

АДАПТИВНАЯ РАДИОМЕТРИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ В РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Карпов Олег Анатольевич

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

E-mail: karp.smtp@mail.ru

Савостьянов Владимир Юрьевич

кандидат технических наук, доцент, ведущий инженер ЗАО «АЭРОКОН».

E-mail: v-savostyanov@yandex.ru

Цветков Олег Евгеньевич

кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник ЗАО «АЭРОКОН».

E-mail: al.vetckov@yandex.ru

Адрес: 140180, Российская Федерация, Московская обл., г. Жуковский, ул. Жуковского, д. 1.

Аннотация: Для устранения в радиолокационном изображении амплитудных искажений, связанных с изменением расстояния в зоне обзора и воздействием диаграммы направленности антенны на уровень принимаемого сигнала, применяют радиометрическую коррекцию. В статье показано, что такая процедура должна быть адаптивной к отношению сигнал/шум в пикселях изображения. Приведён синтез адаптивного алгоритма радиометрической коррекции, оптимального по критерию минимума среднего квадрата ошибки в оценке амплитуды полезного сигнала. Приведены описание алгоритма и результаты его исследования в лётных экспериментах.

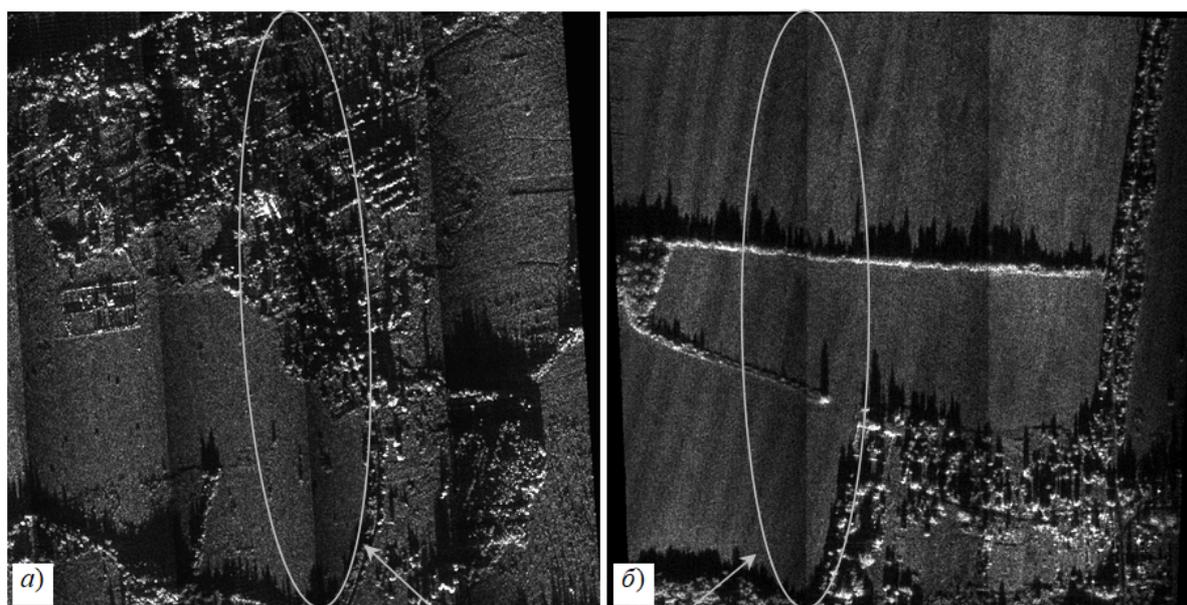
Ключевые слова: радиолокатор с синтезированием апертуры антенны (РСА), амплитудные искажения в радиолокационном изображении, радиометрическая коррекция, адаптация, отношение сигнал/шум.

Как известно, визуальное качество радиолокационного изображения (РЛИ), формируемого в радиолокаторе с синтезированием апертуры антенны (РСА), во многом обусловлено его яркостными свойствами. Амплитудные искажения, связанные с изменением уровня принимаемого сигнала, существенно влияют на радиометрические характеристики РЛИ, снижая его информативность и дешифрируемость. Как показывает практика использования материалов радиолокационной съёмки, из-за этого оператор не всегда способен отличить вклад отражённого сигнала от поверхности в суммарную яркость объектов на РЛИ от вклада, вносимого аппаратурой РСА [1].

В качестве примера на рис. 1 показаны РЛИ с разрешением 1 м, полученные в ходе экспериментальных исследований многофункциональной бортовой радиолокационной станции (МБРЛС) *Ки*-диапазона [2, 3] авиационного базирования с многократным телескопическим обзором (рис. 1, *а* — полосовым и рис. 1, *б* — секторным) без радиометрической коррекции.

В представленных РЛИ в местах стыков парциальных кадров хорошо заметно снижение яркости, вызванное модуляцией диаграммы направленности антенны (ДНА) по азимуту. Очевидно, что для устранения в изображении амплитудных искажений, связанных, прежде всего, с воздействием ДНА по азимуту и наклону на принимаемый сигнал, а также с изменением уровня принимаемого сигнала от наклонной дальности, при формировании РЛИ необходимо выполнять процедуру радиометрической коррекции.

