

УДК 621.396.962: 528.8

Особенности формирования РЛИ в детальных непрерывных режимах съёмки**РСА космического аппарата «Кондор-Э»****Цветков Олег Евгеньевич**

доктор технических наук, старший научный сотрудник ЗАО «АЭРОКОН».

E-mail: al.vetckov@yandex.ru.

Адрес: 140180, г. Жуковский, Московская область, ул. Жуковского, д.1.

Аннотация: В работе рассматриваются вопросы синтеза детальных радиолокационных изображений (РЛИ) в радиолокаторах с синтезированием апертуры антенны (РСА). Отмечается, что процесс когерентного накопления сигнала в РСА неизбежно сопровождается дестабилизирующими факторами, затрудняющими формирование изображений. К таким нежелательным факторам относятся потери строк дальности при регистрации радиоголограммы, внешние узкополосные помехи, амплитудные и фазовые искажения тракта формирования и приёма сигналов, джиттер отсчётов при аналого-цифровом преобразовании, неточность установки луча антенны по линии траверза, миграции сигналов по каналам дальности при цифровой обработке сигналов. Эти воздействия на процесс регистрации и обработки (фокусировки) сигнала проявляются в виде дополнительных артефактов на радиолокационных изображениях и расфокусировке изображения, как по дальности, так и по азимутальной координате. В данной статье предлагается использовать комплекс мер при обработке траекторного сигнала: интерполяция пропущенных строк, режекция интенсивных узкополосных помех, компенсация джиттера и амплитудно-фазовых искажений, оценивание частоты доплеровского центроида (угла скоса луча антенны). Разработанный комплекс мер позволяет реализовать потенциальные возможности используемых сигналов при обработке радиоголограммы и обеспечивает синтез РЛИ с высокими качеством и детальностью.

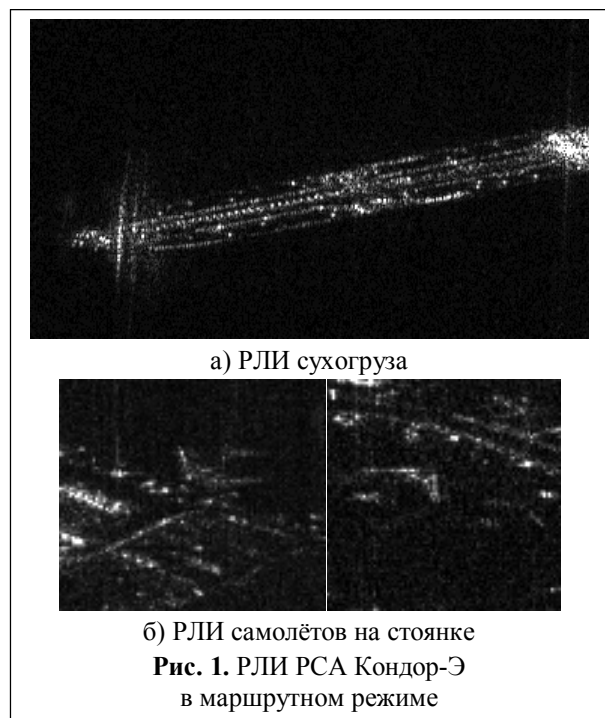
Ключевые слова: радиолокатор с синтезированием апертуры, радиолокационное изображение, радиоголограмма, доплеровский центроид, джиттер, амплитудно-фазовые искажения.

Детальный непрерывный режим (ДНР) представляет собой боковой обзор (БО), при котором ось диаграммы направленности антенны (ДНА) ориентирована перпендикулярно вектору земной скорости относительно центра кадра на поверхности Земли. След ДНА синхронно с полётом носителя перемещается по земной поверхности, при этом сканирование луча ДНА не проводится. Геометрический размер радиолокационного изображения (РЛИ) по наклонной дальности определяются шириной ДНА в вертикальной плоскости ($\approx 1^\circ$), стробом приёма и составляет 10...15 км и более, а «путевая» протяжённость определяется длительностью сеанса съёмки (десятки – сотни километров) [1].

