

## Исследование взаимного влияния траекторных нестабильностей ЛА и смещения ДН антенны на качество радиолокационного изображения

С.Д. Коган<sup>1,2</sup>, М.А. Гурьянов<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет)

<sup>2</sup>ООО «ЗелПром-Телеком»

<sup>3</sup>Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

Современные радиолокационные системы авиационного базирования с синтезированной апертурой антенны способны формировать радиолокационное изображение (РЛИ) высокого пространственного разрешения [1], однако они весьма чувствительны к траекторным нестабильностям (ТН) носителя, а также к другим отклонениям реальных условий съёмки от математической модели. Чувствительность эта проявляется в существенном снижении качества РЛИ, которое, в свою очередь, влечёт за собой потерю им информативности и различимости человеческим глазом.

В данной работе рассматривался вопрос взаимного влияния на качество РЛИ двух наиболее распространённых факторов. Во-первых, существенное влияние на пространственное разрешение РЛИ (далее просто «разрешение») оказывает неопределённость параметров полёта (скорости, высоты, отклонений от прямолинейного движения). В работе [2] доказано, что, с точки зрения разрешения РЛИ, параметры полёта являются взаимозависимыми и достаточно провести процедуру оптимизации (автофокусировки) только по одному из параметров (например, по скорости полёта). В той же работе приведена процедура автофокусировки, подбирающая для каждого фрагмента голограммы наиболее оптимальную (т.н. характеристическую) скорость (далее – просто «скорость»). Эта процедура успешно применяется на практике.

Вторым важным фактором является смещение диаграммы направленности антенны по азимуту (СДНА), т.е. отклонение (по азимутальной координате) центра луча антенны от перпендикулярного к линии полёта направления. При наличии СДНА на радиоголограмме для его компенсации применяется упрощённая схема, которая также хорошо зарекомендовала себя на практике.

Тем не менее, если во время съёмки радиоголограммы имели место как ТН, так и СДНА, то совместное применение алгоритмов автофокусировки и компенсации СДНА приводит к тому, что различные фрагменты РЛИ, отсинтезированные для различных значений скорости, полученных в результате автофокусировки, обладают смещением изображения (по азимуту и по дальности) друг относительно друга (см. рис. 1 (а)). Целью данного исследования было выяснение характерных особенностей явления смещения изображения по азимуту (далее – просто «смещения») с целью его компенсации на РЛИ.

В результате проведения серии экспериментов было выяснено, что, при постоянном значении СДНА, зависимость смещения изображения от скорости  $V$  имеет следующий вид:

$$dAZ(V) = \frac{C_1}{V} + C_2, \quad C_i = \text{const}, i = \{1; 2\}. \quad (1)$$

Параллельно с экспериментами и их анализом проводилось статистическое моделирование.

По результатам моделирования был выбран оптимальный вариант с точки зрения стандартного отклонения предсказанного результата от экспериментально измеренной величины (в наилучшем случае СТД  $\sim 6$  пикселей). Выбранная зависимость определяется как положение максимума корреляционной функции (КФ) двух адресных траекторий (АТ)

$$A(x) = \frac{4\pi}{\lambda} \left( \sqrt{L_{min}^2(y) + \left( V \frac{x}{f_{pr}} \right)^2} - L_{min} \right),$$

построенных для двух различных значений  $V$ . Адресная траектория  $A(x)$  есть зависимость наклонной дальности (НД) до точки на земной поверхности (ЗП) от номера зондирующего импульса  $x$ . Здесь  $f_{pr}$  – частота повторения импульсов,  $L_{min}$  – минимальная НД от ЛА до полосы съёмки,  $L_{min}(y)$  – минимальная НД между ЛА и точкой на земной поверхности с координатой по («земной») дальности  $y$ . При этом экспериментам лучше соответствовал такой вариант моделирования, при

котором две адресные траектории перед вычислением КФ дополнялись нулями (одна слева, другая справа) до общей длины.

При анализе выбранного метода моделирования оказалось, что положение максимума КФ может быть вычислено аналитически из геометрических соображений. Полученные формулы, действительно, не только полностью описывали результаты моделирования, но и, что самое главное, имели вид (1). В случае моделирования с дополнением нулями, смещение изображения, построенного для скорости  $V$ , относительно изображения, построенного для скорости  $V_0$ , определяется разницей между азимутальными координатам максимумов адресных траекторий (наибольших значений наклонной дальности), ввиду чего коэффициенты в (1) определяются следующими соотношениями:

$$C_1 = \frac{\text{sign}(\theta)}{F_s} f_{pr} L_{min}(y) \text{tg} \left( \frac{\varphi_A}{2} + |\theta| \right), \quad (2)$$

$$C_2 = \frac{-\text{sign}(\theta) f_{pr}}{F_s V_0} L_{min}(y) \text{tg} \left( \frac{\varphi_A}{2} + |\theta| \right), \quad (3)$$

где  $\varphi_A$  – ширина диаграммы направленности антенны по азимуту (в радианах),  $\theta$  – СДНА в радианах,  $F_s = \text{const}$  – фактор масштаба для приведения пикселя РЛИ к квадратному виду.

