

Автофокусировка радиолокационного изображения в условиях повышенной нестабильности движения носителя

И.А. Кузьмин, К.С. Лялин, Ю.М. Мелёшин, М. С. Хасанов

Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Зеленоград, ksl@miee.ru

Аннотация — В случае получения радиолокационного изображения при существенной нестабильности траектории движения носителя невозможно подобрать параметры синтеза для достижения максимального разрешения, т.к. они могут изменяться на интервале одной апертуры. В работе представлен подход подапертурного синтеза, при котором параметры движения носителя определяются лишь на небольшом фрагменте соответствующему интервалу когерентности, после чего набор таких фрагментов совмещается в единое радиолокационное изображение. Представлен метод определения относительного масштаба и смещения двух соседних фрагментов, а также метод компенсации фазового сдвига.

Ключевые слова — синтезированная апертура, автофокусировка, подапертурный синтез, нестабильность траектории, корреляционная обработка.

I. ВВЕДЕНИЕ

Радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) позволяют получить разрешение по азимуту существенно превышающее теоретическое разрешение реальной используемой антенны. Для достижения максимального разрешения необходимо знать положение радиолокатора в моменты передачи зондирующих импульсов. Процесс определения координат радиолокатора или параметров, с достаточной точностью определяющих данные координаты в любой момент времени, называется автофокусировкой. В случае прямолинейного движения с постоянной скоростью для нахождения позиции радиолокатора достаточно знать скорость движения носителя и частоту повторения импульсов. В реальных же системах (в большей степени это касается самолетных РСА) положение носителя описывается некоторой кривой. Если интервал когерентности (для необходимого разрешения) больше, чем длина синтеза (апертуры), то нестабильность данного движения можно считать несущественной и для синтеза радиолокационного изображения (РЛИ) необходимо подобрать параметр скорости только для каждого интервала когерентности. Если же интервал когерентности ниже длины апертуры (невозможно подобрать единую скорость для достижения требуемого разрешения), то можно говорить, что нестабильность движения является высокой. Помимо того, что в данном случае процесс автофокусировки усложняется необходимостью подбора скорости для малого интервала когерентности (подапертуры), каждая из синтезированных подапертур не является частью общей сетки

(рис. 1): полученные фрагменты могут иметь произвольное смещение и масштаб. Из этого также вытекает то, что фактическая скорость летательного аппарата может не соответствовать скорости, подобранной в ходе автофокусировки и обеспечивающей наилучшее разрешение.

Большинство существующих алгоритмов автофокусировки [1], [2] позволяют подобрать параметры синтеза только для условий слабых траекторных нестабильностей. Часть описанных алгоритмов [3] позволяет уточнить имеющиеся навигационные данные (при этом высокоточные навигационные системы являются дорогостоящими и габаритными и даже при этом имеют свойство накопления интегральной ошибки второго порядка). Поэтому вопросы автофокусировки без навигационных данных по-прежнему являются открытыми и актуальным. В данной работе предложен подход к автофокусировке в условиях высоких траекторных нестабильностей без использования навигационных данных, а также предложены возможные методы реализации данного подхода.

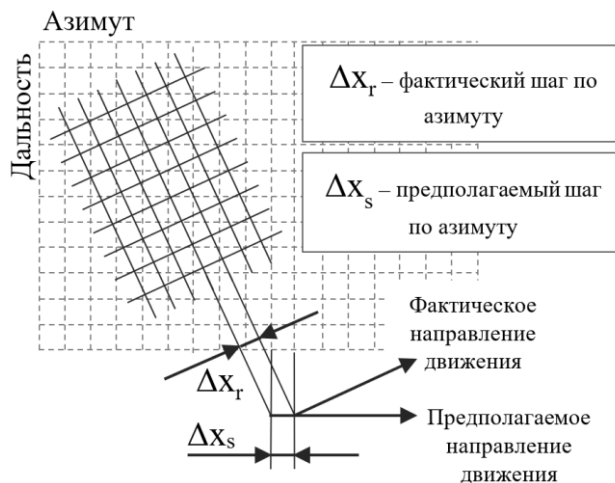


Рис. 1. Иллюстрация наличия случайного относительно коэффициента масштабирования РЛИ двух соседних фрагментов