Пространственное разрешение составляет три метра (и лучше). Требуемый интервал когерентного накопления (интервал синтеза – ИС) составляет 1...1,5 сек. Зондирующий импульс с линейной частотной модуляцией и шириной спектра 200 МГц обеспечивает первичное разрешение по наклонной дальности

0,75 метра. Маршрутный режим съёмки не является самым детальным для РСА «Кондор-Э», тем не менее, детальность изображений в ДНР позволяет проводить уверенное распознавание большинства объектов – см. рис. 1. Отметим, что все РЛИ и радиоголограммы приводятся в координатах «дальность-горизонталь, азимут-вертикаль».

С теоретической точки зрения особый интерес представляет процесс обработки сигнала-голограммы РСА: сжатие по дальности и фокусировка по путевому времени [2–4]. Наличие миграции сигнала по каналам дальности (до 80...90 дискретов дальности) предполагает анализ РСА как широкополосной в пространственно-временном смысле системы [5, 6]: для сжатия по путевой координате требуется двумерная обработка. Однако доступные сигналы-голограммы ещё до обработки (до синтеза РЛИ) требуют коррекции искажений и ошибок целостности данных.



Основные искажения и ошибки в первичной матрице-голограмме следующие:

- потеря строк сигнала по дальности;
- высокий уровень в строках сигнала внешних источников излучения;
- джиттер АЦП;
- неизвестный доплеровский сдвиг, обусловленный ошибками ориентации и установки луча ДНА.

Кроме того, непосредственно для расчёта опорных фокусирующих сигналов требуется точная оценка путевой эквивалентной (называемой приведённой) скорости носителя, а также фазочастотные корректирующие массивы при сжатии по дальности. Рассмотрим далее подробнее особенности и основные подходы к устранению искажений и потерь сигнала голограммы.

Потеря строк данных дальности нарушает фазовую структуру сигнала по путевой координате. Хотя интенсивность потерь не велика (единицы – десятки строк на 10...30 тыс.), искажения в результирующем РЛИ существенные: наблюдаются многократные повторения откликов по азимуту, дешифрирование изображений существенно затрудняется. Основным параметром, определяющим целостность сиг-

нала по путевому времени, является номер строки. В редких случаях возможно искажение и номера строки. Тогда требуется дополнительная верификация текущего считанного номера строки данных строка РЛС. Недостающие строки следует заменять в простейшем случае нулевыми или интерполировать.

Искажения данных, обусловленные внешними источниками излучения (достаточно, впрочем, редкие), могут наблюдаться при съёмке районов с интенсивной урбанизацией. Пример голограммы при высокой интенсивности внешнего излучения представлен на рис. 2. На рис. 3 приведён спектр строки с внешним «квазигармоническим» сигналом. Несложный анализ такого спектра позволяет идентифицировать строку дальности как искажённую.

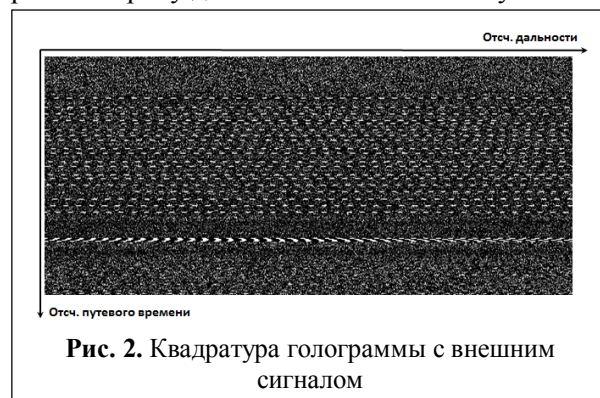


Рис. 2. Квадратура голограммы с внешним сигналом

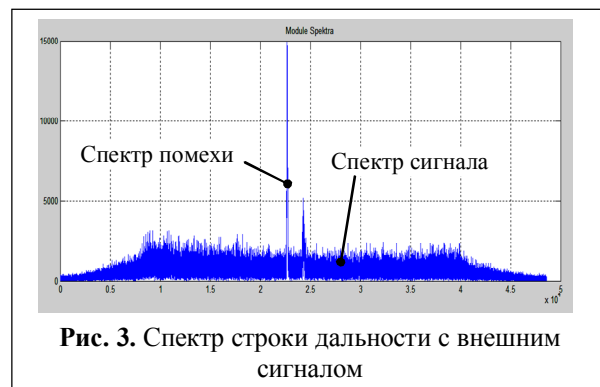


Рис. 3. Спектр строки дальности с внешним сигналом

Периодический джиттер АЦП приводит к «размножению» радиоярких откликов по дальности. Его коррекция проводится интерполяцией отсчётов первичного сигнала. Период и интерполяционные коэффициенты оценены по бортовым пилот-сигналам. Коррекция дрожания отсчётов АЦП на временной шкале оказалась неожиданной, но интересной инженерной

