$$N_a = \frac{\max \{ \delta R(t) \} - \min \{ \delta R(t) \}}{\lambda/32} \approx$$

$$\approx \frac{32\Delta r(t)Y_0(t) \cdot (Z_k(t) - Z_n(t))}{\lambda R_n(t)R_k(t)}$$

каналов, в каждом из которых можно считать фазовую ошибку пространственно-инвариантной. К каждому такому участку можно применить свою (независимую) автофокусировку, а затем из отдельно сфокусированных участков сформировать полное РЛИ [1–3].

Проблема заключается в том, что количество каналов дальности может оказаться слишком велико. Так, для рассмотренного выше примера $N_a \approx 30$, что существенно усложняет обработку сигналов. Очевидно, что следует искать иные способы решения этой проблемы.

Алгоритм обработки сигналов

Из выражения (2) для $\delta R(t)$ можно составить систему линейных уравнений для оценённых значений $\delta R_n(t)$ и $\delta R_k(t)$

$$\begin{cases} \delta R_n(t) = a_n(t)\Delta y(t) + b_n(t)\Delta z(t) \\ \delta R_k(t) = a_k(t)\Delta y(t) + b_k(t)\Delta z(t) \end{cases} \quad (3)$$

с известными коэффициентами

$$a_n(t) = \frac{Y_0(t)}{R_n(t)} - \frac{Y_0(t)}{R_0(t)}, \quad b_n(t) = \frac{Z_n(t)}{R_n(t)} - \frac{Z_0(t)}{R_0(t)},$$

$$a_k(t) = \frac{Y_0(t)}{R_k(t)} - \frac{Y_0(t)}{R_0(t)}, \quad b_k(t) = \frac{Z_k(t)}{R_k(t)} - \frac{Z_0(t)}{R_0(t)}.$$

Тогда, решив систему уравнений (3), можно получить оценки ошибок $\Delta y(t)$ и $\Delta z(t)$

$$\begin{cases} \widehat{\Delta y}(t) = \frac{\delta R_k(t)b_n(t) - \delta R_n(t)b_k(t)}{a_k(t)b_n(t) - a_n(t)b_k(t)} \\ \widehat{\Delta z}(t) = \frac{\delta R_k(t)a_n(t) - \delta R_n(t)a_k(t)}{a_k(t)b_n(t) - a_n(t)b_k(t)} \end{cases}, \quad (4)$$

потом рассчитать значения дифференциальных поправок $\widehat{\delta R}(t)$ для всех дискретов в диапазоне дальности $R_n(t) \dots R_k(t)$ по формуле

$$\widehat{\delta R}(t) = \left(\frac{Y_0(t)}{R(t)} - \frac{Y_0(t)}{R_0(t)} \right) \cdot \widehat{\Delta y}(t) - \left(\frac{\sqrt{(R(t))^2 - (Y_0(t))^2}}{R(t)} - \frac{Z_0(t)}{R_0(t)} \right) \cdot \widehat{\Delta z}(t), \quad (5)$$

а затем использовать эти дифференциальные

поправки при компенсации фазовых искажений $\widehat{\Delta R}(t) = \Delta R_0(t) + \widehat{\delta R}(t)$, $R(t) = R_n(t) \dots R_k(t)$. (6)

Сложность реализации данного способа состоит в том, что все существующие алгоритмы автофокусировки нечувствительны к начальной фазе траекторного сигнала и её первой производной. Тогда, предположив, что средние значения ошибок $\Delta y(t)$, $\Delta z(t)$ и их первых производных на интервале синтеза равны нулю, можно получить следующий алгоритм обработки сигналов для увеличения глубины автофокусировки в РСА:

- 1) компенсация траекторных изменений фазы принимаемого сигнала по данным бортовой НС для всех дискретов дальности картографируемого участка поверхности;
 - 2) вычисление траекторных фазовых ошибок для дискретов дальности в начале ($\varphi_n(t)$), в середине ($\varphi_0(t)$) и в конце ($\varphi_k(t)$) участка картографирования с использованием непараметрического алгоритма автофокусировки;
 - 3) вычисление изменений расстояния в начале ($\Delta R_n(t)$), в центре ($\Delta R_0(t)$) и в конце ($\Delta R_k(t)$) участка картографирования;
 - 4) оценка и компенсация зависящих от t линейных компонент (остаточных радиальных скоростей) в функциях $\Delta R_n(t)$, $\Delta R_0(t)$ и $\Delta R_k(t)$;
 - 5) оценка и компенсация постоянных составляющих в функциях $\Delta R_n(t)$, $\Delta R_0(t)$ и $\Delta R_k(t)$;
 - 6) вычисление дифференциальных ошибок $\delta R_n(t)$ и $\delta R_k(t)$;
 - 7) фильтрация (сглаживание) функций $\delta R_n(t)$ и $\delta R_k(t)$;
 - 8) вычисление оценок ошибок $\widehat{\Delta y}(t)$ и $\widehat{\Delta z}(t)$ в соответствии с выражением (4);
 - 9) вычисление дифференциальных поправок $\widehat{\delta R}(t)$ и функции $\widehat{\Delta R}(t)$ для всего диапазона дальности $R_n(t) \dots R_k(t)$ в соответствии с выражениями (5) и (6);
 - 10) компенсация остаточных траекторных искажений фазы принятого сигнала.
- Структурная схема этого алгоритма обработки сигналов представлена на рис. 3.

