

# ЦИФРОВОЙ АЛГОРИТМ АВТОФОКУСИРОВКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ РАДИОЛОКАТОРА С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА ЛОКАЛЬНОЙ ЭНТРОПИИ В УСЛОВИЯХ БЫСТРЫХ ФЛУКТУАЦИЙ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Горячкин О.В., Кловский Д.Д.\*

Государственный научно-производственный ракетно-космический центр  
«ЦСКБ-Прогресс», 443009, г. Самара, ул. Псковская 18,  
тел. (8462) 289354, E-mail: gor@mail.radiant.ru

\*Поволжская государственная академия информатики, радиотехники и связи,  
кафедра теоретических основ радиотехники и связи, 443010, г. Самара,  
ул. Л. Толстого 23, тел. (8462) 335558, E-mail: klovsky@pgati-vt.da.ru

**Реферат.** В докладе рассматривается задача цифрового синтеза апертуры в радиолокаторах авиационного базирования высокого разрешения в условиях недостаточной точности навигационных измерений (задача автофокусировки РСА изображений). Рассматривается случай быстрых флуктуаций параметров фокусировки траекторного сигнала РСА на интервалах времени сравнимых с интервалом синтеза апертуры, возникающий вследствие высокой динамики полета малых летательных аппаратов. Для решения этой проблемы предлагается двухэтапный алгоритм автофокусировки РСА изображений, использующий критерий минимума локальной энтропии и гармоническая модель траекторных нестабильностей летательного аппарата. Приводятся экспериментальные результаты применения алгоритма для получения изображений высокого разрешения авиационной РСА L-диапазона «МАРС».

## ВВЕДЕНИЕ

Задача фокусировки изображений радиолокаторов с синтезированной апертурой авиационного базирования стала актуальной в связи с повышением их пространственного разрешения до уровня единиц метров и менее в конце 80-х и первой половине 90-х годов. Проблема была вызвана тем, что современные навигационные системы не могут с необходимой точностью обеспечить измерение траектории перемещения фазового центра антенны РСА, что является необходимым условием получения высокого пространственного разрешения.

Эта проблема в большинстве случаев была успешно решена разработкой алгоритмов цифровой автофокусировки РСА изображений. Известные на сегодняшний день алгоритмы автофокусировки можно разделить на два основных класса [1]: параметрические, когда неизвестны один или несколько параметров траекторного сигнала; непараметрические, когда приходится восстанавливать неизвестный сигнал целиком [1,3]. Если задача непараметрической фокусировки возникает в основном вследствие эффектов распространения сигналов РСА в атмосфере [3] и характерна в большей степени для РСА космического базирования, то случай параметрической фокусировки связан, как правило, с траекторными ошибками и нестабильностями авиационных и космических носителей [2].

В настоящее время известны две основных группы алгоритмов параметрической автофокусировки: алгоритмы основанные на использовании локальных статистик РСА изображений и алгоритмы, использующие корреляционные свойства расфокусированных изображений [1,2]. В большинстве случаев, эти алгоритмы обеспечивают достижение заданного уровня разрешения, однако, в случае, когда РСА устанавливается на летательных аппаратах легкого класса (малая авиация, вертолеты, беспилотные самолеты) вариации параметров фокусировки становятся сравнимы с интервалом синтеза апертуры. В этом случае получение заданного уровня разрешения требует использования более адекватных моделей траекторного сигнала и алгоритмов автофокусировки.

## АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ

Как было указано выше точность знания параметров относительного движения РСА и отражающей поверхности определяет степень параметрической неопределенности азимутального ядра (3) интегрального уравнения (1).

$$\dot{S}(t, kT) = \iint \dot{K}_A(kT - \theta, \sigma) \dot{K}_R(t - \Delta t(kT - \theta, \sigma)) \xi(\theta, \sigma) g_R(\sigma) g_A(\theta, \sigma) d\theta d\sigma \quad (1)$$

$$\dot{K}_R(t) = \int_{-\Delta\omega}^{\Delta\omega} \dot{h}(j\omega) \dot{K}_{RE}(j\omega) \dot{K}_T(j\omega) \dot{K}_{AT}(j\omega) \exp(j\omega t) d\omega \quad (2)$$

$$\dot{K}_A(\theta, \sigma) = \exp(j\omega_0 \Delta t(\theta, \sigma)) \cdot \exp(j\omega_0 \delta(\theta)) \quad (3)$$

В этом выражении:  $\xi(\theta, \sigma)$  - коэффициент отражения подстилающей поверхности;  $\dot{h}(j\omega)$  - комплексная огибающая зондирующего сигнала;  $\dot{K}_{AT}(j\omega)$  - ядро, описывающее рефракцию зондирующего сигнала в регулярной атмосфере;  $\dot{K}_{RE}(j\omega) \dot{K}_T(j\omega)$  - передаточная характеристика аппаратного тракта;  $\Delta t(kT - \theta, \sigma)$  - регулярная часть временного запаздывания сигнала в атмосфере;  $\delta(\theta)$  - флуктуационная компонента временного запаздывания сигнала в турбулентной атмосфере (для космических РСА);  $t, kT$  - координаты (задержка, номер зондирующего сигнала);  $\theta, \sigma$  - координаты элемента подстилающей

поверхности (азимут, дальность);  $g_A$  и  $g_R$  вещественные функции описывающие эффект модуляции отраженного сигнала при телескопическом обзоре.

На пространственное разрешение РСА оказывает влияние коэффициент определяющий квадратичный фазовый набег в выражении (3), определяемый выражением (4).

$$\varphi(kT, \theta, \sigma) = \frac{4\pi}{\lambda} \left[ F_p \left( \frac{c\sigma}{2} \right) + \frac{1}{c} \cdot F_p' \left( \frac{c\sigma}{2} \right) \cdot \frac{1}{\sigma} \cdot \left( (\mathbf{R}_c''(\theta), \mathbf{R}_c(\theta) - \mathbf{R}(\theta, \sigma)) + (\mathbf{R}_c'(\theta), \mathbf{R}_c'(\theta)) \right) \right] \cdot (kT - \theta)^2 \quad (4)$$

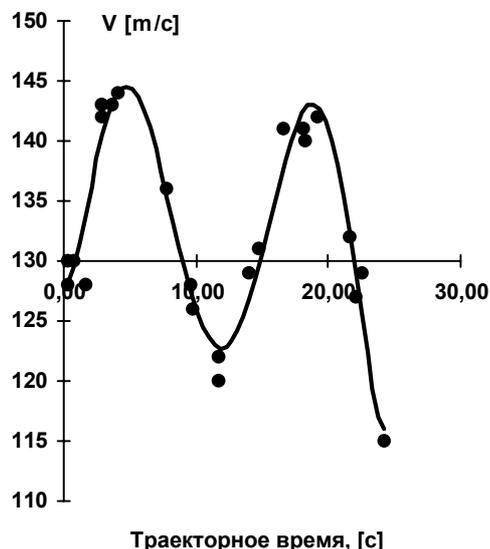


Рис. 1 Результаты измерения и интерполяции эквивалентной скорости авиационной РСА «МАРС» по фрагменту РГГ г. Самара (12.12.91г.).

В этом выражении  $F_p$  - функция, описывающая влияние среды распространения;  $\mathbf{R}_c(\theta)$  - вектор положения летательного аппарата;  $\mathbf{R}(\theta, \sigma)$  вектор, описывающий геометрию отражающей поверхности.

Поскольку часто траектория перемещения фазового центра антенны РСА не является прямолинейной, то данный коэффициент является функцией траекторного времени. Поэтому запишем коэффициент фокусировки через «эквивалентную» скорость прямолинейного движения (5). Эквивалентная скорость, как мы видим из этого выражения, связана с модулем вектора скорости и проекцией ускорения на наклонную дальность, а также с коэффициентом, отражающим влияние регулярной и флюктуирующей атмосферы («медленные» флюктуации).