задачей. Примеры РЛИ без компенсации (а) и с компенсацией (б) джиттера иллюстрируются рис. 4. Нетрудно заметить, что компенсация джиттера позволила убрать на РЛИ ложные периодические повторы центральной блестящей точки.

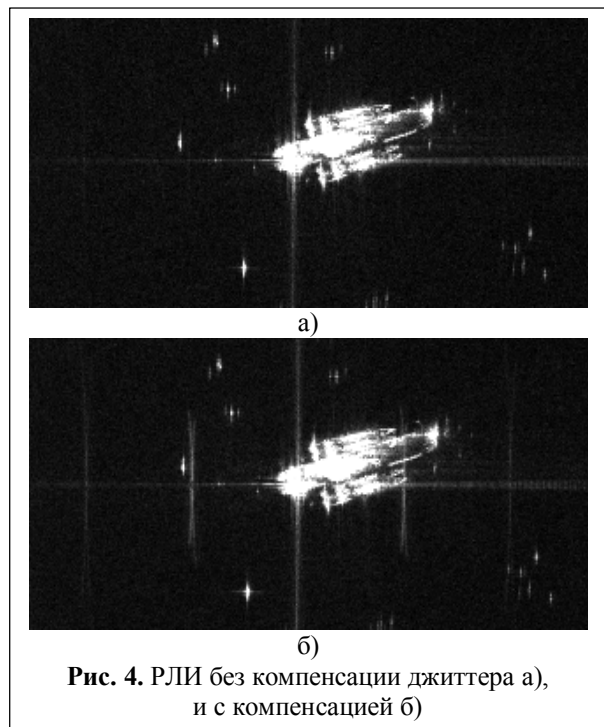


Рис. 4. РЛИ без компенсации джиттера а), и с компенсацией б)

Перейдём к оценке доплеровского сдвига частоты, возникающего из-за скоса оси ДНА. Адаптивная оценка неизвестного доплеровского сдвига достаточно типична для РСА космического базирования [3]. К настоящему времени разработаны эффективные алгоритмы измерения неизвестной центральной доплеровской частоты $f_{d0} = \frac{2V \cdot \cos \alpha}{\lambda} = \frac{2V_r}{\lambda}$, где V_r – радиальная скорость носителя, α – угол отворота луча ДНА относительно вектора земной скорости \vec{V} . К таким алгоритмам, в первую очередь, относятся алгоритмы на основе оценивания моментов среднего азимутального спектра и алгоритмы на базе оценки приращения фазы принятого сигнала между зондированиями.

Достаточно простой способ оценки средней доплеровской частоты заключается в определении энергетического центра спектра принятого сигнала. Оценка формы модуля спек-

тральной функции $S(f) = S_0(f - f_{d0})$ представляет собой усреднённый по каналам дальности модуль результата дискретного преобразования Фурье. Положение максимума или энергетического центра определяет доплеровскую среднюю частоту, однако при этом следует учитывать циклический характер получаемых спектральных оценок.

Определить среднюю доплеровскую частоту можно по оценке изменения фазы между соседними периодами принятого сигнала. Среднее приращение фазы сигнала-голограммы между зондированиями будет определяться линейным членом

$$\Delta\phi = \phi(k+1) - \phi(k) \approx 2\pi \cdot f_{d0} \cdot T_p$$

(T_p – период повторения импульсов), откуда следует оценка частоты Доплера

$$\hat{f}_{d0} = F_p \cdot \Delta\hat{\phi} / 2\pi, \quad F_p = 1/T_p.$$

Рассмотренные способы оценивания обеспечивают непосредственное измерение частоты Доплера по принятому сигналу РЛС. Оценка скорости носителя при этом не требуется. Оба метода имеют одинаковую точность оценки частоты. Среднеквадратическая ошибка δ_f оценивания частоты при лоцировании точечного объекта определяется длительностью ИС T_c и отношением сигнал-шум q : $\delta_f = 1/(T_c \sqrt{q})$. Обычно параметр q в РСА больше единицы, временной ИС составляет доли – единицы секунд, поэтому потенциальная точность оценки доплеровской частоты составляет доли – единицы Герц.