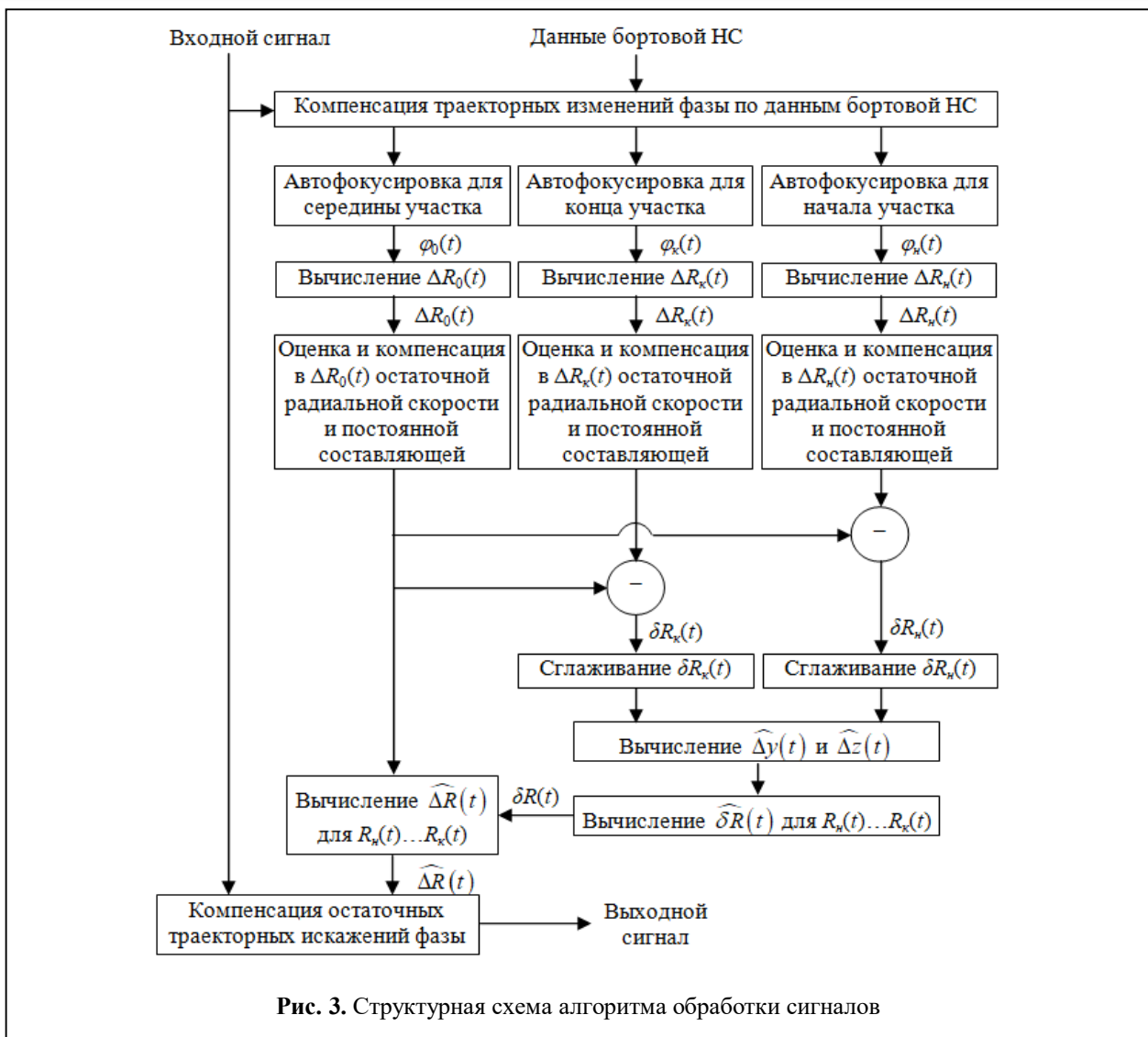


Рис. 3. Структурная схема алгоритма обработки сигналов

Если качество РЛИ оценивать по средне-квадратической ошибке (СКО) определения наклонного расстояния в диапазоне дальности $R_n(t) \dots R_k(t)$, то можно сравнить, как изменяется этот показатель при использовании автофокусировки только по середине участка картографирования ($\sigma_0(R)$) и при использовании дифференциальных поправок в соответствии с описанным выше алгоритмом ($\sigma(R)$):

$$\begin{cases} \sigma_0(R) = \frac{2}{\lambda} \sqrt{\frac{1}{T_c} \int_{-T_c/2}^{T_c/2} (\Delta R(t) - \Delta R_0(t))^2 dt} \\ \sigma(R) = \frac{2}{\lambda} \sqrt{\frac{1}{T_c} \int_{-T_c/2}^{T_c/2} (\Delta R(t) - \widehat{\Delta R}(t))^2 dt} \end{cases} \quad (7)$$

Соответственно, значение интегральной СКО по всему диапазону дальности $R_n(t) \dots R_k(t)$ для автофокусировки только по середине участка картографирования ($\overline{\sigma_0}$) и при использовании дифференциальных поправок ($\overline{\sigma}$) можно рассчитать по формулам:

$$\begin{cases} \overline{\sigma_0} = \sqrt{\frac{1}{R_k - R_n} \int_{R_n}^{R_k} (\sigma_0(R))^2 dR}, \\ \overline{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{R_k - R_n} \int_{R_n}^{R_k} (\sigma(R))^2 dR}. \end{cases} \quad (8)$$

