

**Проблемы формирования РЛИ в обзорных режимах РСА
космического аппарата «Кондор-Э»**

Титов Михаил Петрович

кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
заместитель начальника отдела ЗАО «АЭРОКОН».

E-mail: titovmp@mail.ru.

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

Аннотация: В данной статье рассмотрены особенности синтеза радиолокационного изображения (РЛИ) в одном из штатных режимов работы бортового радиолокатора с синтезированием апертуры антенны (РСА) космического аппарата (КА) «Кондор-Э» – в обзорном режиме (ОР). В этом режиме полное РЛИ формируется из отдельных парциальных кадров путём их объединения. Для решения задачи формирования РЛИ парциальных кадров применён алгоритм гармонического анализа, который является эффективным с вычислительной точки зрения. Отдельные кадры РЛИ получают модулированными по амплитуде, поэтому для снижения этого эффекта в РСА предусмотрено обеспечение управляемого перекрытия по обеим координатам. Отмечается, что суммирование перекрывающихся областей РЛИ затруднено из-за неточности установки луча антенны и несоответствия пикселей РЛИ по дальности. В виду этого отдельные кадры РЛИ приходится «сшивать встык» и применять специальные алгоритмы выравнивания РЛИ по контрастности. Другой особенностью обзорного режима является существенно разный шаг следования пикселей по дальности и по азимуту. Это также требует специального учёта при формировании РЛИ. В статье приведены оценочные расчёты и примеры РЛИ, полученные при обработке радиолограмм РСА КА «Кондор-Э», подтверждающие указанные особенности обзорных режимов.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированием апертуры, обзорный режим, ScanSAR, скошенный режим, радиолокационное изображение, стыковка кадров, пиксель.

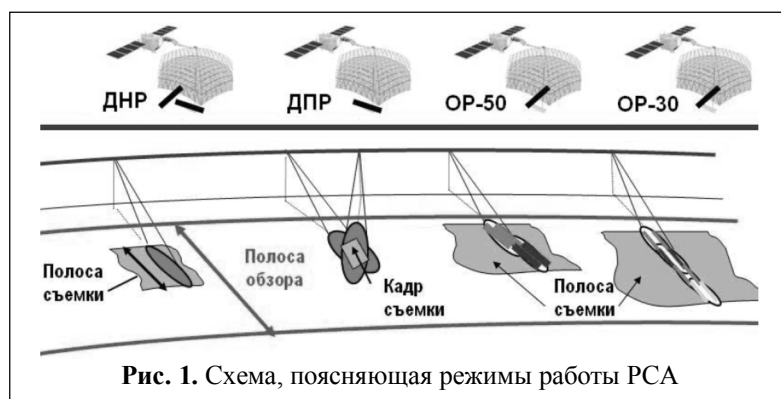
К настоящему времени всеобщее признание и широкое распространение в авиации и космосе получили радиолокационные станции (РЛС) землеобзора с цифровым синтезированием апертуры антенны (ЦРСА). Практически все современные и разрабатываемые бортовые РЛС, как отечественные, так и зарубежные имеют режимы синтезирования апертуры [1, 2]. Это связано с тем, что ЦРСА наряду с общеизвестными качествами РЛС (большая дальность, независимость от погодных усло-

вий и т.д.) обладают такими дополнительными уникальными качествами как:

- высокая разрешающая способность (вплоть до долей метра), обеспечивающая получение детальных радиолокационных изображений (РЛИ) объектов и местности, сравнимых по качеству с оптическими;
- оперативность формирования РЛИ и отображения его на борту носителя или на наземном пункте практически в реальном масштабе времени;

- гибкость цифровой обработки сигналов, которая обеспечивает большое разнообразие и быструю смену режимов работы РЛС;
- повышенную помехозащищенность;
- лёгкость модернизации РЛС за счёт смены лишь программного обеспечения и т.д.