II. ОПИСАНИЕ ПОДХОДА

A. Автофокусировка фрагмента

Как уже было сказано, в случае высокой нестабильности траектории полета время когерентности существенно меньше времени синтеза (или соответ-

вующие им интервал когерентности и длина синтеза), поэтому размер фрагмента, по которому производится синтез, также существенно меньше длины апертуры. Тем не менее любой фрагмент радиолокационной голограммы содержит информацию о всей зондируемой поверхности попадающей в луч диаграммы направленности (ДН). Таким образом размер синтезированного радиолокационного изображения имеет размер полной апертуры (за вычетом удвоенного размера фрагмента) (рис. 2), что позволяет использовать стандартные алгоритмы автофокусировки, основанные на подборе параметров синтеза (скорости, поворота ДН), при котором достигается экстремальное значение некоторого критерия качества. Подобными критериями могут быть энтропия [4]-[6], контрастность [7], четкость изображения [8], [9]. Проведенные эксперименты показали, что энтропия является наиболее надежным и стабильным критерием.

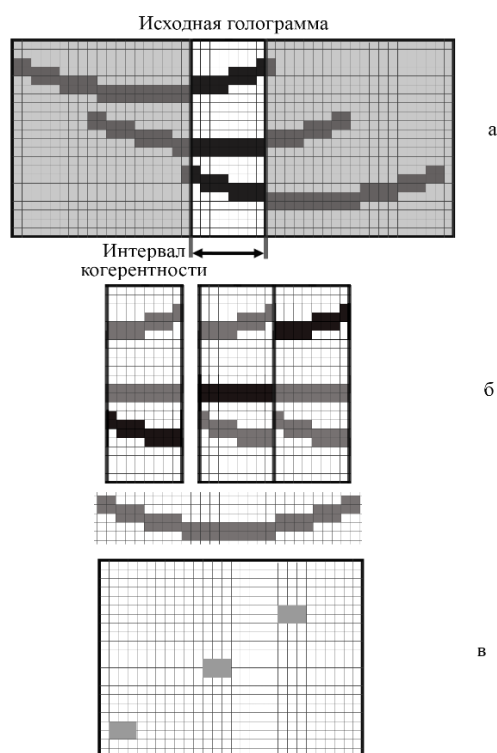


Рис. 2. Процесс синтеза изображения полной апертуры по фрагменту голограммы

- а) исходная радиоголограмма с треками трех целей
- б) изображение опорной функции и копий вырезанного фрагмента для трех положений максимальной корреляции с опорной функцией
- в) РЛИ с пиками яркости в точках максимальной корреляции (размер РЛИ превышает размер фрагмента)

Для нахождения энтропии вначале строится гистограмма полученного РЛИ. Так как изображения, полученные радиолокационными методами, имеют существенно более высокий динамический диапазон, чем оптические изображения, гистограмма РЛИ также имеет большее количество уровней, однако для обеспечения стабильности алгоритма выбор количества уровней не

должен существенно влиять на результат фокусировки. Рекомендуемое значение равно одной десятой части общего количества пикселей фокусируемого фрагмента РЛИ. Далее энтропия находится по формуле:

$$H = - \sum_{i=1}^N p_i \log p_i \quad (1)$$

где p_i – значение гистограммы для i -го уровня. Оптимальным значением скорости или поворота ДН является такое, при котором достигается минимум энтропии РЛИ.

