

УДК 621.396

**АЛГОРИТМЫ АВТОФОКУСИРОВКИ ИНВЕРСНО-СИНТЕЗИРУЕМЫХ
ДВУМЕРНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ****С. И. Моряков, С. М. Нестеров, И. А. Скородумов****Центральный научно-исследовательский институт ВВКО Минобороны России**

Статья поступила в редакцию 3 августа 2018 г.

Аннотация. Проведена оценка работоспособности известных алгоритмов автофокусировки применительно к практике формирования двумерных инверсно-синтезированных радиолокационных изображений. Оценка проведена с единых позиций и терминологии, что позволяет вырабатывать конкретные рекомендации по практическому использованию исследованных алгоритмов при формировании сфокусированных двумерных инверсно-синтезируемых радиолокационных изображений объектов по результатам измерений отраженных ими сигналов в лабораторных, полунатурных (на измерительных полигонах) и натуральных условиях.

Ключевые слова: инверсное синтезирование апертуры, радиолокационные изображения, непараметрические методы автофокусировки.

Abstract. The inverse synthetic aperture radar systems are widely applied in many fields, like space and air control systems, special research laboratories and outdoor measurements facilities. To provide well-focused inverse synthetic aperture radar images we need to compensate translational and rotational phase shifts. This effort is also called range alignment and autofocusing. Autofocusing techniques provide to compensate nonlinear motion errors of the object. Many autofocus algorithms have been proposed over the years, ranging from quantitative measurement of residual errors to qualitative visual comparison. However, different data sets and motion errors were employed, it is difficult to perform comparative studies on various algorithms. In this paper a is observed a few of known autofocusing algorithms based on minimizing image entropy and phase gradient technics applied to experimental research in inverse synthetic aperture imaging techniques. Comparison of

autofocusing algorithms was carried out on the mathematical model developed by the authors. As quality metrics for assessing algorithms performance were chosen: the minimum image entropy, correlation with the standard, computing complexity and work duration. As the result we can recommend these algorithms to various practical cases in air control, measurement facilities or laboratories efforts. In conclusion our study is that the algorithms based on minimum entropy provide the better performance results in most cases.

Key words: inverse synthetic aperture, radar images, nonparametric autofocusing.

В настоящее время все большее применение при решении задач контроля воздушного и космического пространства [1], дефектоскопии исследуемых объектов на радиолокационных измерительных полигонах [2] и т.п. получают широкополосные радиолокационные системы с режимом формирования двумерных радиолокационных изображений (РЛИ) объектов методом инверсного синтезирования апертуры.

Для формирования этими системами сфокусированного двумерного РЛИ объекта необходимо привести отраженный от объекта сигнал, принимаемый и регистрируемый РЛС, к единой дальности за время синтезирования изображения, компенсируя фазовые набеги, возникающие вследствие относительного поступательного и неравномерности вращательного движений объекта. Решение данной задачи на основе зарегистрированных радиолокационных данных принято называть автофокусировкой изображений.

Разработке и совершенствованию алгоритмов автофокусировки изображений посвящено значительное количество работ [3,4,5].

Целью данной работы является оценка работоспособности известных алгоритмов автофокусировки применительно к практике формирования двумерных инверсно-синтезированных радиолокационных изображений.

Грубая компенсация дополнительных фазовых набегов достигается при помощи анализа и коррекции одномерных радиолокационных изображений

(профилей дальности) объектов [3,4]. Это позволяет получить на РЛИ размытый образ объекта, элементы которого зачастую существенно искажены.

Для устранения размывания и искажений применяют алгоритмы точной компенсации набегов фазы (точной автофокусировки объектов) [5]. Такие алгоритмы разделяются на параметрические и непараметрические. Параметрические алгоритмы компенсации набегов фазы используют предположения о характере движения наблюдаемого объекта, моделируя его полиномами высоких порядков [6,7]. В практических задачах сигнал от объекта зачастую сильно зашумлен и данный тип методов не позволяет корректно сфокусировать РЛИ, либо для фокусировки требуются значительные вычислительные ресурсы. Непараметрические методы основаны на использовании опорной фазы доминирующего отражателя [8], оценки градиента фазы [9], минимизации энтропии (максимизации контраста) РЛИ [10,11].

Задача настоящей работы состоит в проведении путем математического моделирования сравнительной оценки известных алгоритмов автофокусировки радиолокационных изображений с единых позиций и терминологии для выработки рекомендаций по их практическому использованию.

Для решения задачи рассмотрены адаптированные к условиям инверсного синтезирования изображений объектов известные непараметрические алгоритмы автофокусировки. Проведено сравнение алгоритмов по точности фазовой коррекции и скорости работы. Сравнение проводилось на разработанной математической модели.

Пусть наблюдаемый объект облучается широкополосным когерентным сигналом (со ступенчатой перестройкой частоты либо ЛЧМ), а отраженный от объекта сигнал регистрируется в виде $s(m,n)$, где m - номер пачки импульсов из M принятых пачек за полное время наблюдения и n - номер частоты зондирования из N частот в пачке (рис.1).

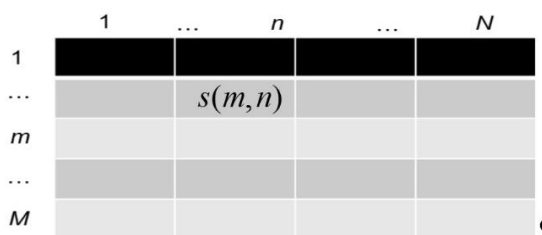


Рис. 1. Схема массива регистрируемых данных

С помощью обратного преобразования Фурье для каждой принятой пачки сигнала получают M профилей дальности (одномерных РЛИ объекта)

$$h(m, k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} s(m, n) \exp\left(j \frac{2\pi}{N} kn\right), \quad (1)$$

где $k=1, \dots, N$ - номер бина профилей дальности.

