

Автоподбор параметров синтеза радиолокационного изображения, полученного с радиолокатора с синтезированной апертурой

М.А. Гурьянов, А.А. Прокофьев

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

Automatic Parameters Detection of Synthesis of Radio Location Image Received by Radio Locator with Synthesized Aperture

M.A. Guryanov, A.A. Prokofyev

National Research University of Electronic Technology, Moscow

Описан способ предварительной быстрой фокусировки радиолокационного изображения, регистрируемого радиолокатором с синтезированной апертурой, установленным на малом летательном аппарате. Предложенный алгоритм обеспечивает подбор параметров путем оптимизации целевой функции и позволяет получить радиолокационное изображение с разрешающей способностью менее 1 м.

Ключевые слова: радиолокационное синтезирование апертуры; автофокусировка радиолокационного изображения; алгоритм синтеза радиолокационных изображений.

The new method of preliminary fast focusing of the radio location image, registered by the radio locator with the synthesized aperture, which is mounted on a small aircraft, has been proposed. This algorithm executes the detection of parameters by optimizing the objective function. The algorithm permits to receive a radio location image with 1m resolution.

Keywords: SAR, autofocus, phase errors, velocity estimation.

Введение. Технология радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) – один из способов получения визуального изображения местности. В отличие от основного конкурента – оптической съемки – радиолокация имеет неоспоримые преимущества. Например, радиолокационная съемка не зависит от погодных условий и времени суток.

Процесс автофокусировки радиолокационного изображения (РЛИ) представляет собой автоматическое вычисление параметров синтеза. Обычно для требуемой разрешающей способности достаточно данных бортовых приборов. Однако для высокоточных РСА, разрешающая способность которых меньше 1 м, бортовой аппаратуры бывает недостаточно [1].

В большинстве случаев в распоряжении вычислительного центра имеются данные о траектории и скорости полета носителя РСА. В таких условиях для улучшения раз-

решающей способности РЛИ можно использовать классические алгоритмы автофокусировки, такие как Coherence Map Drift [2] или Shift And Correlate [3].

Однако все указанные методы разрабатываются и применяются для точной фокусировки и окончательной обработки изображения. Данный подход зарекомендовал себя в системах РСА орбитального базирования. При использовании в качестве носителя нестабильного малого летательного аппарата (ЛА) сходимость указанных методов нарушается [4]. Процедура грубой автофокусировки позволяет решить эту проблему и получить уже на первом этапе обзорное РЛИ.

Предложенный алгоритм обеспечивает подбор параметров на основании характера выбранной целевой функции, численно оценивающей качество РЛИ, и позволяет в автоматическом режиме получить РЛИ с разрешающей способностью менее 1 м.

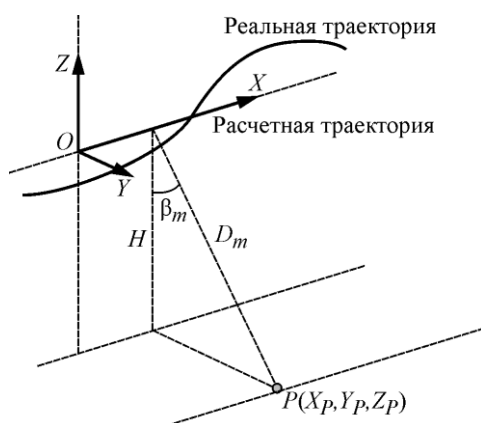


Рис. 1. Математическая модель полета и реальная траектория

Математическая модель. Математическая модель полета. Рассмотрим классическую модель полета ЛА в момент съемки [5, с. 7–14]. Траектория полета в рамках математической модели прямая, совпадающая с осью координат OX. Скорость полета V_x является азимутальной составляющей реального вектора скорости $\vec{V} = V_x \vec{i} + V_y \vec{j} + V_z \vec{k}$. Скорости V_z и V_y характеризуют изменение высоты и боковое смещение ЛА относительно расчетной траектории. Реальная траектория полета и ее аналитическая модель представлены на рис.1.

Параметры модели: H – высота полета над поверхностью Земли; β_m – угол между направлением на снимаемую точку и осью OZ; D_m – наклонная дальность до снимаемой точки

поверхности; m – номер отсчета АЦП, определяет наклонную дальность до снимаемой точки.