Открытым вопросом остается априорное определение размера фрагмента голограммы, по которому проводится автофокусировка. Размер не может быть слишком большим, так как будет превышен интервал когерентности, в то же время слишком маленький фрагмент не обеспечивает необходимого разрешения и соответственно точности автофокусировки. Одним из методов может быть использование навигационных данных GPS или ГЛОНАСС, которые имеет значительно меньшую точность по сравнению с инерциальными системами, но имеют меньшую стоимость и габариты. По навигационным данным можно определить среднюю амплитуду и период флуктуаций, исходя из которых подобрать оптимальный интервал синтеза. В работе использовался итеративный подбор размера фрагмента: на каждой итерации проводилась автофокусировка фрагмента, после чего его размер сокращался в два раза. Таким образом находился размер фрагмента, для которого энтропия в результате автофокусировки получалась минимальной (предполагается, что таким образом размер фрагмента должен обеспечить наилучшее возможное разрешение). На рис. 3 представлен результат работы подобного метода поиска размера фрагмента. Слева изображен участок, содержащий 4 угольных отражателя, образующих вершины квадрата, синтезированный по фрагменту радиоголограммы большого размера, в результате чего изображение обладает высокой энергетикой, но малым разрешением, справа тот же участок, синтезированный по фрагменту голограммы оптимального размера, в результате чего изображение обладает наилучшим соотношением энергетики и разрешения.

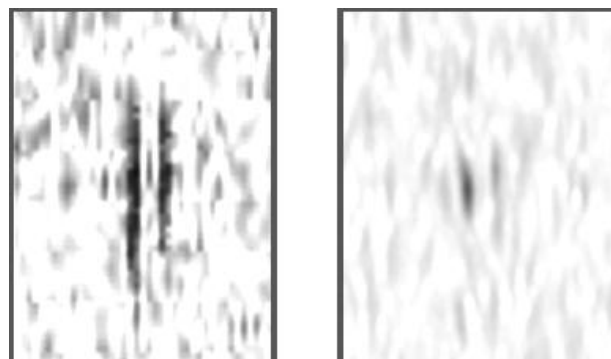


Рис. 3. Фокусированные инвертированные изображения, синтезированные по фрагментам разной длины

Стоит также отметить, что с целью упрощения всех последующих операций в эксперименте автофокуси-

ровка производилась только по параметру скорости летательного аппарата. Поворотом луча диаграммы направленности можно было пренебречь, так как ширина диаграммы значительно превышала требуемую для обеспечения заданного разрешения. Согласно навигационным данным поперечное смещение за интервал одного фрагмента превышало размер элемента разрешения на некоторых участках голограммы. Тем не менее, даже с учетом пренебрежения этим параметром удалось получить требуемое разрешение на РЛИ.

В. Подбор масштаба и смещения

Изначально предполагалось, что для совмещения изображений, полученных для двух соседних фрагментов, достаточно знать скорости, полученные при автофокусировке. Таким образом, зная моменты излучения импульсов возможно определить координаты любой полученной точки на РЛИ. Однако за счет вторичных движений (изменения скорости внутри фрагмента, поворота носителя, поперечного смещения) полученная скорость является лишь неким параметром, не соответствующая при этом фактической скорости полета. Это означает, что два изображения могут иметь случайный (в рамках имеющейся информации) масштаб и относительное смещение. В данной работе эти параметры определяются по критерию максимальной корреляции по следующему алгоритму:

- 1) Задаются минимальный и максимальный масштаб и количество точек для определения корреляции;
- 2) Для каждой точки:

 - 3) Производится масштабирование одного из амплитудных изображений, второе считается референсным;
 - 4) Из каждого элемента (пикселя) амплитудного изображения вычитается среднее арифметическое всего изображения;
 - 5) Производятся построчные преобразования Фурье референсного изображения и отмасштабированного;
 - 6) Производится перемножение двух массивов и обратное преобразование Фурье результата перемножения (быстрая свертка);
 - 7) Находится поэлементная сумма строк полученного массива;
 - 8) Находится максимум полученного вектора, это значение является коэффициентом корреляции;
 - 9) Искомым масштабом является тот, при котором достигнут максимум коэффициента корреляции, а искомым смещением является значение индекса, при котором достигается максимум;
 - 10) В случае необходимости производится дополнительная итерация поиска в новом сокращенном диапазоне. Максимальная абсолютная разница между двумя коэффициентами масштабирования является обратным значением к размеру изображения по оси масштабирования.

Эксперименты показали, что диапазон определения относительного масштаба (п. 1) лежит от 0,5 до 2. В случае необходимости данный диапазон может быть автоматически расширен, например, при определении,

что наилучший масштаб является одной из крайних точек. В среднем достаточно 10 точек на один диапазон для предотвращения попадания в ложный локальный максимум.