Двумерное РЛИ $g(l, k)$ с учетом автофокусировки

$$g(l, k) = \sum_{m=0}^{M-1} h(m, k) \exp(j\varphi_m) \exp\left(-j \frac{2\pi}{M} lm\right), \quad (2)$$

где l - номер Доплеровской частоты, φ_m - фазовая поправка m -го профиля дальности.

Задача автофокусировки РЛИ сводится к нахождению фазовых поправок для каждого из полученных профилей дальности за время наблюдения объекта.

В известных алгоритмах фазовая поправка φ_m определяется итерационно, с использованием меры РЛИ. Для измерения степени размытия (зашумленности) РЛИ используют критерии минимума энтропии или максимума контраста РЛИ [10]. Чем больше размыты объекты на изображении, тем больше его энтропия и меньше контраст.

Общая схема работы алгоритмов автофокусировки РЛИ представлена на рис. 2.

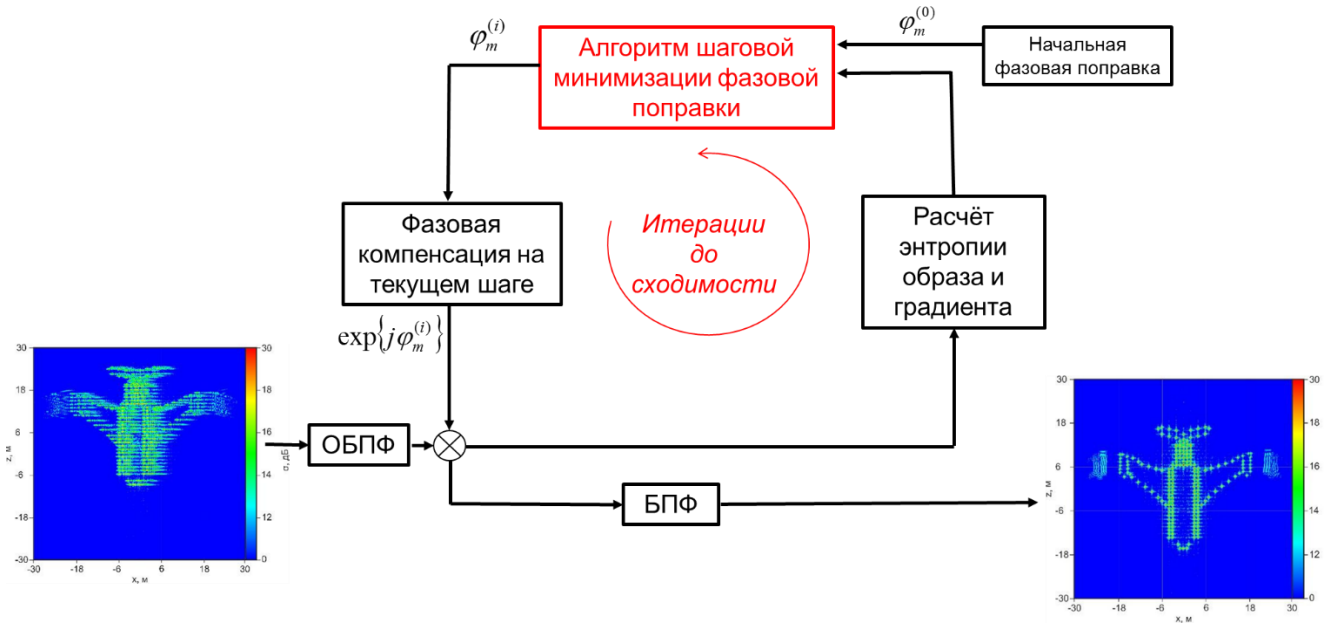


Рис. 2. Схема работы алгоритмов автофокусировки РЛИ

Энтропия двумерного РЛИ $E\{|g(l,k)|^2\}$ равна [10]:

$$E\{|g(l,k)|^2\} = \sum_{l=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{N-1} \frac{|g(l,k)|^2}{S} \cdot \ln \frac{S}{|g(l,k)|^2}, \quad (3)$$

где $S = \sum_{l=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{N-1} |g(l,k)|^2$ (4)

Выражение (3) может быть представлено как

$$E\{|g(l,k)|^2\} = \ln S - \frac{1}{S} \sum_{l=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{N-1} |g(l,k)|^2 \cdot \ln |g(l,k)|^2 \quad (5)$$

Применительно к двумерным РЛИ S константа, поэтому

$$E\{|g(l,k)|^2\} = \sum_{l=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{N-1} |g(l,k)|^2 \cdot \ln |g(l,k)|^2 \quad (6)$$

Рассмотрим существо исследованных методов автофокусировки двумерных РЛИ объектов.

1. Автофокусировка на основе определения первой производной $E\{|g(l,k)|^2\}$ по φ_m [11].

