

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 неустойчивостей летательного аппарата. Приводятся экспериментальные результаты применения алгоритма для получения изображений высокого разрешения авиационной РСА L-диапазона “МАРС”.

1. 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 неустойчивостями 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.

2. 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: $\dot{\xi}(\theta, \sigma)$ - 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); θ, σ - 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).

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

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).

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

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).

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

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, δV - 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.

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



Рис. 2 Фокусировка по данным навигационной системы самолета



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

- параметра фокусировки (процедура автоматического обнаружения точечных целей).
3. Фокусировка выделенных фрагментов;
 4. Интерполяция параметров фокусировки на всю область голограммы;
 5. “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”).

2. 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.

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 (± 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

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:

1. “Грубый” синтез радиолокационного изображения с пространственным разрешением, определяемым по формуле (7), одним из известных быстрых алгоритмов;
2. Выделение фрагментов голограммы перспективных для оценивания

(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 неустойчивостей, 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.



Рис. 3 Автофокусировка.

4. 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.