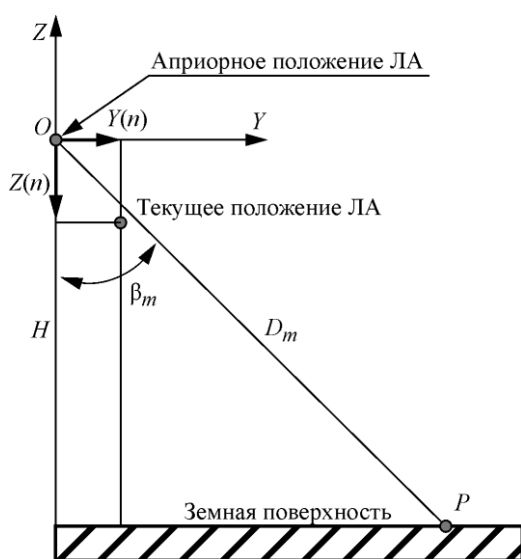


Рис. 2. Математическая модель полета (проекция на плоскость OYZ)

Математическая модель съемки. На основе классической модели строится модель съемки произвольной точки поверхности. Снимается произвольная точка, которая задается набором координат, связанных с положением ЛА в момент начала съемки $P(X_p, Y_p, Z_p)$. Фактическая наклонная дальность отличается от расчетной и задается функцией координат и времени $D_p = f_p(P, t)$.

Поскольку реальная траектория неизвестна, предполагается $D_m = D_p$.

В проекции ZOY модель выглядит так, как показано на рис.2.

Все данные в рамках математической модели являются дискретными и зависят от номера зондирующего импульса n . Отклонения реального положения ЛА от расчетного вдоль

осей OY и OZ называются траекторными нестабильностями и обозначены как $Y(n)$ и $Z(n)$ соответственно.

В разработанном алгоритме синтеза РЛИ предполагается, что синтез изображения заданной точки P осуществляется параметрически. Большинство параметров синтеза известно заблаговременно и являются техническими характеристиками радиолокатора.

Параметрами синтеза, неизвестными в момент синтеза, являются V_x – азимутальная скорость полета ЛА; H – высота полета ЛА; $Y(n)$ и $Z(n)$ – отклонения ЛА от расчетной траектории от осей OY и OZ соответственно.

Все неизвестные параметры синтеза взаимосвязаны, что позволяет проводить оптимизацию только по одному из них. Ввиду того, что основной причиной расфокусировки является неверная оценка набег фаз для различных зондирующих импульсов (ЗИ) n , достаточно будет доказать, что набег фаз зависит только от одного параметра. Эта зависимость задается формулой

$$\varphi_P(n) = \frac{4\pi L_P(n)}{\lambda}, \quad (1)$$

где $\varphi_P(n)$ – фаза сигнала точки P на голограмме, соответствующей ЗИ номера n . Полагается, что при $n=0$ наклонная дальность D_m до снимаемой точки была минимальна и $dL_P(n)=0$, где $dL_P(n)$ – изменение наклонной дальности до точки в зависимости от номера ЗИ n ; λ – длина волны зондирующего излучения.

Изменение фазы между соседними отсчетами голограммы определяется формулой

$$d\varphi_P = \frac{4\pi dL_P}{\lambda}, \quad (2)$$

где

$$dL_P = \sqrt{D_m^2 + \left(V_x \frac{1}{f_{\text{ЧПИ}}}\right)^2} - D_m, \quad (3)$$

где $f_{\text{ЧПИ}}$ – частота повторения импульсов.

Наклонная дальность при этом определяется следующим соотношением:

$$\begin{aligned} D_m &= \sqrt{(H - Z(n))^2 + ((H - Z(n))\text{tg}(\beta_m) - Y(n))^2} = \\ &= \sqrt{(H - Z(n))^2 \left(1 + \left(\text{tg}(\beta_m) - \frac{Y(n)}{H - Z(n)}\right)^2\right)}, \end{aligned}$$

или, вводя эквивалентный угол $\hat{\beta}_m = \arctg\left(\text{tg}(\beta_m) - \frac{Y(n)}{H - Z(n)}\right)$, получаем

$$D_m = \frac{H - Z(0)}{\cos(\hat{\beta}_m)}. \quad (4)$$

Наклонную дальность в выражении (4) можно считать зависящей только от одного параметра – высоты полета. Для этого $\hat{H}$ вводится следующим образом:

$$\hat{H} = (H - Z(0)) \frac{\cos(\beta_m)}{\cos(\hat{\beta}_m)}. \quad (5)$$

Подставляя (4) в (5), получаем

$$D_m(\hat{H}) = \frac{\hat{H}}{\cos(\hat{\beta}_m)}. \quad (6)$$

Уравнения (4) – (6) демонстрируют, что вместо трех параметров (траекторные неустойчивости и высота полета) достаточно проводить оптимизацию только по одному.