Искомая фазовая поправка φ_m должна удовлетворять выражению

$$\frac{\partial E \{ |g(l, k)|^2 \}}{\partial \varphi_m} = 0 \quad (7)$$

С учетом (6) производную энтропии можно записать в виде

$$\frac{\partial E \{ |g(l, k)|^2 \}}{\partial \varphi_m} = - \sum_{l=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{N-1} \left[1 + \ln |g(l, k)|^2 \right] \cdot \frac{\partial |g(l, k)|^2}{\partial \varphi_m} \quad (8)$$

Используя $|g(l, k)|^2 = g(l, k) \cdot g^*(l, k)$, получаем

$$\frac{\partial |g(l, k)|^2}{\partial \varphi_m} = 2 \operatorname{Re} \left[g^*(l, k) \cdot \frac{\partial g(l, k)}{\partial \varphi_m} \right] \quad (9)$$

Подставляя (9) в (8), имеем

$$\frac{\partial E \{ |g(l, k)|^2 \}}{\partial \varphi_m} = -2 \operatorname{Re} \left[\sum_{l=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{N-1} \left[1 + \ln |g(l, k)|^2 \right] \cdot g^*(l, k) \cdot \frac{\partial g(l, k)}{\partial \varphi_m} \right] \quad (10)$$

Производная $\frac{\partial g(l, k)}{\partial \varphi_m}$ равна

$$\frac{\partial g(l, k)}{\partial \varphi_m} = j \cdot h(m, k) \exp(j\varphi_m) \exp\left(-j \frac{2\pi}{M} lm\right) \quad (11)$$

$$\frac{\partial E \{ |g(l, k)|^2 \}}{\partial \varphi_m} = 2M \operatorname{Im} \left\{ \exp(j\varphi_m) \cdot a^*(m) \right\}, \quad (12)$$

$$\text{где } a(m) = \sum_{k=0}^{N-1} h^*(m, k) \frac{1}{M} \cdot \sum_{l=0}^{M-1} \left[1 + \ln |g(l, k)|^2 \right] \cdot g(l, k) \cdot \exp\left(j \frac{2\pi}{M} lm\right) \quad (13)$$

Для ускорения вычислений по выражению (13) можно воспользоваться обратным преобразованием Фурье:

$$\begin{aligned} G_1(m, k) &= \frac{1}{M} \cdot \sum_{l=0}^{M-1} \left[1 + \ln |g(l, k)|^2 \right] \cdot g(l, k) \cdot \exp\left(j \frac{2\pi}{M} lm\right) \\ &= \text{ОБПФ} \left\{ \left[1 + \ln |g(l, k)|^2 \right] \cdot g(l, k) \right\} \end{aligned} \quad (14)$$

Тогда, подставляя (14) и (13) в (12), получим

$$\varphi(m) = \text{angle} \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} h^*(m, k) G_1(m, k) \right\} \quad (15)$$

2. Автофокусировка на основе минимизации энтропии методом Ньютона [12].

Находим вторую производную энтропии РЛИ

$$\frac{\partial^2 E \{ |g(l,k)|^2 \}}{\partial \varphi_m^2} = - \sum_{l=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{N-1} \left\{ \frac{1}{|g(l,k)|^2} \left[\frac{\partial |g(l,k)|^2}{\partial \varphi_m} \right]^2 + \left(1 + \ln |g(l,k)|^2 \right) \frac{\partial^2 |g(l,k)|^2}{\partial \varphi_m^2} \right\}. \quad (16)$$

где

$$\begin{aligned} \left[\frac{\partial |g(l,k)|^2}{\partial \varphi_m} \right]^2 &= \left[g(l,k) \frac{\partial g^*(l,k)}{\partial \varphi_m} + g^*(l,k) \frac{\partial g(l,k)}{\partial \varphi_m} \right]^2 \\ &= 2 \operatorname{Re} \left\{ \left[g^*(l,k) \frac{\partial g(l,k)}{\partial \varphi_m} \right]^2 \right\} + 2 |g(l,k)|^2 \left| \frac{\partial g(l,k)}{\partial \varphi_m} \right|^2 \end{aligned} \quad (17)$$

$$\frac{\partial^2 |g(l,k)|^2}{\partial \varphi_m^2} = 2 \left| \frac{\partial g(l,k)}{\partial \varphi_m} \right|^2 + 2 \operatorname{Re} \left\{ g^*(l,k) \frac{\partial^2 g(l,k)}{\partial \varphi_m^2} \right\} \quad (18)$$

Дифференцируя (11), получаем вторую производную $\frac{\partial^2 g(l,k)}{\partial \varphi_m^2}$

$$\frac{\partial^2 g(l,k)}{\partial \varphi_m^2} = -h(m,k) \exp(j\varphi_m) \exp\left(-j \frac{2\pi}{M} lm\right) \quad (19)$$

Объединяя (16), (17), (18), (19) и (11), получим

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 E \{ |g(l,k)|^2 \}}{\partial \varphi_m^2} &= - \sum_{l=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{K-1} \left\{ 2 \operatorname{Re} \left\{ \frac{g^*(l,k)^2}{|g(l,k)|^2} \left[\frac{\partial g(l,k)}{\partial \varphi_m} \right]^2 \right\} + 2 \cdot \left(2 + \ln |g(l,k)|^2 \right) \left| \frac{\partial g(l,k)}{\partial \varphi_m} \right|^2 \right\} \\ &+ 2 \operatorname{Re} \left\{ \left(1 + \ln |g(l,k)|^2 \right) g^*(l,k) \frac{\partial^2 g(l,k)}{\partial \varphi_m^2} \right\} \end{aligned} \quad (20)$$