Вычитание среднего арифметического (п. 4) производится для предотвращения накопления больших положительных значений в результате свертки, которые в результате могут оказаться выше фактического коэффициента корреляции (так как изображение является амплитудным).

В случае более существенных флуктуаций, например, как описывалось ранее, в случае смещения летательного аппарата между фрагментами на величину, превышающую размер элемента разрешения по дальности, может понадобиться использовать двумерное преобразование Фурье (п. 5) для нахождения смещения по обеим координатам. Это может существенно повысить точность совмещения и соответственно разрешение итогового РЛИ.

Также в случае наличия движений более высокого порядка масштаб и смещение могут быть неодинаковыми для разных дальностей. Подобная ситуация вынуждает также дополнительно разбивать голограмму на фрагменты по дальностной координате.

Пример полученных в ходе экспериментов корреляционных характеристик приведен на рис. 4.

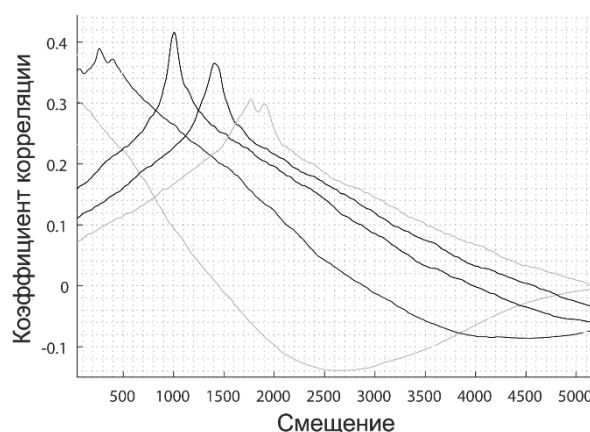


Рис. 4. Корреляционные характеристики для различных коэффициентов масштабирования

Как видно из рис. 4 каждая из полученных характеристик имеет ярко выраженный максимум, при этом характеристика, соответствующая истинному масштабу, имеет наиболее узкий и наивысший по значению пик. Максимально возможный коэффициент корреляции равен единице, однако на практике данное значение чаще всего не превышает 0,6.

С. Компенсация фазы

С проблемой несовпадения координатных сеток для изображений двух соседних фрагментов также связана задача компенсации относительного фазового набега. Фактически фазовый набег является субпиксельным смещением между двумя синтезированными фрагментами РЛИ, которое невозможно определить на

предыдущем этапе по амплитудному РЛИ. Некомпенсированная фаза приводит к появлению интерференционных артефактов на РЛИ (ухудшению разрешения, появлению ложных максимум (рис. 5)).

Комплексное РЛИ (R), полученное в результате суммирования изображений (R_1 и R_2), полученных на предыдущем этапе (с учетом выполненной компенсации масштаба и смещения), записывается следующим образом:

$$R = R_1 + R_2 e^{j\varphi} \quad (2)$$

Одним из возможных способов определения значения фазы φ является прямой перебор. В среднем достаточно обеспечить точность не хуже, чем $\pi / 8$. Дальнейшее улучшение точности определения фазы не приводит к улучшению качества РЛИ.

По аналогии с критерием подбора скорости при автофокусировке минимум энтропии может выступать в качестве критерия и при подборе фазового сдвига.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ

Результат компенсации фазы и соответственно работы всего метода автофокусировки для представленного ранее изображения четырех уголковых отражателей приведен на рис. 5.

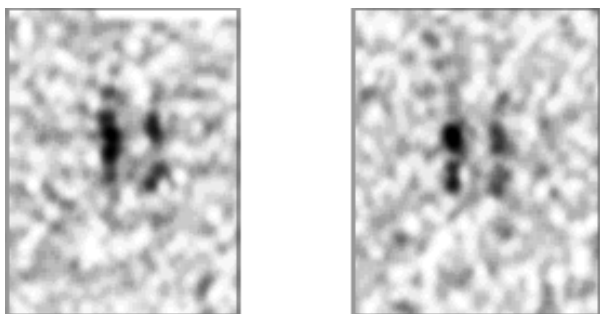


Рис. 5. Результат работы алгоритма, слева – до компенсации фазы, справа – после компенсации

По изображению, полученному до компенсации фазы видно, что уголковые отражатели в левой части рисунка слиплись и воспринимаются как одна цель, при этом расстояние между отражателями в правой части рисунка наоборот увеличилось, хотя обе пары отражателей были поставлены на расстоянии одного элемента разрешения, что в свою очередь наблюдается на изображении, полученном после компенсации фазы.