Однако в (4) имеет место только квадратичный фазовый набег. Это свидетельствует о том, что значение доплеровского центроида зависит только от ориентации диаграммы направленности антенны РСА. Оценка доплеровского центроида, является необходимой, при коррекции линейных искажений масштаба РЛИ [2], но собственно на его качество (пространственное разрешение) не влияет. Данная задача представляется на данный момент достаточно полно исследованной и в данной работе не рассматривается.

Циклическое смещение азимутального спектра радиолокационного изображения (РЛИ) (называемого в зарубежной литературе доплеровским центроидом [2]) обычно связано с линейным фазовым набегом траекторной фазы.

$$V(\theta, \sigma) = F_p' \left( \frac{c\sigma}{2} \right) \cdot \left( (\mathbf{R}_c''(\theta), \mathbf{R}_c(\theta) - \mathbf{R}(\theta, \sigma)) + (\mathbf{R}_c'(\theta), \mathbf{R}_c'(\theta)) \right) \quad (5)$$

Ухудшение разрешающей способности РСА, вследствие ошибки в определении параметра фокусировки, может быть найдена по следующей приближенной формуле:

$$\Delta_a = V \cdot \lambda / 4 \cdot R_H \cdot T_s + 4 \cdot V^2 \cdot T_s \cdot \delta V / R_H^2 \quad (6)$$

где:  $T_s$  - интервал синтеза РЛИ,  $\delta V$  - ошибка по эквивалентной скорости.

Если мы имеем информацию о точности имеющихся навигационных данных, то можно определить оптимальной интервал синтеза РЛИ, при котором будет обеспечено наилучшее для данных точностей азимутальное разрешение, т.е., то разрешение, при котором еще не будут сказываться траекторные ошибки.

$$T_s = \sqrt{\lambda / 4 \cdot (R_H / 2 \cdot V \cdot \sigma_V - V^2 / R_H \cdot \sigma_R)} \quad (7)$$

Зависимость параметра фокусировки от траекторного времени, является критичной также и для систем среднего разрешения, работающих в длинноволновой части диапазона частот РСА, т.к. в этом случае также имеет место изменение параметра фокусировки на интервалах времени, сравнимых с интервалом синтеза.

Большинство алгоритмов автофокусировки РСА [1], устойчиво работают, только если сюжет РЛИ содержит ярко выраженные точечные объекты. Поэтому основные этапы восстановления РЛИ в условиях параметрической неопределенности относительно параметров движения летательного аппарата должны быть следующие:

«Грубый» синтез радиолокационного изображения с пространственным разрешением, определяемым по формуле (7), одним из известных быстрых алгоритмов;

Выделение фрагментов голограммы перспективных для оценивания параметра фокусировки (процедура автоматического обнаружения точечных целей).

Фокусировка выделенных фрагментов;

Интерполяция параметров фокусировки на всю область голограммы;

«Точный» синтез радиолокационного изображения (алгоритм прямой свертки) с использованием интерполированной зависимости параметра фокусировки или соответствующей параметрической модели.

Оценка параметров фокусировки может осуществляться автоматически (автофокусировка) или с использованием интерактивных методов обработки («ручная фокусировка»).

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Особенности применения данных методов, иллюстрирует пример восстановления РЛИ самолетной РСА L - диапазона в составе РЛК MARS (Украина). Данный РЛК разработан в ИРЭ АН УССР (в настоящее время Исследовательский Центр Радиофизических Методов Дистанционного Зондирования Земли имени А.И. Калмыкова). Обработка по координате наклонной дальности в этой системе осуществляется на аппаратном уровне, поэтому цифровое восстановление РЛИ осуществляется только в сечении путевой дальности.