Здесь нужно иметь в виду особенность метода средних приращений фазы, связанную с зависимостью оценки от наблюдаемой функции отражения земной поверхности. Пример реализации оценки средних приращений фазы за весь интервал маршрутной съёмки иллюстрируется на рис. 5. Ниже, на рис. 6, приведены РЛИ без учёта а) и с учётом б) доплеровского сдвига, который вычисляется адаптивно. На РЛИ наблюдается смещение объектов по путевой координате и появление специфично-

го шума дискретизации. Нестационарный характер кадра местности приводит к динамичному изменению оценки $\Delta\hat{\phi}$ приращений фазы, хотя азимутальный скос луча ДНА постоянный. Потому в качестве измеренного значения следует брать среднее $\Delta\phi$ за весь интервал съёмки или медианную оценку.

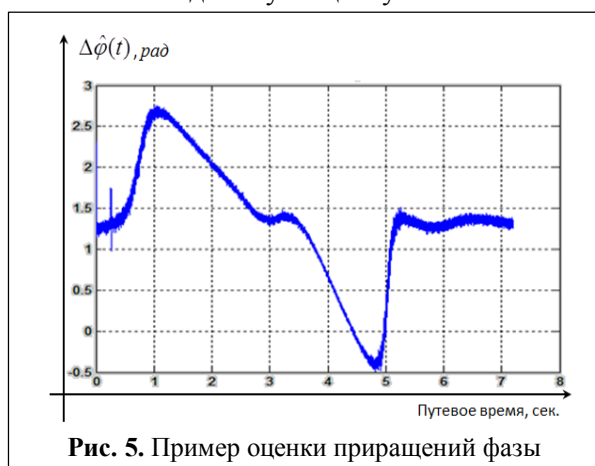


Рис. 5. Пример оценки приращений фазы

Отметим, что особенностью сигнала с миграцией по каналам дальности является своеобразное проявление азимутального шума дискретизации. Без компенсации существенно

го азимутального скоса антенны наблюдаются не просто двоения на РЛИ, а размазанные «наплывы» от ярких целей. На сюжете ошибочно присутствуют «облака» – см. рис. 7.

В процессе наземных испытаний был разработан и отлажен метод однозначной оценки доплеровской частоты при миграции сигнала [7], что позволило уменьшить ошибку оценки отворота антенны до сотых долей градуса.

Наиболее сложная процедура первичного синтеза РЛИ – фокусировка (сжатие по путевой координате). В отличие от «узкополосных» РСА требуется учёт миграции сигнала по каналам дальности. Известный способ коррекции миграции путём «выпрямления» азимутального спектра (RDA) имеет ограничения при высокой скорости миграции [2]. Поэтому фильтр сжатия реализован двумерной быстрой свёрткой с последующей «дофокусировкой» по каналам дальности. В основе такого синтеза («Омега-Ка» алгоритм) лежит перемножение двумерных спектров голограммы (предварительно откорректированной) и опорного дву-