Далее речь пойдёт об опыте,



полученном при работе с РЛС с синтезированной апертуры антенны (РСА), расположенной на космическом аппарате (КА) «Кондор-Э». В лётном эксперименте с КА «Кондор-Э» были использованы все запланированные режимы: детальной съёмки (детальный прожекторный режим – ДПР), маршрутной съёмки (детальный непрерывный режим – ДНР) и обзорные режимы (ОР). Частично вопросы обработки сигналов в режимах ДПР и ДНР рассматривались в [3, 4]. Данная работа развивает результаты [5] и посвящена проблемам использования обзорных режимов. Этот режим существенно отличается от ДНР и ДПР по схеме функционирования (рис. 1) и предназначен для общего обзора широкой полосы на местности с относительно невысоким линейным разрешением на местности (более 10 м). В РСА КА «Кондор-Э» предусмотрено применение способа обзора, известного как ScanSAR.

В штатном варианте РСА предусматриваются два обзорных режима ОР-50 и ОР-30, которые отличаются друг от друга полосой излучаемого сигнала и, следовательно, исходной разрешающей способностью по дальности. Исходное разрешение по наклонной дальности в ОР-50 (ширина полосы излучаемого импульса равна 50 МГц) соответствует примерно 3 м, а для ОР-30 (ширина полосы излучаемого импульса равна 30 МГц) – 5 м. Линейное разрешение по азимуту для обоих режимов одинаковое и зависит от различных параметров: ширины полосы захвата, дальности до центра съёмки и т.д. Для обеспечения требования к равномерности получаемых РЛИ предусмотрена возможность осуществления некогерентного накопления по дальности, что улучшает радиометрические характеристики изображения. Заметим, что количество некогерентных накоплений отсчётов РЛИ для ОР-50 больше, чем для ОР-30. В дальнейшем без нарушения общности будем рассматривать один режим ОР-50.

Как уже отмечалось, формирование РЛИ в режиме ОР принципиально отличается от ДПР и ДНР, так как оно формируется из отдельных

кадров путём их объединения. На рис. 2 показан пример формирования РЛИ из 4-х полос по дальности и 4-х интервалов накопления по азимуту. Очевидно, что интервал накопления сигнала в этом режиме значительно меньше, чем в ДНР (по крайней мере в количестве полос раз). В таком случае присутствующими в ДПР и ДНР режимами миграциями по дальности можно пренебречь. Условия такого пренебрежения можно выразить следующими неравенствами, связывающими ширину этих миграций ΔR_m с разрешением РСА по наклонной δ_r и путевой δ_x дальностям [6]:

$$\Delta R_{\text{мкс}} = \max \left(\frac{(x - x_1)^2}{2R_0} \right) = \frac{\Delta X_{ca}^2}{8R_0} = \frac{\lambda^2 R_0}{32\delta_x^2} \leq \frac{\delta_r}{2} \quad (1)$$

– для квадратичной и

$$\begin{aligned} \Delta R_{\text{ли}} &= \max \{ \Delta \alpha_0 (x - x_1) \} = \\ &= \Delta \alpha_0 \frac{\Delta X_{ca}}{2} = \frac{\lambda R_0 \Delta \alpha_0}{4\delta_x} \leq \frac{\delta_r}{2} \quad (2) \end{aligned}$$

– для линейной составляющей. При строго боковом обзоре ($\Delta \alpha_0 = 0$) линейные миграции будут отсутствовать.