Нетрудно показать, что из (3) также следует $dL_p = \frac{V_x^2}{2D_m(\hat{H})(f_{\text{ЧПИ}})^2}$, где замена

$\frac{\hat{V}_x^2}{D_m(H)} = \frac{V_x^2}{D_m(\hat{H})}$ позволяет выразить приращение наклонной дальности через эквива-

лентную скорость: $dL_p = \frac{\hat{V}_x^2}{2D_m(H)(f_{\text{ЧПИ}})^2}$. Подставив это в выражение (2), получим

конечную формулу: $\varphi_p(n) = \frac{2\pi\hat{V}_x^2}{\lambda D_m(H)(f_{\text{ЧПИ}})^2}$.

Все прочие параметры могут быть заданы заблаговременно и зафиксированы в некотором приближении. Любая неточность в их определении компенсируется значением эквивалентной скорости $\hat{V}_x$.

Целевая функция. На предварительном этапе проведены исследования и рассмотрены различные функции, позволяющие оценить качество цифрового изображения по различным параметрам: контрастность, четкость, количество и протяженность границ и т.д.

Оптимальной для применения в области амплитудного РЛИ считается мера TFM (Tenengrad Focus Measure) [5, с. 28–29], формула которой адаптирована под предметную область.

Пусть радиолокационное изображение представлено в амплитудном виде:

$$I(i, j), i = 1, 2, \dots, M, j = 1, 2, \dots, N. \quad (7)$$

Tenengrad Focus Measure. Мера сфокусированности определяется формулой

$$TG(I) = \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} K_{i,j}(I, p) S_{i,j}^2, \quad (8)$$

где $K_{i,j}(I, p)$ – коэффициент, такой, что

$$K_{i,j}(I, p) = \begin{cases} 1, & \text{если } |I(i, j)| \geq p \cdot \max_{i,j}(|I(i, j)|), \\ 0, & \text{если } |I(i, j)| < p \cdot \max_{i,j}(|I(i, j)|), \end{cases} \quad (9)$$

S_{ij} – градиент Собеля для пикселя с координатами i, j на изображении размера $M \times N$; p – параметр коэффициента, точное значение которого подбирается экспериментально. В разработанном алгоритме предлагается подбирать его значение таким образом, чтобы в формуле (8) суммировалось только 10% наибольших значений градиента Собеля.

Необходимость параметра p обусловлена тем, что, несмотря на изменение распределения энергии на картинке, интеграл (т.е. суммарная энергия) остается неизменным и следует оценить только максимально резкие перепады амплитуды на РЛИ. Формула (8), по сути, является разновидностью оценки локальной контрастности изображения.

Градиент Собеля определяется следующей формулой [6]:

$$S_{ij} = \sqrt{\left(S_{ij}^r\right)^2 + \left(S_{ij}^c\right)^2}. \quad (10)$$

Значения градиента Собеля (10) по строке S^r и столбцу S^c определяются следующим образом:

$$S^r = D^r I, \quad S^c = D^c I,$$

$$D^r = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad D^c = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}.$$

Функция (8) имеет свой максимум в случае наиболее сфокусированного изображения.

Алгоритм оптимизации и результаты. В качестве алгоритма оптимизации выбрана разновидность алгоритма полного перебора параметров.

Параметры алгоритма. V_R – величина диапазона скоростей, по которому проводится поиск, принимающая различные значения в зависимости от оценочной точности первого приближения; dV – значение шага по скорости, с которым осуществляется поиск; ε – точность, с которой требуется определить скорость; p – параметр нормировки.

Предлагаются следующие рекомендации по выбору параметров. V_R выбирается таким образом, чтобы фактическая скорость была гарантированно рассмотрена; dV ведет к повышению точности, но возрастанию вычислительной сложности линейно; p – согласно рекомендациям алгоритма TFM.