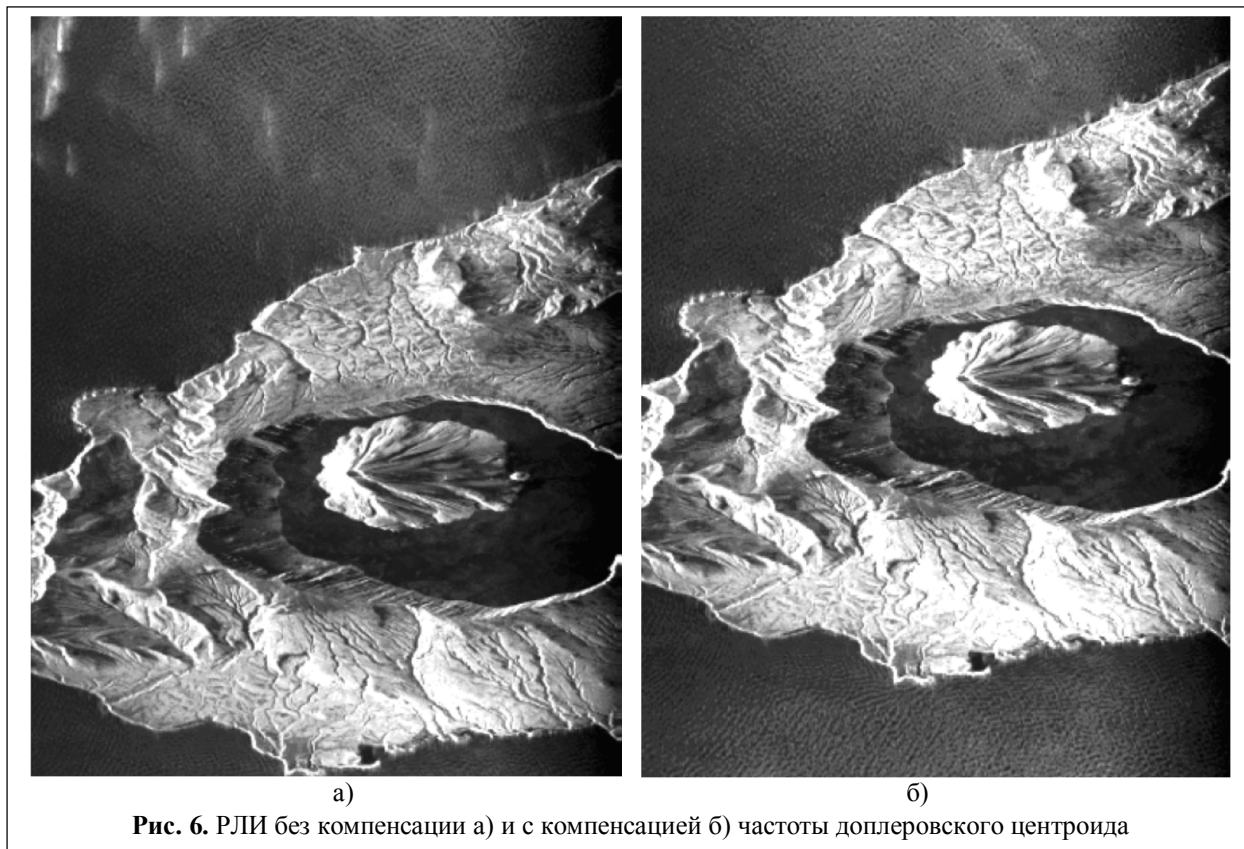


Рис. 6. РЛИ без компенсации а) и с компенсацией б) частоты доплеровского центра

мерного спектра. Опорный спектр – комплексно сопряжённое двумерное преобразование Фурье зеркального отображения сигнала одиночного точечного отражателя в радиоголограмме [1]. В плоскости визирования (дальность r – путевая координата x) сигнал отражателя:

$$\dot{s}(r, x) = \dot{U}(r - r(x)) \cdot G(x) \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} r(x)\right), \quad (1)$$

где $\dot{U}(r)$ – комплексная огибающая излучаемого импульса; λ – длина волны излучения; $r(x)$ – закон изменения дальности на ИС. Изменение положения функции $\dot{U}(r)$ в (1) по дальности обусловлено изменением расстояния в зависимости от азимутальной координаты x : $r - r(x)$. Функция $r(x)$ в простейшем случае бокового обзора аппроксимируется параболой:

$$r(x) = r_0 + \frac{x^2}{2r_0} \quad (2)$$

(такая аппроксимация достаточна для ИС 1...1,5 сек).

Здесь следует учитывать особенность представления путевой координаты $x = V_s \cdot t$, где V_s – эквивалентная (приведённая) скорость носителя, определяемая земной скоростью и

радиальным ускорением носителя; r_0 – наклонная дальность в центре ИС. При скосе ДНА и доплеровском сдвиге частоты в (2) следует добавлять линейный член.