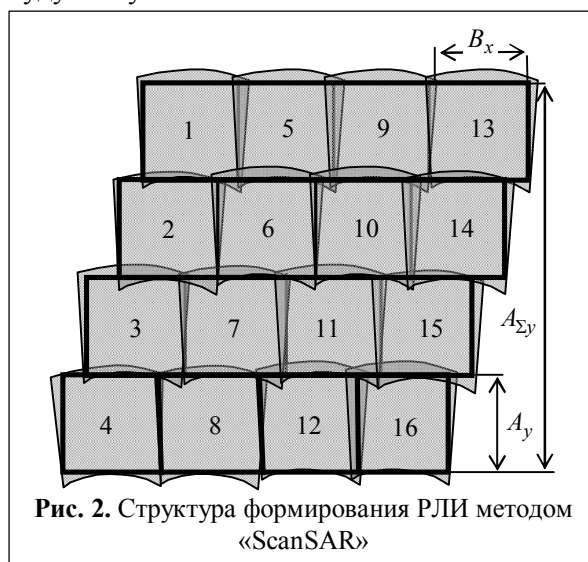


Рис. 2. Структура формирования РЛИ методом «ScanSAR»

В идеальном (расчётном) случае для КА «Кондор-Э» $\Delta \alpha_0 = 0$ и линейные миграции должны отсутствовать. Квадратичные миграции в соответствии с (1) равны 0,66...1,09 м, что не превышает половины разрешения по наклонной дальности ~ 3 м (для ОР-50). Эти расчёты подтверждают предположение об от-

сутствии необходимости учёта квадратичных миграций по дальности.

На рис. 3 дано пояснение к формированию РЛИ в одной парциальной полосе. Здесь показаны: R – изодаль, соответствующая дальности до объекта в первом парциальном кадре; Θ – ширина ДН по азимуту; X, X_1 – дальности до объекта в первом и втором парциальном кадре соответственно; ось Y – направление полёта КА; O, O_1 – центры фаз антенны в соседних парциальных кадрах.

Перемещением центров фаз антенны (и КА) за время синтезирования (на рис. 3) мы пренебрегаем, т.к. они весьма малы по сравнению с азимутальным размером парциального кадра.

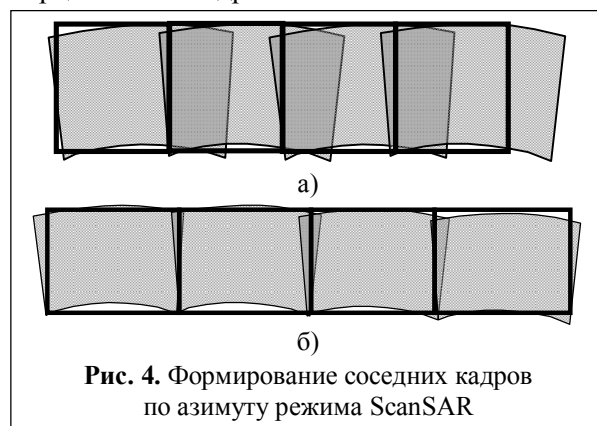


Из рис. 3 видно, что один и тот же объект на двух соседних кадрах, снятых на расстоянии Y_1 друг от друга, будет представлен на различных дальностях (X и X_1), т.е. «ошибка» в расстоянии составит $X - X_1$. Очевидно, что для случая, изображённого на рис. 3, $X_1 = \sqrt{R^2 - Y_1^2}$, но $X = R$, тогда

$$X - X_1 = R - X_1 = R - \sqrt{R^2 - Y_1^2}. \quad (3)$$

На рис. 4 показан процесс объединения двух соседних кадров по азимуту. Более тёмным выделен общий для обоих кадров участок. С целью повышения отношения сигнал/шум

было бы выгодно суммировать отсчёты РЛИ, отображающие один и тот же участок местности. Однако это вызывает трудности в связи с вышеизложенной нестыковкой по дальности. Применительно к КА «Кондор-Э» [7] на дальности порядка 800 км и ширине ДН антенны около 1° изменение дальности составит около 30 м на краю кадра. Отсюда видно, что перемещение объектов составит более 2 элементов разрешения, поэтому суммировать отсчёты без корректировки не представляется возможным. В связи с этим объединение на полученных РЛИ производилось без суммирования – «встык» (рис. 4а). Очевидно, что такой подход приводит к частичной потере информации парциального кадра.