Для тестирования формул (1)-(3) на практике были выбраны два соседних фрагмента РЛИ (размерами 1000x2000 пк каждый) с наличием существенного СДНА ( $\theta = -0.15$  рад при  $\varphi_A = 0.8$  рад), для которых полученные при автофокусировке скорости оказались различны: для левого  $V_0 = 40.9$  м/с, для правого  $V = 45.2$  м/с (рис. 1 (а)). Для сравнения на рис. 1 (б) приведены эти же фрагменты, отсинтезированные для одной и той же скорости  $V_0$ . Для правого фрагмента по формулам (1)-(3) было рассчитано смещение изображения  $dAZ(V, V_0)$  (для расчёта величины  $L_{min}(y)$  была выбрана средняя дальность ( $\langle y \rangle$ ) на фрагменте). Для компенсации этого смещения при синтезе правого фрагмента данные из радиоголограммы выбирались с соответствующим смещением по азимуту:

$$\tilde{H} = H_0 + F_s \cdot dAZ(V, V_0) \quad (4)$$

где  $\tilde{H}$  и  $H_0$  – азимутальные координаты начала фрагмента на радиоголограмме (с компенсацией и без неё соответственно). Результат компенсации представлен на рис. 1 (в).

Как видно из сравнения рис. 1 (б) и рис. 1 (в), полученные формулы позволяют устранить смещение изображения с хорошей точностью, существенно улучшая его зрительное восприятие и информативность.

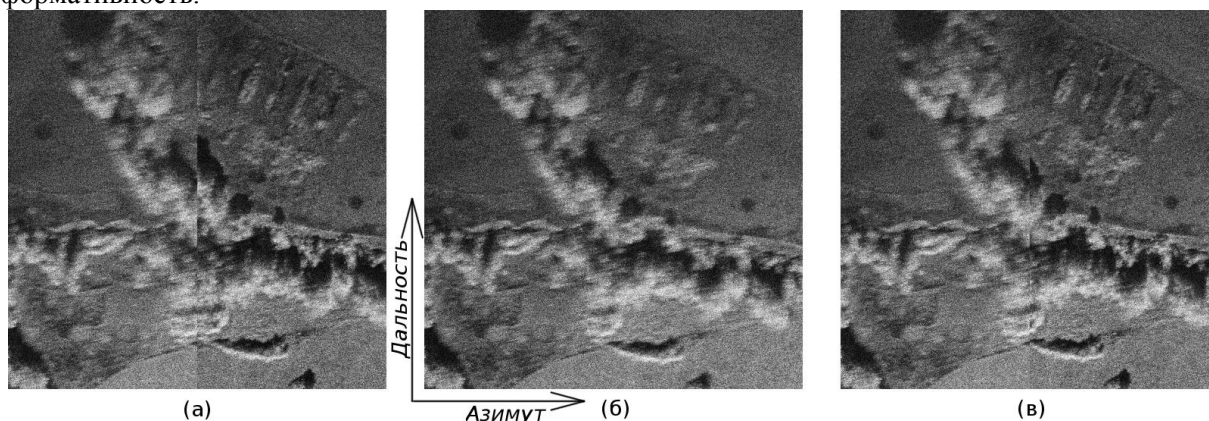


Рис. 1. Два соседних фрагмента РЛИ: (а) с автофокусировкой; (б) без автофокусировки; (в) с автофокусировкой и компенсацией по формулам (1)-(4).

### Литература

1. Cantalloube H-M.J., Dubois-Fernandez P. Airborne X-band SAR imaging with 10 cm resolution - Technical challenge and preliminary results // IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation. 2006. V. 153, N 2. P. 163-176.
2. Гурьянов М.А., Прокофьев А.А. Автоподбор параметров синтеза радиолокационного изображения, полученного с радиолокатора с синтезированной апертурой // Труды конференции «Бесконечномерный анализ, стохастика, математическое моделирование: новые задачи и методы. Проблемы математического и естественнонаучного образования». 2014. Т. 5. С. 206-207.