В предположении, что $-\left| \frac{\partial g(l,k)}{\partial \varphi_m} \right|^2 \leq \operatorname{Re} \left\{ \left[\frac{\partial g(l,k)}{\partial \varphi_m} \right]^2 \right\} \leq \left| \frac{\partial g(l,k)}{\partial \varphi_m} \right|^2$ и

$\frac{\operatorname{Re} \{ g^*(l,k)^2 \}}{|g(l,k)|^2} \ll 2 + \ln |g(l,k)|^2$ первый компонент (20) можно опустить, тогда

$$\frac{\partial^2 E \{ |g(l,k)|^2 \}}{\partial \varphi_m^2} = -2 \sum_{l=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{N-1} \left(2 + \ln |g(l,k)|^2 \right) |h(m,k)|^2 + 2 \operatorname{Re} \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} G_1^*(m,k) h(m,k) \exp(j\varphi_m) \right\} \quad (21)$$

Далее, согласно методу многопараметрической оптимизации Ньютона, вычисляем фазовую поправку φ_m

$$\varphi_m^{(i+1)} = \varphi_m^{(i)} - \left[\left(\frac{\partial^2 E \{ |g(l,k)|^2 \}}{\partial \varphi_m^2} \right)^{-1} \cdot \frac{\partial E \{ |g(l,k)|^2 \}}{\partial \varphi_m} \right]_{\varphi_m = \varphi_m^{(i)}} \quad (22)$$

где i - номер шага итерации алгоритма.

3. Автофокусировка на основе минимизации суррогатной функции [13].

Для ускорения сходимости итераций минимизируется суррогатная функция, зависящая от изменения энтропии РЛИ.

Выражение (5) для энтропии записывают в виде

$$E\left\{|g(l,k)|^2\right\} = \ln S - \frac{1}{S} \sum_{l=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{N-1} f(|g(l,k)|^2) \quad (23)$$

где $f(p) = -p \ln p$ - вогнутая функция для $p > 0$

Вводят суррогатную функцию $\theta(\varphi, \varphi^{(i)})$

$$\theta(\varphi, \varphi^{(i)}) = \ln S - \frac{1}{S} \sum_{l=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{N-1} |g_{\varphi}(l,k)|^2 \cdot \ln |g_{\varphi^{(i)}}(l,k)|^2 \quad (24)$$

где $\varphi^{(i)} = (\varphi_1^{(i)}, \dots, \varphi_m^{(i)}, \dots, \varphi_M^{(i)})$ и $g_{\varphi^{(i)}}$ - оценка фазового набега и РЛИ на i -ой итерации алгоритма.

На новой итерации последовательно находим фазовые поправки для каждого профиля дальности через соответствующие компоненты суррогатной функции ψ_m

$$\psi_m = \theta(\varphi, \varphi^{(i)}) \Big|_{\varphi = \{\varphi_1^{(i)}, \dots, \varphi_m, \dots, \varphi_M^{(i)}\}} \quad (25)$$

Производная $|g(l,k)|^2$ по φ_m

$$\frac{\partial |g(l,k)|^2}{\partial \varphi_m} = \frac{\partial g(l,k)}{\partial \varphi_m} \cdot g^*(l,k) + g(l,k) \cdot \frac{\partial g^*(l,k)}{\partial \varphi_m} \quad (26)$$

Подставляя $\frac{\partial g(l,k)}{\partial \varphi_m}$ из (11) и аналогично для комплексно-сопряженных в

(26), находим три первых производных ψ_m

$$\frac{\partial \psi_m}{\partial \varphi_m} = \frac{2}{MS} \operatorname{Im} \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} h(m,k) \exp(j\varphi_m^{(i)}) G_2^{(i)}(m,k) \right\} \quad (27)$$

$$\frac{\partial^2 \psi_m}{\partial \varphi_m^2} = \frac{2}{MS} \operatorname{Re} \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} h(m,k) \exp(j\varphi_m^{(i)}) G_2^{(i)}(m,k) \right\} - \frac{2}{M^2 S} \sum_{k=0}^{N-1} \left\{ |h(m,k)|^2 \cdot \sum_{l=0}^{M-1} \ln |g^{(i)}(l,k)|^2 \right\} \quad (28)$$

$$\frac{\partial^3 \psi_m}{\partial \varphi_m^3} = -\frac{2}{MS} \operatorname{Im} \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} h(m,k) \exp(j\varphi_m^{(i)}) G_2^{(i)}(m,k) \right\} \quad (29)$$

$$G_2^{(i)}(m,k) = \sum_{l=0}^{M-1} \exp\left(\frac{j2\pi}{M} lm\right) \cdot g^*(l,k) \cdot \ln |g^{(i)}(l,k)|^2 = \text{ОБПФ} \left\{ g^*(l,k) \cdot \ln |g^{(i)}(l,k)|^2 \right\} \quad (30)$$

Так как $\frac{\partial \psi_m}{\partial \varphi_m} = -\frac{\partial^3 \psi_m}{\partial \varphi_m^3}$, то

$$\psi(\varphi_m) = A_m \cdot \cos(\varphi_m - \varphi_m^{(i)}) + B_m \cdot \sin(\varphi_m - \varphi_m^{(i)}) + C_m \quad (31)$$

где $A_m = -\frac{\partial^2 \psi_m}{\partial \varphi_m^2}$, $B_m = \frac{\partial \psi_m}{\partial \varphi_m}$, $C_m = \frac{\partial \psi_m}{\partial \varphi_m} + \frac{\partial^2 \psi_m}{\partial \varphi_m^2}$

Искомая фазовая поправка φ_m на новой итерации равна

$$\varphi_m^{(i+1)} = \varphi_m^{(i)} + \tan^{-1}\left(\frac{B_m}{A_m}\right), \quad (32)$$

4. Автофокусировка на основе фазового градиента [9,14,15].