Входные данные алгоритма. V_0 – первое приближение скорости; $H(i, j)$ – фрагмент комплексной голограммы, сжатый по дальности, $i=1, 2, \dots, M$, $j=1, 2, \dots, N$.

Шаги алгоритма. Шаг 1. Вычисляются базовые значения максимальной и минимальной оценок скорости для данной итерации алгоритма:

$$V_{\min} = V_0 - \left(\frac{V_R}{2}\right), \quad V_{\max} = V_0 + \left(\frac{V_R}{2}\right).$$

Шаг 2. Проводится оптимизация целевой функции

$$m = \max_n (TG(I_n)),$$

где I_n – результат синтеза голограммы $H(i, j)$ со скоростью, равной $V_n = V_{\min} + ndV$,

$$n=1, 2, \dots, \frac{V_R}{dV}.$$

Результатом на данном шаге является оценка скорости $V_m = V_{\min} + mdV$.

Шаг 3. Если выполняется условие $dV \geq \varepsilon$, алгоритм завершает свою работу, в противном случае меняются ключевые значения скоростей и осуществляется переход к шагу 2: $V_0 = V_m$. Шаг поиска и диапазон поиска уменьшаются на порядок и становятся равными $\frac{dV}{10}$ и $\frac{V_R}{10}$ соответственно.

Результаты и их обсуждение. Предложенный алгоритм опробован и применен в качестве предварительной процедуры фокусировки на рабочем месте оператора ЛА. В отличие от сложных вычислительных процедур полного восстановления траектории полета предложенный метод позволяет получить качественное изображение для поверхностного анализа. Недостатком алгоритма является невозможность восстановления полной картины полета и, соответственно, получения РЛИ с разрешающей способностью менее 30 см. На рис.3 приведено изображение, синтезированное с параметрами полета, полученными с бортовой аппаратуры ЛА; на рис.4 – РЛИ, синтезированное из той же голограммы с использованием данных, полученных в процессе автоподбора.



Рис.3. Амплитудное РЛИ, синтезированное с произвольной скоростью V_0



Рис.4. Амплитудное РЛИ после автоподбора параметров с первым приближением V_0

Закключение. Предлагаемый алгоритм позволяет получить первое приближение параметров полета ЛА, достаточных для применения более точных методов автофокусировки и получения обзорного РЛИ.

Литература

1. **Dawidowicz B., Samczyński P., Smolarczyk M., Kuźmiuk M.** Analysis of SAR images quality degradation factors // *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments IV.* – Bellingham, 2006. – Vol. 6159.
2. **Samczyński P., Kulpa K.** Coherent MapDrift technique // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* – 2010. – Vol. 48. – N 3. – P. 1505–1517.
3. **Yufeng Wu, Guangcai Sun, Xiang-Gen Xia.** An improved SAC algorithm based on the range-keystone transform for Doppler rate estimation // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters.* – 2013. – Vol. 10. – N 4.
4. **Горячкин О.В.** Автоматическая фокусировка изображений в радиолокаторе с синтезированной апертурой // *Тр. научных заведений связи «Анализ сигналов и систем связи».* – 1996. – № 161. – С. 128–134.
5. **Zoran Sjanic.** Navigation and SAR auto-focusing in a sensor fusion framework. – Linköping, 2011.
6. **Wahl D., Eichel P., Ghiglia D., Jakowatz J.C.V.** Phase gradient autofocus – a robust tool for high resolution SAR phase correction // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems.* – 1994. – Vol. 30. – N 3. – P. 827–835.

Статья поступила
8 октября 2014 г.

Гурьянов Максим Анатольевич – аспирант кафедры ВМ-1 МИЭТ. *Область научных интересов:* цифровая обработка сигналов и изображений, численные методы, математическое моделирование. **E-mail:** semioto@gmail.com

Прокофьев Александр Александрович – кандидат физико-математических наук, доктор педагогических наук, заведующий кафедрой ВМ-1 МИЭТ. *Область научных интересов:* цифровая обработка сигналов и изображений, математическое моделирование.

Вниманию читателей журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника»

Оформить годовую подписку на электронную
копию журнала можно на сайтах

- Научной электронной библиотеки: www.elibrary.ru
- Национального цифрового ресурса «Руконт»: www.rucont.ru