Рис. 2 Фокусировка по данным навигационной системы самолета

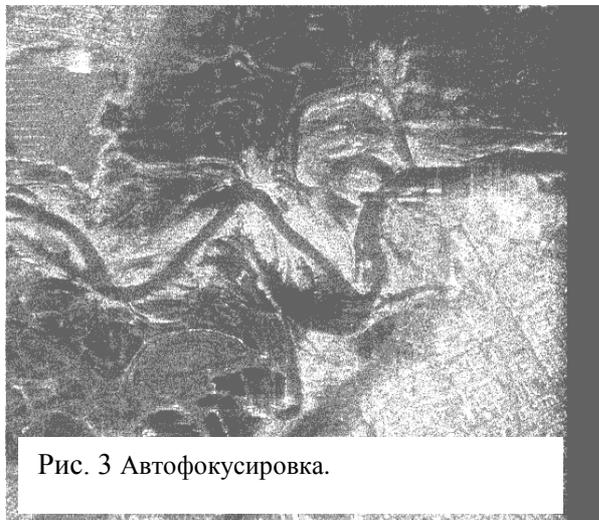


Рис. 3 Автофокусировка.

Для оценки параметра фокусировки в локальной области использовался алгоритм автофокусировки по критерию минимума локальной энтропии [1]. Суть алгоритма в нелинейной оптимизации методом наискорейшего спуска по параметрам эквивалентной скорости и длине апертуры локальной энтропии фрагментов РЛИ, содержащих «яркие» особенности. Значение энтропии вычисляется по локальной гистограмме фрагмента РЛИ по формуле энтропии дискретного источника. Как показало математическое моделирование, этот алгоритм в наибольшей степени эффективен при фокусировке ярких точечных отражателей и работает с минимальными размерами фрагмента РЛИ [1]. Результаты оценки параметра фокусировки по реальной голограмме РСА показаны на Рис.1. По этим результатам видно, что эквивалентная скорость меняется в пределах ( $\pm 15$  м/с) на интервале порядка 10с (отметим также, что максимальный интервал синтеза апертуры для данного случая составляет 3-5 с). Естественно, что при использовании модели прямолинейного равномерного движения самолета такое изменение объяснить невозможно. Данные колебания связаны с изменением радиального ускорения движения самолета (см. выражение (5)).

Полученные результаты являются достаточно типичными для авиационных носителей и совпадают с [2]. Этот факт позволяет использовать для решения задачи фокусировки РЛИ модель движения самолета в виде суммы линейных и гармонических компонент. Используя данную модель траекторных нестабильностей, можно рассматривать задачу фокусировки в случае «быстрых» колебаний эквивалентной скорости, причем параметры модели легко определяются по результатам локальной автофокусировки (Рис.1).

На Рис.2 показано РЛИ данного фрагмента сфокусированное по данным навигационной системы самолета, а на Рис.3 автофокусированное изображение построенное с учетом интерполяции показанной на Рис.1.

Т.о. мы свели задачу оптимизации большого количества локальных параметров фокусировки к задаче оптимизации по нескольким параметрам гармонической модели.

**ВЫВОДЫ**

Т.о. двухэтапная процедура автоматической фокусировки, на первом этапе которой определяются параметры фокусировки в локальных областях РЛИ, а на втором этапе с использованием гармонической модели изменения параметра фокусировки оптимизируются параметры алгоритма уже по всему изображению, позволяет получить радиолокационное изображение высокого качества, в условиях быстрых флуктуаций параметров движения фазового центра антенны РСА.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Горячкин О.В. Автоматическая фокусировка изображений в радиолокаторе с синтезированной апертурой. // ТУЗС «Анализ сигналов и систем связи». СПб., 1996, №161, с.128-134.
2. С. J. Oliver. Synthetic-aperture radar imaging // J.Phys. D:Appl. Phys. 22. 1989. p.871-890.
3. Goriachkin O.V., Kloovsky D.D. The some problems of realization spaceborne SAR's in P,UHF,VHF bands. // Proceedings of IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'99), Gamburg, Germany.