Помимо непосредственного вычисления градиента фазы алгоритм предусматривает два важных шага, выполняемых над полученным РЛИ. Это центрирование блестящих точек и применение оконного фильтра для сокращения области поиска. Диаграмма работы метода приведена на рис. 3.

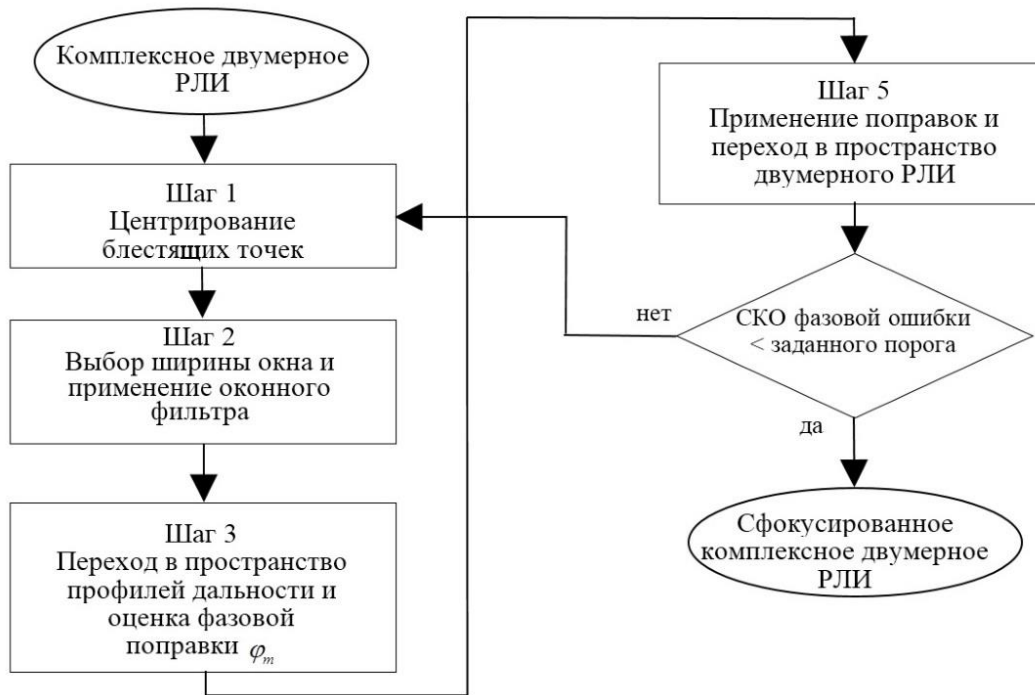


Рис. 3. Диаграмма работы метода автофокусировки на основе определения фазового градиента

Выражение (1) представим в виде

$$h(m, k) = A(m, k) \cdot \exp(-j(\omega_0(m)t + \varphi_m + \varphi_0)), \quad (33)$$

где A , ω_0 , и φ_0 амплитуда сигнала в пространстве профилей дальности объекта,

частота, начальный фазовый набег соответственно.

Тогда

$$\frac{\partial h(m, k)}{\partial t} = j \cdot \varphi_m \cdot h(m, k) \quad (34)$$

Производная фазовой поправки равна

$$\varphi_m' = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} \operatorname{Im} \left\{ \frac{\partial h(m, k)}{\partial t} \cdot h^*(m, k) \right\}}{\sum_{k=0}^{N-1} |h(m, k)|^2} \quad (35)$$

Переходя от производной к дифференциалу, оцениваем изменения фазовой поправки $\Delta\varphi_m$ с помощью:

1. Несмещенного минимального различия [9]:

$$\Delta\varphi_m = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} \operatorname{Im} \{ [h(m, k) - h(m-1, k)] \cdot h^*(m, k) \}}{\sum_{k=0}^{N-1} |h(m, k)|^2} \quad (36)$$

2. Максимального правдоподобия [14]:

$$\Delta\varphi_m = \operatorname{angle} \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} h(m+1, k) \cdot h^*(m, k) \right\} \quad (37)$$

3. Взвешенной оценки фазы [15]:

$$\Delta\varphi_m = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} \left[|h(m, k) \cdot h^*(m-1, k)| \cdot \operatorname{angle} \{ h(m, k) \cdot h^*(m-1, k) \} \right]}{\sum_{k=0}^{N-1} |h(m, k) \cdot h^*(m-1, k)|} \quad (38)$$

Для отработки и проверки работоспособности описанных алгоритмов была разработана математическая модель летательного аппарата на основе блестящих точек.

Принятый сигнал от совокупности блестящих точек рассчитывался согласно выражению

$$s(m, n) = \sum_{j=0}^{H-1} \sqrt{\sigma_j} \cdot \exp \left(\frac{4\pi f_n}{c} [x_j \sin(\beta_m) + z_j \cos(\beta_m)] \right), \quad (39)$$

где H - количество блестящих точек; σ_j, x_j, z_j - уровень ЭПР и координаты

места расположения блестящих точек соответственно; β_m - угол между направлением локации и осью z .

Геометрия модели и эталонное двумерное РЛИ показаны на рис. 4.