Аппроксимация в виде выражения (2) (аналог прямолинейного движения) предполагает описание динамики изменения дальности через эквивалентную путевую скорость и наклонную дальность. Такой подход позволяет применять быстрые вычислительные алгоритмы, в результате формируется весь кадр изображения. Также нужно учитывать, что, строго говоря, в пределах ширины кадра по наклонной дальности V_s меняется, но при режиме ДНР незначительно для качества фокусировки. Допустимая ошибка оценки V_s составляет примерно 1 м/с. Вместе с тем, адаптивное измерение параметра V_s [2–4] по принятому сигналу представляет собой относительно несложную задачу «автофокусировки» в практике современных РСА.

Алгоритм фокусировки практически эквивалентен методу обработки без миграции, при реализации которого выполняются следующие операции:

- 1) Двумерное БПФ голограммы: $\dot{\Theta}(f_r, f_x)$;
- 2) Умножение $\dot{\Theta}(f_r, f_x)$ на опорный спектр



а) б)
Рис. 7. РЛИ с учётом а) и без учёта б) скоса антенны

для центральной точки (дальности r_0) $\dot{S}(f_r, f_x)$ (преобразование Фурье от (1) с комплексным сопряжением);

3) ОБПФ по дальности результата перемножения: $F_r^{-1}\{\dot{S}(f_r, f_x) \times \dot{\Theta}(f_r, f_x)\}$;

3а) Эквализация кривых дальности в частотной области (если требуется);

4) Компенсация расфокусировки путевых спектров строк из-за расстройки по дальности Δr (фактически умножение азимутальных спектров строк на комплексную функцию);

5) Обратное БПФ по азимуту;

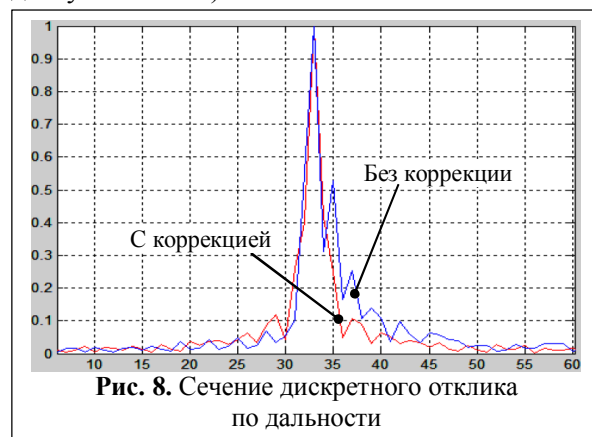
6) Вычисление модуля.

Основа цифровых вычислений в таком алгоритме – последовательное выполнение одноподобных одномерных операций над комплексными векторами данных: БПФ, комплексное перемножение. В целом алгоритм формирования РЛИ достаточно эффективно может быть реализован распараллеленными в ЭВМ операциями, что обеспечивает высокую скорость обработки на современных вычислительных средствах (кадр 10×10 км – менее минуты).

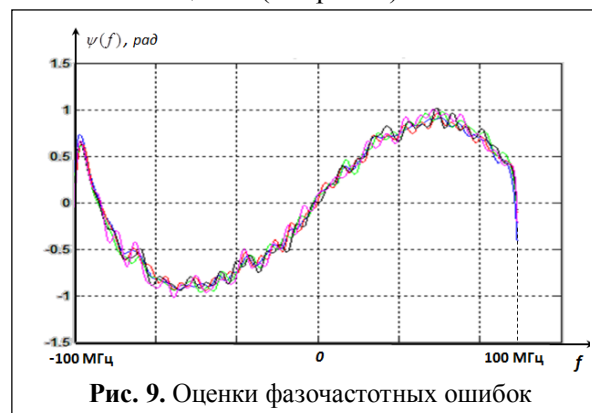
Перед пунктом 4 дополнительно уточняется «фокусирующее» приращение скорости ΔV_3 по небольшой группе строк центра кадра (для сокращения вычислений) на основе критерия минимума энтропии [2, 4].