IV. ВЫВОДЫ

В работе был описан метод построения радиолокационного изображения в условиях значительной нестабильности траектории съемки. Известные алгоритмы были применены для фокусирования каждого фрагмента, соответствующего интервалу когерентности. После, используя метод подапертурного синтеза, была получена серия изображений, для совмещения которых был применен нестандартный для задач синтез метод корреляционного совмещения изображений, предложен способ нахождения относительного мас-

штаба и смещения двух изображений для их «бесшовного» наложения. Для подавления интерференционных артефактов, вызванных несовпадением фаз комплексного сигнала суммируемых изображений применен метод подбора фазы по критерию минимума энтропии или другого критерия качества РЛИ (контрастность, четкость).

Метод был проверен на практике на реальной голограмме. В первую очередь проверка показала возможность извлечения данных РЛИ из голограммы без использования навигационных данных (возможно использование данных низкоточных систем для получения априорной информации об уровне флуктуаций и для выбора размера фрагмента когерентности). Подапертурный синтез показал приемлемый уровень отношения сигнал-шум для нахождения энтропии радиолокационного изображения и соответственно возможность фокусировки изображения по фрагменту голограммы значительно меньшему, чем длина апертуры. Метод корреляционного совмещения показал, что корреляционная характеристика двух изображений имеет выраженный пик, по которому можно определять относительное смещение изображений, а его величина может служить критерием для подбора масштаба.

Данное изображение имеет значительно лучшее разрешение, чем полученное при автофокусировке стандартными методами по большому фрагменту, а также при использовании высокоточных навигационных данных по алгоритму обратного проецирования [10]. Для него улучшение разрешения составило, соответственно, около 7 раз по сравнению со стандартными алгоритмами автофокусировки и около 4 раз по сравнению с использованием навигационных данных.

V. ВЫЯВЛЕННЫЕ НЕДОСТАТКИ И ПУТИ РЕШЕНИЯ

Важным недостатком описанного метода является высокая вычислительная нагрузка для применения его на сигнальных процессорах, программируемых логических интегральных схемах либо на специализированных микросхемах в реальном времени.

Для сокращения времени синтеза можно выделить на всем фрагменте некоторый характерный участок, например, это может быть участок с наивысшей энергией или контрастностью. Так как параметры автофокусировки должны сохраняться для всего фрагмента, возможно на каждой итерации пересинтезировать лишь небольшой участок исходной голограммы. Таким образом можно уменьшить время выполнения автофокусировки фрагмента пропорционально размеру выбранного фрагмента.

Процесс корреляционного совмещения также можно ускорить. Одним из возможных методов может быть исключение из проверки большого числа точек (масштаб) и проверка лишь наиболее правдоподобных значений. Наиболее простой способ найти эти значения — это разбить изображения на половины. В случае совпадения масштаба обе половины будут иметь одинаковое смещение, в противном случае смещение одного из изображений будет пропорционально масшта-

бу больше. Другим возможным вариантом, по аналогии с предыдущим пунктом, может быть определение масштаба по характерным точкам.

Также можно повысить точность автофокусировки. В данной работе желаемый результат был достигнут: удалось отделить друг от друга изображения угловых отражателей, находящихся на расстоянии элемента разрешения. Однако в случае более существенных флуктуаций необходимо добавить автофокусировку по углу поворота антенны, а при совмещении фрагментов также определять масштаб и смещение по координате дальности.