**A MINIMUM LOCAL ENTROPY DIGITAL ALGORITHM FOR SAR IMAGES AUTOFOCUSING IN CONDITIONS OF FAST FLUCTUATIONS OF PARAMETERS OF THE AIRCRAFT MOTION**

Goriachkin O.V., Klovsky D.D.\*

State Rocket Space Center “TsSKB-Progress”, 18 Pskovskaja str., 443009, Samara, Russia,  
Phone: 7(8462) 289354, E-mail: gor@mail.radiant.ru

\*Volga State Academy of Telecommunication and Informatics, department of theoretical basis of telecommunication and radioengineering systems, 23 Lva Tolstogo Str., 443010, Samara,  
Phone: 7(8462) 335558, E-mail: klovsky@pgati-vt.da.ru

**Abstracts.** In the paper the problems of digital airborne high resolution SAR imaging for cases insufficient navigation accuracy (the autofocusing problem in the SAR) are discussed. The case of the fast fluctuation of the focusing parameter of SAR signals on the time intervals that are comparable with duration of synthetic aperture interval is considered. For solution of the problems the minimum local entropy digital algorithm (MLE algorithm) and harmonic model of the fast fluctuations of aircraft motion are proposed. The experimental results of using of the algorithm for obtaining high resolution in L-band SAR “Mars” are showed.

**INTRODUCTION**

The problem of the focusing of SAR images was topical at the end of 80<sup>th</sup> and at the first half of 90<sup>th</sup>. It was bounded up with increasing of spatial resolution of airborne SAR up to one meter and more and with insufficient accuracy of an aircraft trajectory measuring.

The problem was solved in most cases due to development of the autofocusing algorithms of the SAR images. Existent at the moment the autofocusing algorithms divide into two type [1]: parametrical algorithms (when several parameters of the SAR signal are unknown); non-parametrical (when the whole signal is unknown) [1,3].

The problem of the parametrical focusing takes place in a concerned case [2]. Two main groups of algorithms of the parametrical autofocusing exist: based on the local statistics and based on the correlation between looks [1,2].

In most cases the algorithms provide a high quality of the radar images. But in case when SAR sets on board of light aircraft (a small aviation, a helicopter, and an unmanned aircraft) variances of the focusing parameters are very fast (relatively of the synthetic interval). In this situation for an achievement of the high resolution an use of more adequate algorithms and SAR signal models are required.

**THE PROCESSING ALGORITHM**

A phase of the along trace SAR signal describes the follow equation.

$$\varphi(kT, \theta, \sigma) = \frac{4\pi}{\lambda} \left[ F_p \left( \frac{c\sigma}{2} \right) + \frac{1}{c} \cdot F_p' \left( \frac{c\sigma}{2} \right) \cdot \frac{1}{\sigma} \cdot \left( \frac{\mathbf{R}_c''(\theta), \mathbf{R}_c(\theta) - \mathbf{R}(\theta, \sigma)}{\mathbf{R}_c'(\theta), \mathbf{R}_c'(\theta)} \right) \cdot (kT - \theta)^2 \right] \quad (4)$$

Where:  $F_p$  is function described of propagation effects in

the regular atmosphere;  $\mathbf{R}_c(\theta)$  is the radius vector of the aircraft;  $\mathbf{R}(\theta, \sigma)$  is the radius vector of the reflecting surface;  $\theta, \sigma$  are an azimuth and a range coordinates of the reflecting surface point.