Результаты моделирования

Для оценки потенциальных возможностей данного алгоритма было выполнено имитаци-

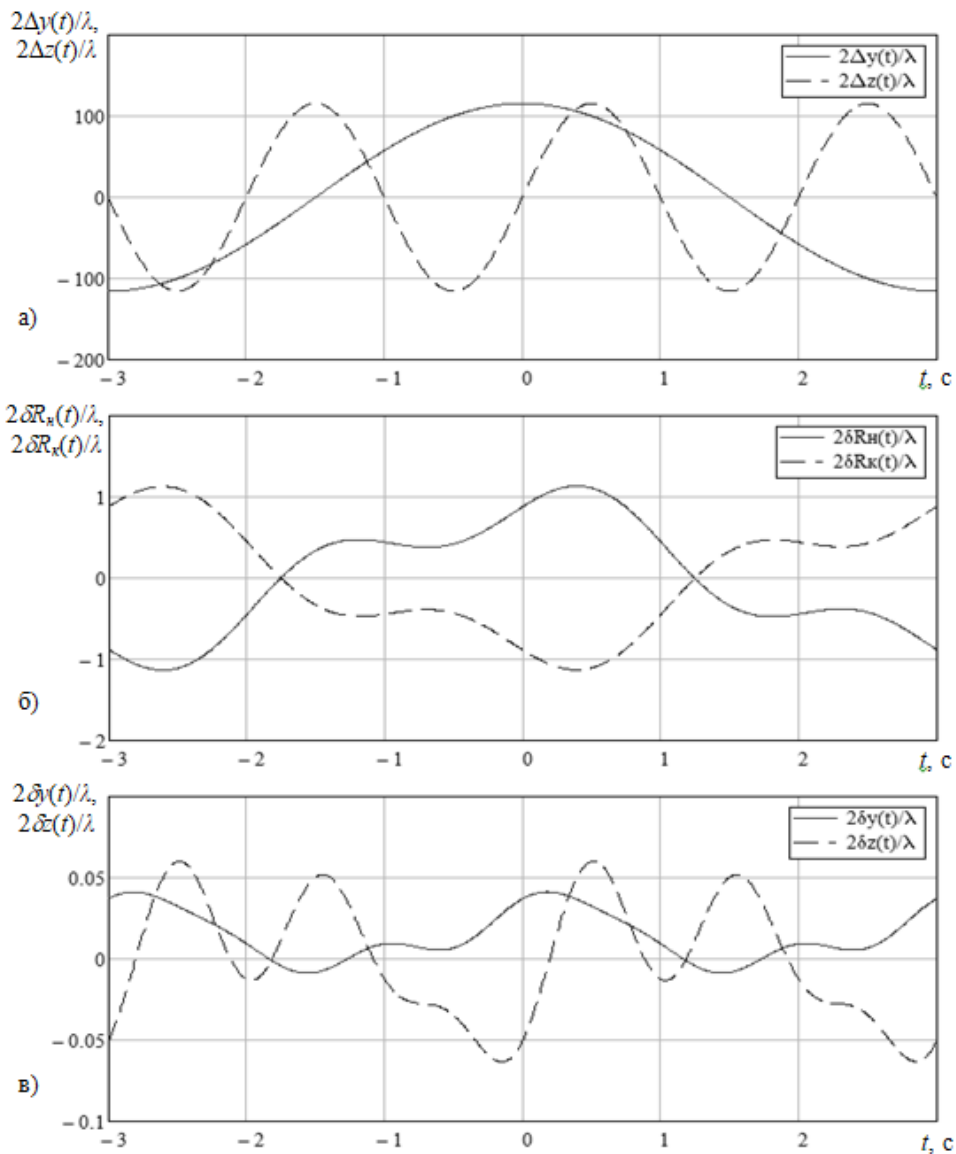


Рис. 4. Результаты имитационного моделирования алгоритма: (а) — заданные составляющие ошибок $\Delta y(t)$ и $\Delta z(t)$; (б) — дифференциальные ошибки $\delta R_n(t)$ и $\delta R_k(t)$; (в) — остаточные ошибки $\delta y(t)$ и $\delta z(t)$

онное моделирование при $Z_k(t) - Z_n(t) = 240$ м, $\lambda = 2$ см, $T_c = 6$ с, скорости движения ФЦА РСА вдоль оси OX 40 м/с и следующих условиях:

а) средние за интервал синтезирования значения $Y_0(t)$ и $Z_0(t)$ равны соответственно 2 и 5,228 км;

б) средние значения составляющих ошибок $\Delta y(t)$ и $\Delta z(t)$ и их первых производных на интервале синтезирования равны нулю;

в) максимальная амплитуда каждой из ошибок $\Delta y(t)$ и $\Delta z(t)$ — 1 м.

На рис. 4 показаны нормированные к $\lambda/2$:

— заданные в модели составляющие ошибок $\Delta y(t)$, $\Delta z(t)$;

— рассчитанные по формуле (2) дифференциальные ошибки на краях картографируемого участка по дальности $\delta R_n(t)$, $\delta R_k(t)$;

— остаточные ошибки $\delta y(t) = \widehat{\Delta y}(t) - \Delta y(t)$, $\delta z(t) = \widehat{\Delta z}(t) - \Delta z(t)$, где $\widehat{\Delta y}(t)$ и $\widehat{\Delta z}(t)$ рассчитаны в соответствии с выражением (4).