ПОДДЕРЖКА

Данная работа проводится при финансовой поддержке Министерства Образования и Науки Российской Федерации в рамках Соглашения №14.578.21.0248 о предоставлении субсидии, идентификационный номер соглашения RFMEFI57817X0248.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] A. Azouz and Z. Li, "Improved phase gradient autofocus algorithm based on segments of variable lengths and minimum entropy phase correction," 2014 IEEE China Summit & International Conference on Signal and Information Processing (ChinaSIP), Xi'an, 2014, pp. 194-198. doi: 10.1109/ChinaSIP.2014.6889230
- [2] M. Restano, R. Seu and G. Picardi, "A Phase-Gradient-Autofocus Algorithm for the Recovery of MARSIS Subsurface Data," in IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 13, no. 6, pp. 806-810, June 2016. doi: 10.1109/LGRS.2016.2546315
- [3] A. Azouz and Z. Li, "Motion compensation for high-resolution automobile-SAR," 2014 IEEE China Summit & International Conference on Signal and Information Processing (ChinaSIP), Xi'an, 2014, pp. 203-207. doi: 10.1109/ChinaSIP.2014.6889232
- [4] T. Zeng, R. Wang and F. Li, "SAR Image Autofocus Utilizing Minimum-Entropy Criterion," in IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 10, no. 6, pp. 1552-1556, Nov. 2013. doi: 10.1109/LGRS.2013.2261975
- [5] Genyuan Wang and Zheng Bao, "The minimum entropy criterion of range alignment in ISAR motion compensation," Radar 97 (Conf. Publ. No. 449), Edinburgh, 1997, pp. 236-239. doi: 10.1049/cp:19971669
- [6] J. M. Kantor, "Minimum entropy autofocus correction of residual range cell migration," 2017 IEEE Radar Conference (RadarConf), Seattle, WA, 2017, pp. 0011-0016. doi: 10.1109/RADAR.2017.7944162
- [7] M. Martorella, F. Berizzi and B. Haywood, "Contrast maximisation based technique for 2-D ISAR autofocusing," in IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation, vol. 152, no. 4, pp. 253-262, 5 Aug. 2005. doi: 10.1049/ip-rsn:20045123
- [8] R. L. Morrison, M. N. Do and D. C. Munson, "SAR Image Autofocus By Sharpness Optimization: A Theoretical Study," in IEEE Transactions on Image Processing, vol. 16, no. 9, pp. 2309-2321, Sept. 2007. doi: 10.1109/TIP.2007.903252
- [9] T. J. Schulz, "Optimal Sharpness Function for SAR Autofocus," in IEEE Signal Processing Letters, vol. 14, no. 1, pp. 27-30, Jan. 2007. doi: 10.1109/LSP.2006.881525
- [10] W. Tan, D. Li and W. Hong, "Airborne Spotlight SAR Imaging with Super High Resolution based on Back-Projection and Autofocus Algorithm," IGARSS 2008 - 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Boston, MA, 2008, pp. IV - 1300-IV - 1303. doi:10.1109/IGARSS.2008.4779969

Radar Image Autofocus in Conditions of High Vehicle Motion Instability

I.A. Kuzmin, K.S. Lyalin, Y.M. Meleshin, M.S. Khasanov

National Research University of Electronic Technology Moscow, Russian Federation, ksl@miee.ru

Abstract — In the case of obtaining radar image in the conditions of high motion instability, it's impossible to define the synthesis parameters since they are changing during the aperture span. In real systems (mostly airborne SAR) the position of the vehicle is described by some curve. If the coherence span (for required resolution) is more than the aperture length, then instability of the motion can be considered as insignificant and it's enough to find just the velocity for each coherence span to synthesize the image. If the span is less than aperture length, then the instability is considered as notable. In this case the autofocus process becomes more complicated by the necessity of selection the right velocity for each small coherence span and also each synthesized image is not a part of the global grid: each fragment may have random scale and relative offset. In this paper an approach to autofocus in the high motion instability conditions without using navigation data is proposed.

As it has been said the fragment to autofocus size is much less than aperture length, nevertheless each fragment contains the information almost about the whole aperture (the area being in the radiation pattern beam). This allows using the conventional autofocus algorithms, based on numerical optimization of synthesis parameters (velocity, radiation pattern angle offset) by some image quality criterion: entropy, contrast or sharpness.