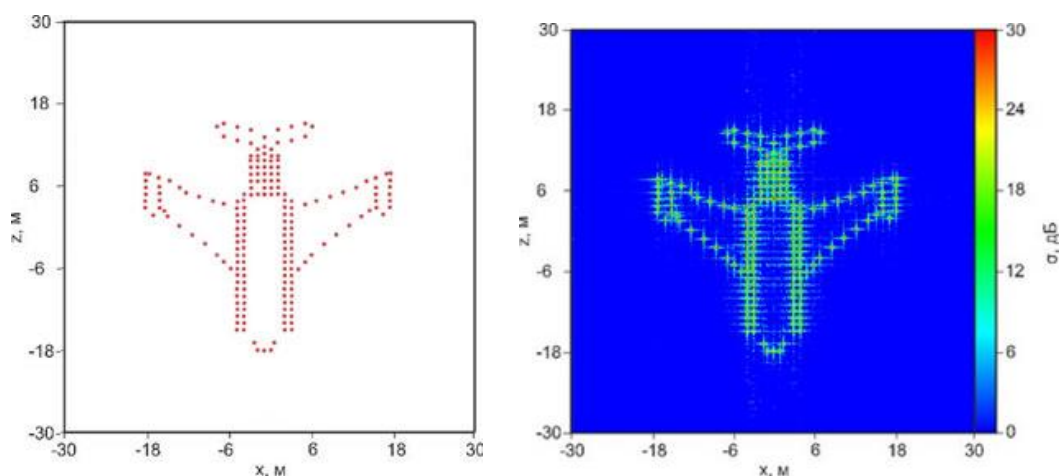


Рис. 4. Геометрия модели и эталонное двумерное РЛИ летательного аппарата

Сравнение результатов работы алгоритмов автофокусировки проводилось при помощи оценки коэффициента корреляции сфокусированного РЛИ с эталонным, результаты сравнения показаны в таблице 1.

Моделирование проводилось для следующих параметров: зондирующий сигнал на 256 частотных точках со ступенчатой перестройкой частоты с равным шагом в полосе от 9,35 до 9,85 ГГц, сектор синтезирования РЛИ $\pm 1,5^\circ$.

На рис. 5 показан график изменения дальности до объекта за время синтезирования изображения.

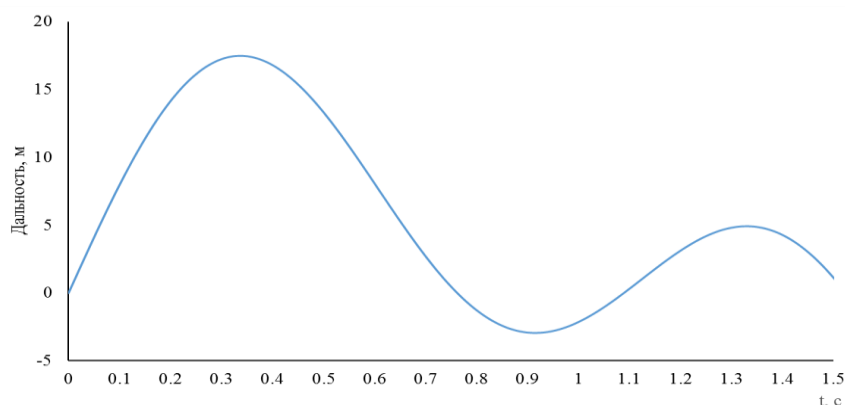


Рис. 5. График изменения дальности до объекта за время синтезирования изображения

На рис. 6 показано РЛИ объекта без применения алгоритмов

автофокусировки.

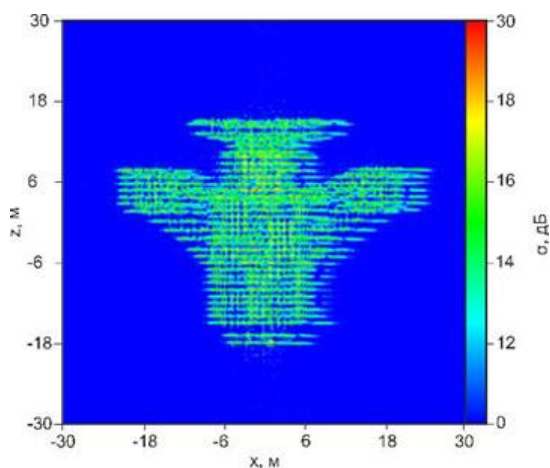


Рис. 6. Радиолокационное изображение объекта без применения алгоритмов автофокусировки

Результат минимизации энтропии РЛИ алгоритмами автофокусировки представлен на рис. 7, сфокусированные РЛИ объекта на рис. 8.

На представленных рисунках и в таблице 1 обозначены алгоритмы автофокусировки изображений на основе: 1 – определения первой производной энтропии по фазовой поправке; 2 - минимизации энтропии методом Ньютона; 3 - минимизации суррогатной функции; 4 – определения несмещенного минимального различия; 5 – максимального правдоподобия; 6 - взвешенной оценки фазы.