И, наконец, надо иметь в виду, что фазочастотные ошибки спектра зондирующего импульса (как и амплитудночастотные) приводят к искажению РЛИ по дальности [1]. В частности, наблюдается высокий уровень бокового лепестка импульсного отклика (см. рис. 8). Однако известно, что любая линейная система полностью описывается, импульсной характеристикой (ИХ – отклик на точечную цель в РЛИ). В данном случае в качестве реакции можно рассматривать, приближённо, фрагмент комплексной строки РЛИ по дальности с откликом от одиночного точечного отражателя

на фоне слабоотражающей поверхности. В качестве оценки ИХ можно использовать строку изображения яркой точечной цели, например, мощного уголкового отражателя полигонной миры (или другие «точечные» отражатели в доступном РЛИ).



Фазочастотные искажения $\psi(f)$ всего тракта определяются как аргумент преобразования Фурье фрагмента отклика по дальности. Усреднение по нескольким откликам повышает точность оценки (см. рис. 9).



Вычисленная указанным способом функция ошибки фазы $\hat{\psi}(f)$ учитывается (с противоположным знаком) в опорном спектре при сжатии по дальности. Таким образом, в РЛИ практически полностью устраняются наблюдаемые искажения. Примеры РЛИ, сформированных в ДНР с учётом предложенной технологии коррекции искажений, представлены на рис. 10 и 11.

По рис.10, 11 можно судить о возможностях ДНР в отношении общего обзора и распозна-

вания объектов. Несмотря на разные ракурсы при съёмке, РЛИ и фотоснимок хорошо допол-



а) РЛИ



б) фотоснимок

Рис. 10. РЛИ а) и фотоснимок б) ГЭС Гранд Кули, р. Колумбия, шт. Вашингтон, США

няют друг друга. Так, в частности, на РЛИ ГЭС Гранд Кули имеются изображения объектов (например, строения), которые выглядят более

рельефно, чем на фотоснимке. Вместе с тем, тяжёлые самолёты, хорошо видны на РЛИ аэродрома авиабазы Майнот, и с трудом распо-



а) РЛИ



б) фотоснимок

Рис. 11. РЛИ (а) и фотоснимок (б), Авиабаза Майнот, шт. Северная Дакота, США

знаваемые лёгкие самолёты в центре снимка позволяют определить границы возможностей ДНР.

Подводя итог, можно сказать следующее. В результате учёта множества реальных факторов в ходе процессов формирования, излучения и регистрации сигналов РЛС с синтезированием апертуры антенны РСА КА «Кондор-Э» удалось полностью оценить и компенсировать наблюдаемые искажения. В итоге формируемые РЛИ в наземном комплексе синтеза и обработки полностью соответствуют заданным характеристикам.

Литература

1. Бабокин М.И., Ефимов А.В., Зайцев С.Э., Карпов О.А., Костров В.В., Неронский Л.Б., Савосин Г.В., Титов М.П., Толстов Е.Ф., Турук В.Э., Цветков О.Е. Итоги и уроки лётных испытаний РСА малого космического аппарата «Кондор-Э» // VI Всероссийские Армандовские чтения: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред: VII Всероссийская научная конференция (31.05–2.06. 2016 г., Муром). – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2016. – С.16-36.
2. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений / Л.А. Школьный, Е.Ф. Толстов, А.Н. Дет-

ков и др. Под ред. Л.А. Школьного. – М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. – 530 с.

3. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора комического базирования / Под ред. В.С. Вербы. – М.: Радиотехника, 2010. – 676 с.

4. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. / Под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.

5. Цветков О.Е., Ефимов А.В. Автокорреляционная функция двумерного сигнала РСА с миграцией по каналам дальности // Вопросы радиоэлектроники, серия Радиолокационная техника (РЛТ). 2008. Том 2. Вып. 1. С.91-102.

6. Карпов О.А., Цветков О.Е. Проблемы обработки сигналов РСА при радиовидении // Авиационные системы в XXI веке: Всероссийская научно-техническая конференция (26-27 мая 2016 г., Москва) / Сборник докладов. Т. II. – М.: ГНЦ ФГУП «ГосНИИАС», 2017. – С.441-446.

7. Цветков О.Е., Карпов О.А., Титов М.П., Толстов Е.Ф. Измерение доплеровского сдвига в РСА с миграцией сигнала // VII Всероссийские Армандовские чтения: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн / Материалы Всероссийской научной конференции. – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2017. С.350-356.

Поступила 28 мая 2017 г.