Отметим, что объединение «встык» соседних азимутальных кадров без специальной коррекции возможно лишь для варианта использования всего азимутального кадра (без перекрытия) (рис. 4б). В этом случае изменения дальности на краях соседних кадров будут одинаковые, и РЛИ состыкуются. На рис. 5 приведено РЛИ залива Гумбольдта (шт. Калифорния, США) после стыковки трёх парциальных кадров, полученного с РСА КА «Кондор-Э» [7]. На рис. 6 приведена схема стыковки соседних азимутальных кадров, использованная при синтезе РЛИ рис. 5. Схема предполагает получение парциальных кадров максимальной азимутальной ширины, что позволяет формировать весь кадр без перекрытия. При этом расстояние $Y_1 = O_1 - O$ равно половине азимутального размера парциального кадра.

Далее следует обратить внимание на то, что из-за неравномерности диаграммы направленности антенны РСА РЛИ отдельных кадров будет модулировано по яркости и по азимуту, и по дальности (рис. 7). Яркость РЛИ кадров обычно выравнивают (рис. 8), однако при этом ухудшается отношение сигнал/шум. С целью уменьшения неравномерности РЛИ в РСА КА «Кондор-Э» предусмотрено формирование кадров с перекрытием. Неплохим решением снижения модуляции РЛИ по яркости было бы некогерентное суммирование перекрывающихся частей соседних кадров. Однако ввиду вышеуказанной разности дальностей в соседних азимутальных кадрах такое попиксельное суммирование РЛИ без специальной коррекции становится невозможным.

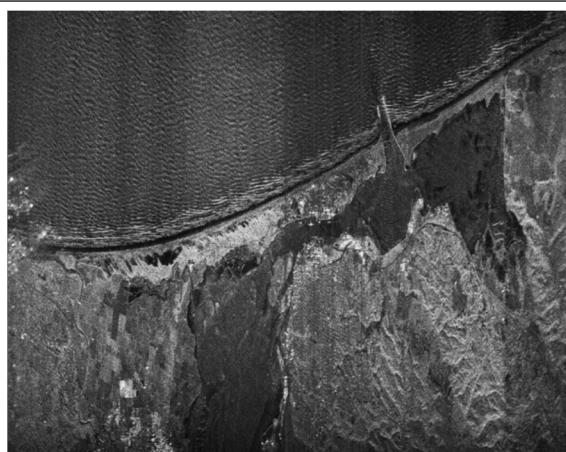


Рис. 5. РЛИ залива Гумбольдта (шт. Калифорния, США)