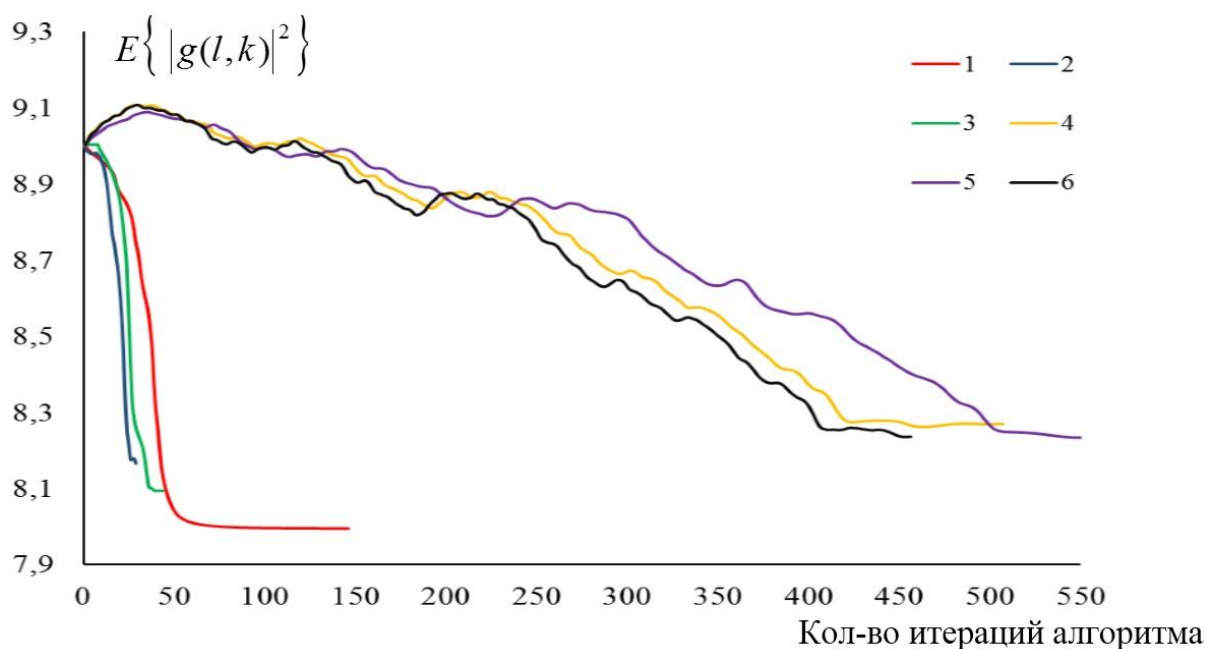


Рис. 7. Результат минимизации энтропии РЛИ алгоритмами автофокусировки

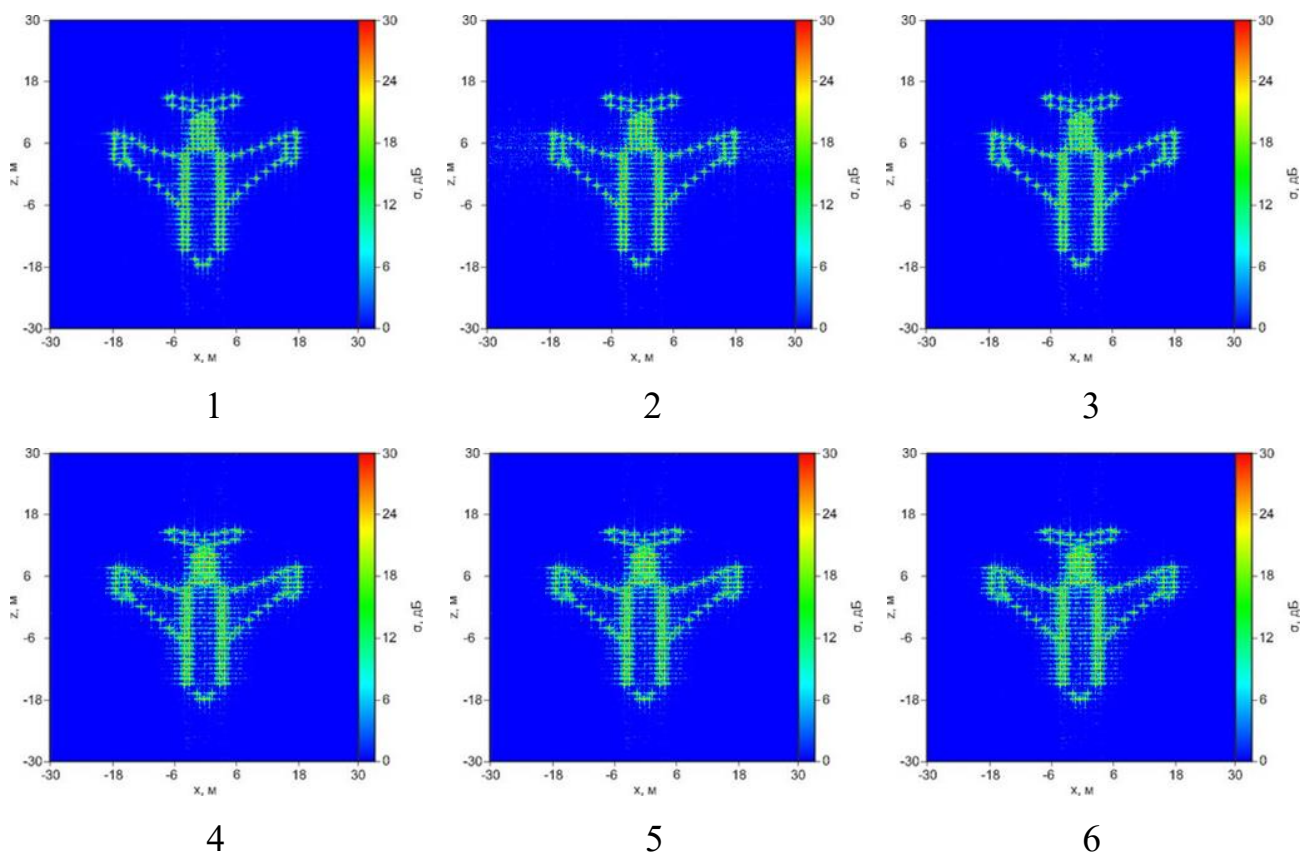


Рис. 8. Сфокусированные РЛИ объекта

Таблица 1 – Результаты оценки работоспособности алгоритмов автофокусировки

	1	2	3	4	5	6
Значение коэффициента корреляции с эталоном	0,891	0,826	0,823	0,814	0,813	0,812
Время выполнения автофокусировки, сек	18,5	37,1	35,6	47,1	49,8	35,2
Энтропия РЛИ	7,99	8,16	8,1	8,22	8,23	8,23