Initially it was assumed that for obtaining the whole image it would be enough to know the velocities and the fragments sizes (to sum them up with corresponding scales and offsets). It turned out that the secondary motions (velocity fluctuation over a duration of one fragment, lateral motions) produce discrepancy between the real average velocity and that found as a result of the autofocus. This means that two neighbor images may have random scale and offset. In the work the

maximum correlation criterion was used to find these parameters. The scale is found by the sequential search with the search range decreasing at each iteration. The proper scale is considered that providing the best correlation maximum, the proper offset is the argument index of the maximum.

The grid mismatch problem is also connected with the necessity of inter-fragment phase compensation. Skipping this stage produces artifacts and distortions in the final image (resolution degradation, false peaks appearance). The compensation is solved by the sequential search by minimum entropy criterion.

The method was tested and approved on the real radar data. The possibility of performing the autofocus in the case of absence of navigation data even in the presence of high vehicle fluctuations and trajectory deviation has been shown. The obtained image azimuth resolution is at least 7 times better than the same obtained by the conventional autofocus algorithms and at least 4 times better than in the case of using high-precision navigation data.

Keywords — synthetic aperture, autofocus, sub aperture synthesis, movement instability, correlation processing.

REFERENCES

- [1] A. Azouz and Z. Li, "Improved phase gradient autofocus algorithm based on segments of variable lengths and minimum entropy phase correction," 2014 IEEE China Summit & International Conference on Signal and Information Processing (ChinaSIP), Xi'an, 2014, pp. 194-198. doi: 10.1109/ChinaSIP.2014.6889230
- [2] M. Restano, R. Seu and G. Picardi, "A Phase-Gradient-Autofocus Algorithm for the Recovery of MARSIS Subsurface Data," in IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 13, no. 6, pp. 806-810, June 2016. doi: 10.1109/LGRS.2016.2546315
- [3] A. Azouz and Z. Li, "Motion compensation for high-resolution automobile-SAR," 2014 IEEE China Summit & International Conference on Signal and Information Processing (ChinaSIP), Xi'an, 2014, pp. 203-207. doi: 10.1109/ChinaSIP.2014.6889232
- [4] T. Zeng, R. Wang and F. Li, "SAR Image Autofocus Utilizing Minimum-Entropy Criterion," in IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 10, no. 6, pp. 1552-1556, Nov. 2013. doi: 10.1109/LGRS.2013.2261975
- [5] Genyuan Wang and Zheng Bao, "The minimum entropy criterion of range alignment in ISAR motion compensation," Radar 97 (Conf. Publ. No. 449), Edinburgh, 1997, pp. 236-239. doi: 10.1049/cp:19971669
- [6] J. M. Kantor, "Minimum entropy autofocus correction of residual range cell migration," 2017 IEEE Radar Conference (RadarConf), Seattle, WA, 2017, pp. 0011-0016. doi: 10.1109/RADAR.2017.7944162
- [7] M. Martorella, F. Berizzi and B. Haywood, "Contrast maximisation based technique for 2-D ISAR autofocusing," in IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation, vol. 152, no. 4, pp. 253-262, 5 Aug. 2005. doi: 10.1049/ip-rsn:20045123
- [8] R. L. Morrison, M. N. Do and D. C. Munson, "SAR Image Autofocus By Sharpness Optimization: A Theoretical Study," in IEEE Transactions on Image Processing, vol. 16, no. 9, pp. 2309-2321, Sept. 2007. doi: 10.1109/TIP.2007.903252
- [9] T. J. Schulz, "Optimal Sharpness Function for SAR Autofocus," in IEEE Signal Processing Letters, vol. 14, no. 1, pp. 27-30, Jan. 2007. doi: 10.1109/LSP.2006.881525
- [10] W. Tan, D. Li and W. Hong, "Airborne Spotlight SAR Imaging with Super High Resolution based on Back-Projection and Autofocus Algorithm," IGARSS 2008 - 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Boston, MA, 2008, pp. IV - 1300-IV - 1303. doi:10.1109/IGARSS.2008.4779969