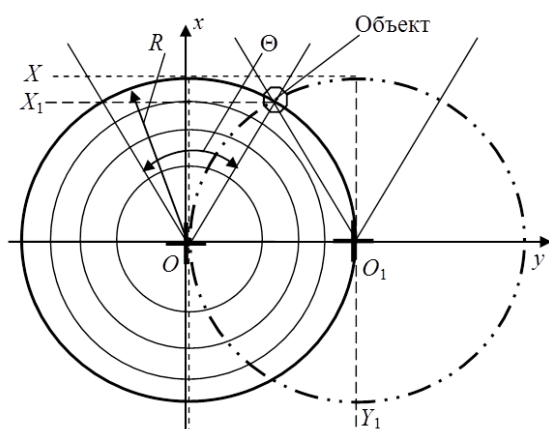


Рис. 6. Стыковка кадров при Y_1 , равным половине раскрыва антенны

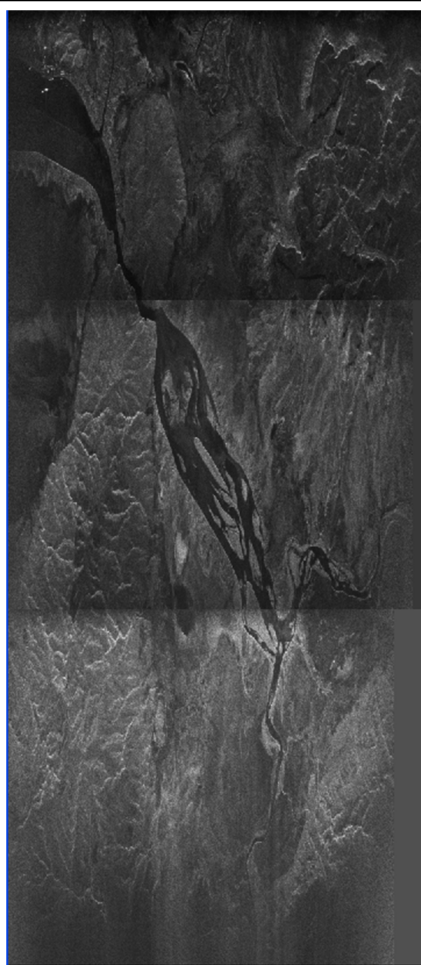


Рис. 7. РЛИ общего вида местности вблизи города-порта Уиндем (Западная Австралия)

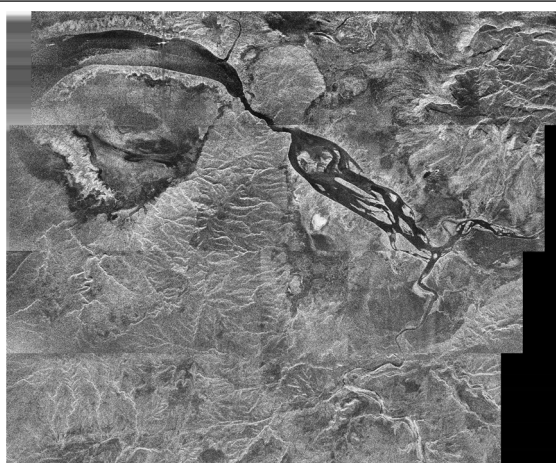


Рис. 8. Откорректированное и масштабированное РЛИ местности вблизи города-порта Уиндем (Западная Австралия)

Дополнительное искажение дальности до целей в соседних кадрах вызывается неточным управлением лучом антенны (а точнее – КА) по азимуту. Известно, что это приводит к до-

полнительному сдвигу в частотной области. Не учёт этого сдвига приводит к яркостной модуляции парциального кадра РЛИ. Картина объединения «встык» таких кадров с последующим выравниванием по яркости приведена на рис. 9. Здесь показано РЛИ, состыкованное из шести кадров по азимуту и трёх – по дальности. При обзоре земной поверхности было произведено перекрытие соседних кадров. Тем не менее, при формировании РЛИ парциальные кадры объединялись «встык» ввиду указанного выше несовпадения элементов по дальности. На рисунке хорошо видно ухудшение отношения сигнал/шум на краях состыкованных кадров, которое получается после выравнивания по яркости.