English

Radar imaging features in detailed continuous scanning mode by SAR Kondor-E space vehicle

Oleg Evgenyevich Tsvetkov – Candidate of Technical Sciences, Senior Research Associate CJSC AEROKON.

E-mail: al.vetckov@yandex.ru.

Address: 140180, Zhukovsky, Moscow Region, Zhukovsky st., 1.

Abstract: The article examines characteristics and features of processing synthetic aperture radar (SAR) signals in space-based Kondor-E vehicle in the stripmap mode (lateral visibility). Much attention is given to the pre-treatment (before focusing) of actual signals - holograms. The stripmap mode is not the most detailed for SAR of Kondor-E space vehicle. Nonetheless, radar image details (RID) obtained in the stripmap mode with high resolution enable to perform reliable object recognition. Flight path signal processing (SAR hologram) is of particular interest from the theoretical point of view: compression with respect to distance and focusing with respect to track time. Signal migration available in range channels (up to 80 ... 90 number of samples) involves SAR analysis as a broadband system in space-time sense. The main distortions and errors in primary matrix (the hologram) are the following: loss of lines (results of slant range probing); the high level in lines (injected signal gates); jitter samples in the analog-to-digital converter; the unknown Doppler shift caused by errors in the antenna pattern beam pointing and assembly. The technique of taking into account the lost lines and availability of the high level narrow-band interference is developed. Other destabilizing factors are considered directly when calculating the reference focusing signals. Methods of receiving high-precision assessment of ground equivalent speed of the carrier, and also the technique of database building for phase-frequency adjusting factors to convert reference impulse in compression with respect to distance are examined. The overall evaluation and compensation of the observed distortions was a success in gaining as a result of considering a set of existing

factors in processes of generation, emission, reception and recording of signals by SAR in Kondor-E space vehicle. As a result, the generated radar images in the ground-based complex of pretreatment and processing completely correspond to the prior specified characteristics.

Key words: synthetic aperture radar, radar image, radio hologram, Doppler centroid, jitter, amplitude-phase distortions.

References

1. Babokin M.I., Yefimov A.V., Zaytsev S.E., Karpov O.A., Kostrov V.V., Neronskiy L.B., Savosin G.V., Titov M.P., Tolstov E.F., Turuk V.E., Tsvetkov O.E. Flight test results and lessons of SAR small-size Kondor-E space vehicle. - VI All-Russian Armand readings: Radio physical methods in media remote sensing: VII All-Russian scientific conference (31.05-2.06. 2016, Murom). - Murom: Izdatelsko-poligrafichesky tsentr MI VIGU, 2016. – P. 16-36.
2. Air reconnaissance radar systems, radar image interpretation. - L.A. Shkolny, E.F. Tolstov, A.N. Detkov and other colleg. Ed. by L.A. Shkolny - M.: VVIA publ.h. named after N. E. of Zhukovsky, 2008. - 530 p.
3. Verba V.S., Neronskiy L.B., Osipov I.G., Turuk V. E. Space-based Earth viewing Radar systems. - Ed. by V. S. Verba. - M.: Radiotekhnika, 2010. - 676 p.
4. Kondratenkov G. S., Frolov A.Yu. Radio vision. Radar systems of Earth remote probing : manual for higher education institutions. - Ed. by S. Kondratenkov. – M.: Radiotekhnika, 2005. – 368 p.
5. Tsvetkov O. E., Yefimov A.V. Autocorrelation function of SAR two-dimensional signal with channel range migration. - Voprosy radioelektroniki, seriya Radiolokatsionnaya tekhnika (RLT). 2008. Volume 2. Iss. 1. P. 91-102.
6. Karpov O. A., Tsvetkov O. E. Problems of SAR signal processing in radio vision. - Aviation systems in the XXI century: All-Russian scientific and technical conference (May 26-27, 2016, Moscow). - M.: GNTs Federal State Unitary Enterprise GOSNIAS, 2016.
7. Tsvetkov O. E., Karpov O. A., Titov M.P., Tolstov E.F. Doppler shift measurement in SAR with signal migration. - the VII All-Russian Armand readings [An electronic resource]: Modern problems of remote sensing, radar detection, wave propagation and diffraction. - Materials of the All-Russian scientific conference. - Murom: Izdatelsko-poligrafichesky tsentr MI VIGU, 2017. P. 350-356.