Из рис. 4 видно, что модули остаточных ошибок $\delta y(t)$, $\delta z(t)$ не превышают значений $0,06\lambda$ (1,2 мм).

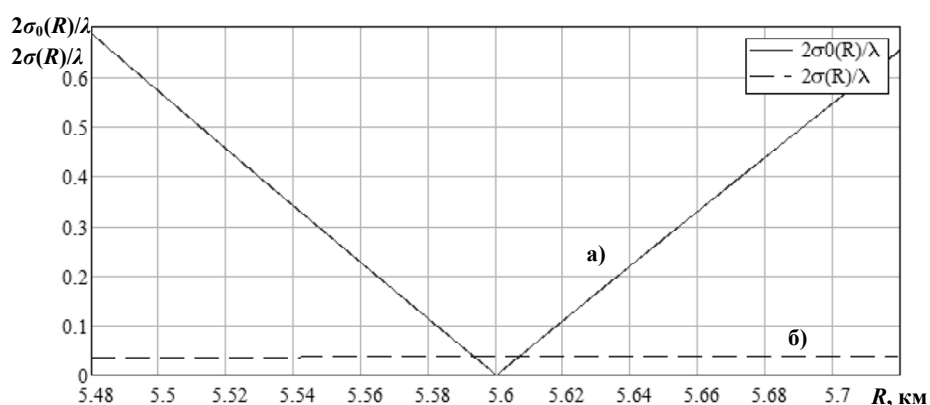


Рис. 5. СКО определения расстояния в диапазоне дальности $R_n(t) \dots R_k(t)$:
 (а) — при автофокусировке только по середине участка картографирования ($\sigma_0(R)$),
 (б) — при автофокусировке с использованием дифференциальных поправок ($\sigma(R)$)

Результаты вычислений по формулам (7) приведены на рис. 5. Из рисунка видно, что при использовании автофокусировки только по середине участка картографирования СКО $\sigma_0(R)$ линейно увеличивается к краям зоны обзора примерно до 0,7, в то время как при автофокусировке по описанному выше алгоритму значение $\sigma(R)$ практически неизменно на всём интервале дальности $R_n(t) \dots R_k(t)$ и составляет приблизительно 0,036.

Расчёты по формулам (8) также показывают, что учёт дифференциальных поправок $\delta R_n(t), \delta R_k(t)$ приводит к уменьшению значения интегральной СКО с $\bar{\sigma}_0 = 0,387$ до $\bar{\sigma} = 0,0363$, т.е. более чем на 20 дБ.

Заключение

Проведённые исследования показали, что в РСА авиационного базирования в алгоритмах автофокусировки необходимо учитывать изменение функции траекторной фазовой ошибки от расстояния до поверхности. Игнорирование этого факта приводит к ухудшению фокусировки на краях РЛИ.

Разработанный алгоритм позволяет оценить ортогональные составляющие вектора ошибок и затем скомпенсировать траекторную фазовую ошибку с учётом её изменения от расстояния. Результаты моделирования показали, что остаточная ошибка при этом практически не

зависит от расстояния, а интегральная СКО примерно на 20 дБ меньше, чем в обычных алгоритмах автофокусировки.

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. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений: учебник для курсантов ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского / Л.А. Школьный и др. М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. 530 с.
3. Ефимов А.В., Цветков О.Е. Искажения зондирующего сигнала и их коррекция при формировании радиолокационного изображения в РСА космического аппарата «Кондор-Э» // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2017. № 4. С.15-26.
4. Авиационные системы радиовидения / Под ред. Г.С. Кондратенкова. М.: Радиотехника, 2015. 648 с.
5. Цифровая обработка сигналов в РСА / Под ред. Е.Ф. Толстова. Смоленск: Изд-во ВА ВПВО ВС РФ, 2005. 232 с.
6. Wang J., Liu X. SAR Minimum-Entropy Autofocus // Radar 2004. International Conference on Radar Systems 04, Philadelphia (USA), Apr. 26-29, 2004.
7. Зайцев С.Э., Карпов О.А., Костров В.В. Непараметрический алгоритм автофокусировки, оптимальный по критерию максимума дисперсии РЛИ // VIII Всероссийские Армандовские чтения: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифрак-

ции волн / Материалы Всероссийской научной конференции. (26.06–28.06.2018, г. Муром). – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2018. С. 435–446.