The aircraft trajectory is usually non-linear. Therefore, the focusing coefficient is the function of time and we can write the coefficient via the equivalent velocity of the linear aircraft motion in the next form:

$$V(\theta, \sigma) = F_p' \left( \frac{c\sigma}{2} \right) \cdot \left( \frac{\mathbf{R}_c''(\theta), \mathbf{R}_c(\theta) - \mathbf{R}(\theta, \sigma)}{\mathbf{R}_c'(\theta), \mathbf{R}_c'(\theta)} \right)$$

In the equation the equivalent velocity depends on the module of the aircraft velocity vector, the aircraft acceleration projection on the slant range and coefficient described of the propagation effects in the regular and fluctuating atmosphere (“slow” fluctuation). Optimal synthetic interval in conditions of trajectory errors is described in the next form:

$$T_s = \sqrt{\lambda/4 \cdot \left( R_H/2 \cdot V \cdot \sigma_V - V^2/R_H \cdot \sigma_R \right)} \quad (2)$$

Most of autofocusing algorithms work stably only in cases when the SAR images consist a powerful point target. Because, the general procedure of SAR imaging in concerned case is:

The “draft” SAR imaging with a spatial resolution corresponding the (2) equation on the base one of existing fast algorithms;

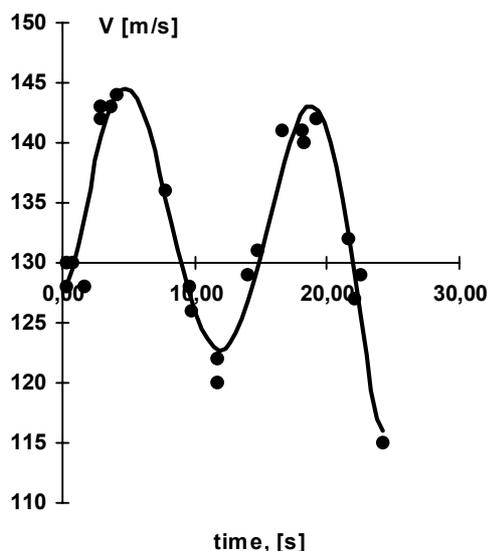


Fig. 0 The results of measuring of the focusing parameter and their interpolation on the real hologram of the L-band SAR “MARS”.

The segmentation of the “draft” image (a detection of a point target algorithm);  
The focusing the fragments;  
The interpolation of focusing parameters on the full size hologram;  
The “precise” SAR imaging with the maximum spatial resolution.

#### **THE EXPERIMENTAL RESULTS**

The features of application of the methods an example of reconstruction of image of the airborne L-band SAR “MARS” are illustrated.

For the estimation of the focusing parameter in local domain we use the minimum local entropy digital algorithm (MLE algorithm) proposed in [1]. The essence of the algorithm is a non-linear optimization used of the method of steepest descent by parameters the equivalent velocity and synthetic interval. The optimum criterion is minimum of the local entropy of the SAR image fragments concerned a striking particulars. The value of the entropy calculates by the discrete source equation.

The results of the estimation of the focusing parameter in the real hologram of L-band SAR “MARS” are showed in Fig.1. On the diagram we can see that range of the equivalent velocity is  $\pm 15$  m/s on the time period in the order of 10 s (the maximum synthetic interval for the system is in the order of 3-5 s). This variation the radial aircraft acceleration are explained. It is a typical situation for airborne SAR [2]. The fact allows to use the model of an aircraft motion with linear and harmonic components.

#### **CONCLUSIONS**

Thus, we propose for solution of the problem of airborne SAR imaging the algorithm consisted from two stages. On the first stage we make a local autofocusing and define the estimates of variation of focusing parameter. On the second stage we calculate of the constant parameters (into processing interval) of the harmonic model and make the precise imaging.

#### **REFERENCES**

1. Горячкин О.В. Автоматическая фокусировка изображений в радиолокаторе с синтезированной апертурой. // ТУЗС «Анализ сигналов и систем связи». СПб., 1996, №161, с.128-134.
2. C.J. Oliver. Synthetic-aperture radar imaging // J.Phys. D:Appl. Phys. 22. 1989. p.871-890.
3. Goriachkin O.V., Klovsy D.D. The some problems of realization spaceborne SAR's in P,UHF,VHF bands. // Proceedings of IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'99), Gamburg, Germany.