Представленные результаты показывают, что алгоритм 1 выполняет фокусировку максимально быстро, обеспечивая в сравнении с другими алгоритмами минимальную энтропию получаемого изображения и наилучшую корреляцию с эталоном. Изображения, сфокусированные по алгоритмам 4, 5 и 6, имеют большую энтропию и худшую корреляцию с эталоном. Предпочтительными по трем показателям (энтропия, корреляция с эталоном и время выполнения) являются алгоритмы 1, 2 и 3. Данный вывод получен по результатам математического моделирования отражения от гипотетического объекта и не учитывает всю специфику зондирования объектов реальными сигналами в натуральных и полунатурных (на измерительных полигонах)

условиях, где лучшими могут оказаться другие из исследованных алгоритмов автофокусировки РЛИ.

Таким образом, в рамках данной работы проведена сравнительная оценка точности фазовой коррекции и скорости работы известных алгоритмов автофокусировки радиолокационных изображений объектов, адаптированных к условиям инверсного синтезирования апертуры. Оценка проведена с единых позиций и терминологии, что позволяет вырабатывать конкретные рекомендации по практическому использованию исследованных алгоритмов при формировании сфокусированных двумерных инверсно-синтезируемых радиолокационных изображений объектов по результатам измерений отраженных ими сигналов в лабораторных, полунатурных (на измерительных полигонах) и натуральных условиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №18-07-00026 А).

Литература

1. Радиолокационные характеристики объектов. Методы исследования. Монография / Под ред. С.М. Нестерова. – М.: Радиотехника, 2015.
2. Моряков С.И., Нестеров С.М., Скородумов И.А. Фокусировка инверсно-синтезированных радиолокационных изображений объектов при измерениях в условиях открытых полигонов // «Журнал радиоэлектроники»: электронный журнал. 2016. №.6. [URL: http://jre.cplire.ru/jre/jun16/2/text.pdf](http://jre.cplire.ru/jre/jun16/2/text.pdf).
3. Моряков С.И., Нестеров С.М., Скородумов И.А. Алгоритмы фокусировки двумерных радиолокационных изображений объекта // Труды XXVIII Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред» // ВКА им. А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, 2013.
4. J. Wang, D. Kasilingam, Global range alignment for ISAR. IEEE Transactions of aerospace electronic systems, vol. 39, no.1, pp.351-357, Jan. 2003.
5. V. C. Chen, M. Martorella Inverse synthetic aperture radar imaging. Principles, Algorithms and Applications. SciTech publishing, Edison, NJ, 2014.

6. J. F. Li, H. Ling Use of generic algorithms in ISAR range alignment via minimizing the entropy of the average range profile. IEEE Transactions of aerospace electronic systems, vol.39, no.1, pp.343-351, 2003.
7. S.B. Peng, J. Xu, Y.N. Peng, J.B. Xiang Parametric inverse synthetic aperture radar maneuvering target motion compensation base on particle swarm optimizer. IET of radar and sonar navigation, vol.5, no.3, pp. 305-314, 2011.
8. B.D. Steinberg Microwave imaging of aircraft. Proceedings IEEE, vol. 76, no. 12, pp. 1578-1592, Dec. 1988.
9. D.H. Eichel, D.C. Ghiglia, C.V. Jakowats Speckle processing method for synthetic-aperture-radar phase correction. Optics letters, vol. 14, no. 1. 1989.
10. X. Li, G. Liu, J. Ni, Autofocusing of ISAR images based on entropy minimization. IEEE Transactions of aerospace electronic systems, vol.35, no.4, pp. 1240-1251, 1999.
11. J. Wang, X. Liu, Z. Zhou Minimum-entropy phase adjustments for ISAR. Proceedings IEEE – Radar sonar navigation, vol.151, no.4, pp.203-209, 2004.
12. S. Zhang, Y. Liu, X. Li Fast Entropy Minimization Based Autofocusing Technique for ISAR imaging. IEEE Transactions of signal processing, vol. 63, no. 13, 2015.
13. J. Thomas Kragh, A. Alaa Kharbouch Monotonic iterative algorithm for minimum entropy autofocus. Proceedings 14th Ann ASAP Workshop, 2006.
14. D.E. Wahl, P.H. Eichel, D.C. Ghiglia, C.V. Jakowats Phase gradient autofocus - A robust tool for high resolution SAR Phase Correction. IEEE Transactions of aerospace electronic systems ., vol.30, no.3, pp.827-835, 1994
15. J.S. Beates Expansion and discussions of the phase gradient algorithm. Optics letters vol. 14, no. 1, 2000.

Для цитирования:

С. И. Моряков, С. М. Нестеров, И. А. Скородумов. Алгоритмы автофокусировки инверсно-синтезируемых двумерных радиолокационных изображений объектов. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. №8. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/aug18/11/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2018.8.11