8. *Adel Ahmed M.* Weighted least square SAR autofocus technique (WLS) // *International Journal of Advanced Research* (2016), Vol. 4, Iss. 6, 1506–1511.

9. *Zeng T., Wang R., Li F.* SAR image autofocus utilizing minimum entropy criterion // *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing Lett.* 2013. Vol. 10. No. 6. Pp. 1552–1556. doi: 10.1109/lgrs.2013.2261975.

10. *Fortune S.A., Hayes M.P., Gough P.T.* Contrast optimization of coherent images // *Oceans 2003, Marine Technology and Ocean Science.* San Diego, CA, USA. 2003. Vol. 5. Pp. 2622–2628. doi: 10.1109/OCEANS.2003.1282986.

11. *Berizzi F., Martorella M., Cacciamao A., Capria A.* A contrast-based algorithm for synthetic range-profile motion compensation // *IEEE Trans. on Geosc. and Rem. Sens.* 2008. Vol. GRS-46, No. 10. Pp. 3053–3062. DOI: 10.1109/tgrs.2008.2002576.

12. *Gao Y., Yu W., Liu Y., Wang R.* Autofocus algorithm for SAR imagery based on sharpness optimization // *Electronics Lett.* 2014. Vol. 50. No. 11. Pp. 830–832. DOI: 10.1049/el.2013.4111.

13. *Монаков А.А.* Автофокусировка радиолокационных изображений методом максимизации резкости // *Радиолокация, навигация, связь: Сборник трудов XXIV Международной научно-технической конференции (17–19 апреля 2018 г.).* Том 2. Воронеж: ООО «Вэлборн», 2018. С.321–334.

14. *Liu Z., Yang S., Feng Z., Gao Q., Wang M.* Fast SAR Autofocus Based on Ensemble Convolutional Extreme Learning Machine // *Remote Sens.* 2021. 13, 2683. 21 p. doi.org/10.3390/rs13142683.

15. *Монаков А.А.* Универсальный алгоритм автофокусировки радиолокационных изображений // *Изв. вузов России. Радиоэлектроника.* 2021. Т. 24. № 1. С. 22–33. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-1-22-33..

Поступила 11 ноября 2021 г.

English

AUTOFOCUSING DEPTH ENHANCEMENT IN AIRBORNE SAR

Oleg Anatolyevich Karpov — Grand Dr. in Engineering, Senior Research Associate, CJSC AEROKON.

E-mail: karp.smtp@mail.ru

Vladimir Yuryevich Savostyanov — PhD, Associate Professor, Senior Engineer, CJSC AEROKON.

E-mail: v-savostyanov@yandex.ru

Oleg Evgenyevich Tsvetkov — PhD, Associate Professor, Senior Research Associate, CJSC AEROKON.

E-mail: al.vetckov@yandex.ru

Address: 140180, Russian Federation, Moscow Region, Zhukovsky, Zhukovsky st., 1.

Abstract: To improve image quality in synthetic aperture radar (SAR), it is necessary to account for variation of trajectory phase error function due to distance to the surface during signal processing. Reducing phase errors is of primary concern for airborne SAR since trajectory instabilities and elastic modes of airborne vehicle structure are essential factors for phase distortion. If there is standard sideways view then relations for velocity error are obtained and the number of range channels are defined where phase error may be regarded as space-invariant. The paper is basically targeted at computing costs reduction and autofocus procedure simplification. The paper proposes to employ differential corrections obtained by performing autofocus in three points of coverage area by range to solve this problem. Differential corrections' dependences on range (viewing angle) are obtained through solving linear equations and are used to compensate for phase distortions. Algorithm description to enhance the autofocus depth in airborne SAR is given. The trajectory phase error calculation is based on non-parametric autofocus algorithm, which gives stability to overall system performance. Block diagram of path signal processing is developed and calculation relations for integral root-mean-square error are obtained. Mathematical modeling made it clear that residual errors have little if any dependence on range after employing the proposed algorithm and they are about 10 times less than those of autofocus algorithm in frame-center. The proposed autofocus algorithm can be used to develop software for onboard computational facility for real-time radar image processing. The considered modelling example confirmed the algorithm efficiency and its operation capability.