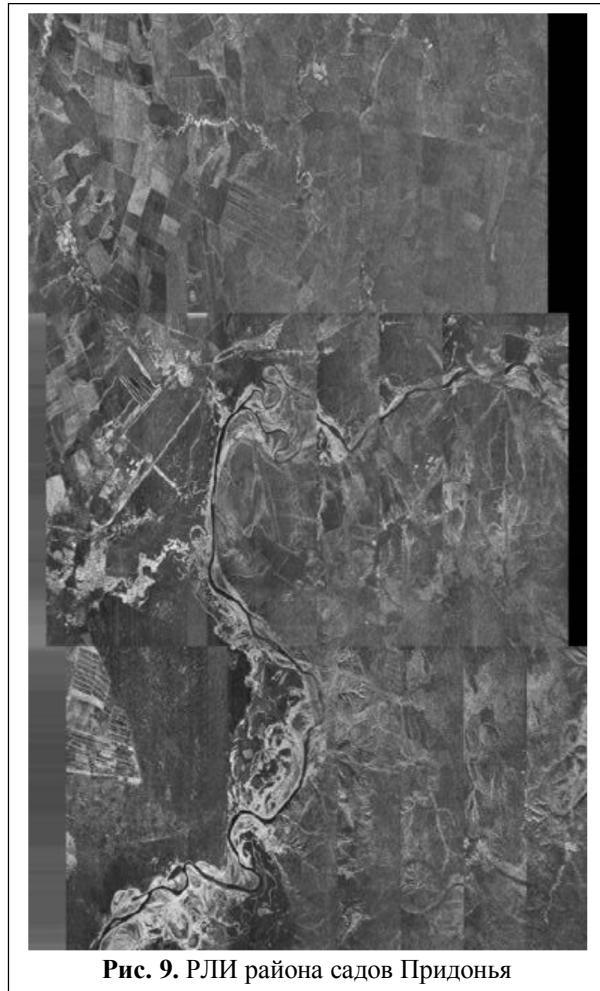


Рис. 9. РЛИ района садов Придонья

На рис. 10 схематично показано формирование РЛИ при таком заднебоковом обзоре, т.е. при отклонении луча антенны на угол γ назад относительно вектора скорости КА.

Двумя стрелками, сходящимися в точке z , выделены (для наглядности) расстояния $O-z$ и O_1-z до одного и того же объекта в двух соседних кадрах одной парциальной полосы. Таким образом, общее РЛИ подстилающей поверхности должно строиться из отдельных кадров с учётом неточности установки ДН антенны. Пример стыковки кадров одной парциальной полосы при скошенном назад обзоре приведён на рис. 11.

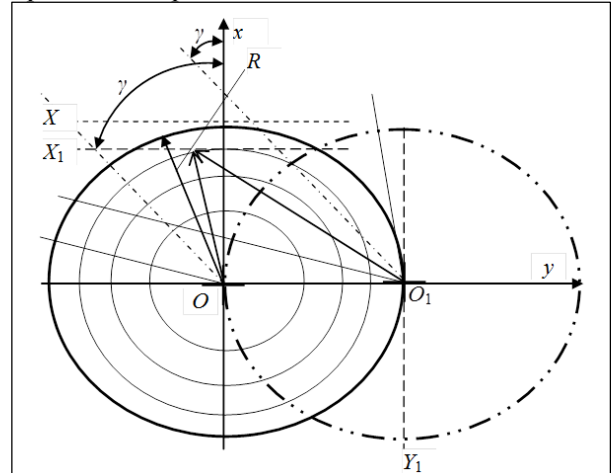


Рис. 10. Схема формирования кадров при заднебоковой съёмке



Рис. 11. Пример стыковки кадров одной парциальной полосы при скошенном назад обзоре

В заключение можно сказать следующее. Известно, что лётные испытания РСА КА «Кондор-Э» в обзорном режиме прошли успешно. Вместе с тем, возникли некоторые вопросы в формировании РЛИ в режиме ОР, которые необходимо учесть при дальнейших разработках. К ним, прежде всего, относятся:

- оценка необходимости учёта миграций по дальности;
- адаптивная оценка и учёт в обработке неточности установки ДН антенного устройства;

- объединение парциальных кадров с учётом изменения дальности до объектов в соседних кадрах.

Литература

1. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие для вузов / Под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.
2. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / В.Н. Антипов, В.Т. Горяинов, А.Н. Кулин и др.; Под ред. В.Т. Горяинова. – М.: Радио и связь, 1988. – 304 с.
3. Цветков О.Е. Особенности формирования РЛИ в детальных непрерывных режимах съёмки РСА космического аппарата «Кондор-Э» // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2017. № 3. – С. 50-59.
4. 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.431-442.
5. Титов М.П., Костров В.В., Цветков О.Е. Проблемы стыковки по дальности кадров РЛИ в обзорных режимах // VII Всероссийские Армандовские чтения [Электронный ресурс]: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн / Материалы Всероссийской научной конференции. – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2017. С.357-362.
6. Цветков О.Е. Алгоритмы обработки сигналов в РСА с миграцией по каналам дальности // Цифровая обработка сигналов в РСА / Под ред. Е.Ф. Толстова. – Смоленск: Изд-во ВА ВПВО РФ, 2005. С.71-78.
7. Зайцев С.Э. Космический аппарат – носитель РСА «Кондор-Э» как основа радиолокационной космической системы «Кондор-ФКА» // 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.431-442.