Keywords: SAR (synthetic aperture radar), phase fluctuations of path signal, radar image autofocus, trajectory signal, radar image, phase fluctuations, autofocus, simulation.

References

1. *Kondratenkov G.S., Frolov A.Yu.* Radiovision. Radar systems for remote sensing of the Earth. Textbook for universities. Ed. by *G.S. Kondratenkov*. Moscow: Radiotekhnika, 2005. 368 p.
2. Radar systems of aerial reconnaissance, decoding of radar images: a textbook for cadets of the VVIA named after Professor N.Ye. Zhukovsky. *L.A. Shkolny*, et al. Moscow: VVIA named after Professor N.Ye. Zhukovsky, 2008. 530 p.
3. *Efimov A.V., Tsvetkov O.E.* Sounding signal distortion and its correction in radar imaging in SAR Kondor-E space vehicle. Radio and telecommunication systems. 2017. No. 4. Pp.15–26
4. Aviation radio vision systems. Ed. by *G.S. Kondratenkov*. Moscow: Radiotekhnika, 2015. 648 p.
5. Digital signal processing in SAR. Ed. by *E.F. Tolstov*. Smolensk: Publisher MA MAD AF RF, 2005. 232 p.
6. *Wang J., Liu X.* SAR Minimum-Entropy Autofocus. Radar 2004. International Conference on Radar Systems 04, Philadelphia (USA), Apr. 26–29, 2004.
7. *Zaytsev S.E., Karpov O.A., Kostrov V.V.* Nonparametric autofocus algorithm, optimal by the criterion of maximum dispersion of the radar image // Modern problems of remote sensing, radar, wave propagation and diffraction: VIII All-Russian scientific conference (26.06–28.06.2018, Murom). Murom: MI VISU, 2018. Pp. 435-446.
8. *Adel Ahmed M.* Weighted least square SAR autofocusing technique (WLS). International Journal of Advanced Research. 2016. Vol. 4. Iss. 6. Pp. 1506–1511.
9. *Zeng T., Wang R., Li F.* SAR image autofocus utilizing minimum entropy criterion. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing Lett. 2013. Vol. 10. No. 6. Pp. 1552–1556. doi: 10.1109/lgrs.2013.2261975.
10. *Fortune S.A., Hayes M.P., Gough P.T.* Contrast optimization of coherent images. Oceans 2003, Marine Technology and Ocean Science. San Diego, CA, USA. 2003. Vol. 5. Pp. 2622–2628. DOI: 10.1109/OCEANS.2003.1282986.
11. *Berizzi F., Martorella M., Cacciamao A., Capria A.* A contrast-based algorithm for synthetic range-profile motion compensation. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 2008. Vol. GRS-46, No. 10. Pp. 3053–3062. doi: 10.1109/tgrs.2008.2002576.
12. *Gao Y., Yu W., Liu Y., Wang R.* Autofocus algorithm for SAR imagery based on sharpness optimization // Electronics Lett. 2014. Vol. 50. No. 11. Pp. 830–832. doi: 10.1049/el.2013.4111.
13. *Monakov A.A.* Autofocus of radar images by maximizing sharpness. Radar, navigation, communication: Proc. XXIV Int. Conference (17–19 April, 2018). Vol. 2. Voronezh: LLC "Valborn", 2018. Pp.321–334.
14. *Liu Z., Yang S., Feng Z., Gao Q., Wang M.* Fast SAR Autofocus Based on Ensemble Convolutional Extreme Learning Machine. Remote Sens. 2021. 13, 2683. 21 p. doi.org/10.3390/rs13142683.
15. *Monakov A.A.* A Versatile Algorithm for Autofocusing SAR Images. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021. Vol. 24. No. 1. Pp. 22–33. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-1-22-33.