Поступила 05 апреля 2017 г.

English

Radar imaging problems of scanning modes in SAR Kondor-E space vehicle

Mikhail Petrovich Titov – Candidate of Technical Sciences, Senior Research Associate, CJSC AEROKON.

E-mail: titovmp@mail.ru.

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

Abstract: The article examines experience practice in radar imaging (RI) in one of the normal operation modes (scanning mode - SM) of onboard synthetic aperture radar (SAR) in space vehicle (SV) Kondor-E. This mode RI stands out for low linear resolution (20 ... 30 m). It enables to apply rather simple radio hologram processing algorithms. It may be noted that one of important features of this mode compared to other normal modes is using ScanSAR mode during scanning, i.e. comprehensive RI is formed from separate frames by joining them. It means that a comprehensive partial frame is synthesized during one (rather small) accumulation interval. The algorithm of harmonic analysis can be applied to solve the mentioned tasks. It is rather effective from the computing point of view and, despite inherent shortcomings, it can be used successfully in this mode. RI separate frames could be amplitude-modulated due to irregularity of antenna beam pattern in respect to range and azimuth. To reduce this effect the both coordinates overlapping is provided in SAR operation. Summing of the overlapping RI areas would be obvious plus point in this problem solution. However, it turns out to be uneasy due to the inaccuracy of the antenna beam adjustment in respect to azimuth and due to RI pixel discrepancies in respect to range. And therefore, RI separate frames have to be *sewed together end-to-end* and special RI contrast alignment algorithms have to be applied. Other feature of the scanning mode is the significantly varied pixel pitch in respect to range and azimuth. Scale nonlinearity in RI generating has to be as well considered in particular. Special emphasis has to be put on the problem of joining partial frames in skewed scanning mode. The article gives RI examples obtained when processing radio holograms of SV Kondor-E SAR confirming SM mode specified features and methods of taking them into account.

Key words: synthetic aperture radar, scanning mode, ScanSAR, the slanted mode, radar image, frames joining, pixel.

References

1. Kondratenkov G.S., Frolov A.Yu. Radio vision. Radar systems of Earth remote probing :Textbook for higher education insitutions. - Ed. by S. Kondratenkov. – M.: Radiotekhnika, 2005. – 368 p.
2. Digital synthetic aperture radars. - V. N. Antipov, V. T. Goryainov, A.N. Kulin, other colleagues; Ed. by V. T. Goryainov. - M.: Radio i svyaz, 1988. – 304 p.
3. Tsvetkov O. E. RI specific features in detailed continuous scanning mode by the SAR Kondor-E space vehicle. - Radiotekhnicheskiye i telekommunikatsionnye sistemy. - 2017. No. 3. – P. 60 – 59.
4. Babokin M.I., Yefimov A.V., Zaytsev S.E., Karpov O. A., Kostrov V. V., Neromskiy 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.
5. Titov M.P., Kostrov V.V., Tsvetkov O.E. RI frames joining problems in respect to range in scanning modes. - 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. 357-362.
6. Tsvetkov O. E. Signal processing algorithms in SAR with range channel migration. - SAR Digital signal processing. - Ed. by E.F. Tolstov. - Smolensk: VPVO WA publishing house, RF, 2005. P. 71-78.
7. Zaitsev S.E. The space vehicle - SAR carrier Kondor-E as a basis of the radar-tracking space system Kondor-FKA. - the 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. 431-442.