Вообще говоря, проблема искажения радиометрических характеристик РЛИ является общей, как для РСА авиационного, так и для РСА космического базирования [4–7]. Особенно сильно эти эффекты проявляются в широкополосных режимах обзора (ScanSAR), когда РЛИ составляется из парциальных кадров, стыковка которых дополнительно усложняется из-за наличия геометрических искажений, неизвестного рельефа местности, ошибок калибровки [6–9].



Стык частичных кадров

Рис. 1. РЛИ без коррекции при полосовом (а) и секторном (б) обзоре

К основным мерам по радиометрической коррекции, которые очевидным образом вытекают из анализа причин возникновения искажений, относятся компенсация затухания сигнала от дальности, компенсация изменений диаграммы направленности антенны и учёт угла падения электромагнитной волны. Частично процедуры коррекции могут быть формализованы и описаны алгоритмически. Поэтому такие процессы радиометрической коррекции предусматривают модулями в программном обеспечении при обработке РЛИ и формировании информационного продукта [10, 11]. Однако применение того или иного вычислительного процесса определяется оператором, что приводит к росту доли человеческого фактора в конечном РЛИ. Более того, в таких сложных случаях как, например, корректировка данных с учётом сведений о местном рельефе, часто требуется эмпирическая коррекция РЛИ оператором, что увеличивает затраты времени на обработку РЛИ. Целью данной работы является синтез алгоритма адаптивной радиометрической коррекции, позволяющего автоматизировать данный этап обработки РЛИ.

Пусть на выходе алгоритма обработки сигналов РСА в каждом пикселе с координатами i, j присутствует аддитивная смесь

$$\zeta(i, j) = s(i, j) + \chi(i, j) \quad (1)$$

полезного сигнала

$$s(i, j) = A(i, j) \cdot (G(i, j) \cdot r_0 / r(i, j))^2, \quad (2)$$

где функции $G(i, j)$ и $r_0 / r(i, j)$ описывают соответственно форму ДНА (на излучение и приём) и зависимость уровня принимаемого сигнала от расстояния $r(i, j)$, и гауссова шума $\chi(i, j)$ с нулевым математическим ожиданием и дисперсией D_χ .

Так как функции $G(i, j)$ и $r_0 / r(i, j)$, как правило, априорно известны, то в неадаптивном варианте радиометрическая коррекция сводится к умножению сигнала $\zeta(i, j)$ на функцию $(G(i, j) \cdot r_0 / r(i, j))^{-2}$. Если при этом отношение сигнал/шум q во всех пикселях РЛИ не менее 30 дБ, то такая процедура полностью устранила амплитудные искажения и качество РЛИ повысится. Проблема заключается в том, что в тех пикселях РЛИ, где $q < 30$ дБ, произойдёт избыточное усиление шумов, и качество РЛИ, наоборот, понизится. На рис. 2 показаны РЛИ с разрешением 0,3 м (телескопический обзор),



сформированные по записанной радиоголограмме без коррекции и с неадаптивной радиометрической коррекцией. На рисунке отмечена часть РЛИ, в которой из-за избыточного усиления по шумам образовалась засвеченная область в изображении.

Одним из способов решения этой проблемы может быть применение адаптивного алгоритма радиометрической коррекции, в котором коэффициент передачи для каждого пикселя РЛИ будет рассчитываться, исходя из отношения сигнал/шум в нём.

Если критерием качества результирующего РЛИ считать минимум среднего квадрата ошибки в оценке амплитуды полезного сигнала, то тогда оптимальной следует считать такую радиометрическую коррекцию, при которой обеспечивается

$$\min \left\{ \overline{|\zeta(i, j)K(i, j) - A(i, j)|^2} \right\}, \quad (3)$$

где $K(i, j)$ — коэффициент коррекции для пикселя с экранными координатами i, j ; \bar{Y} — усреднение по реализациям.

Подставляя (1) и (2) в (3), запишем условие минимума:

$$\frac{\partial \left[\overline{|A(i, j)k_{ij}^2 + \chi(i, j)|K(i, j) - A(i, j)|^2} \right]}{\partial K(i, j)} = 0, \quad (4)$$

где $k_{ij} = G(i, j) \cdot r_0 / r(i, j)$.

Теперь, дифференцируя по $K(i, j)$ и усредняя по реализациям, получим

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial K(i, j)} \left(|A(i, j)|^2 [K(i, j)k_{ij}^2 - 1] + K^2(i, j) \overline{|\chi(i, j)|^2} + \right. \\ \left. + 2 \operatorname{Re}\{A(i, j)\} [K(i, j)k_{ij}^2 - 1] K(i, j) \overline{\operatorname{Re}\{\chi(i, j)\}} \right) = \\ = 2|A(i, j)|^2 [K(i, j)k_{ij}^2 - 1]^2 k_{ij}^2 + 2K(i, j)D_\chi = 0, \quad (5) \end{aligned}$$

откуда

$$K(i, j) = \frac{|A(i, j)|^2 k_{ij}^2}{|A(i, j)|^2 k_{ij}^4 + D_\chi} = \frac{\overline{|\zeta(i, j)|^2} - D_\chi}{\overline{|\zeta(i, j)|^2} k_{ij}^2}, \quad (6)$$

где $\overline{|\zeta(i, j)|^2} = |A(i, j)|^2 k_{ij}^4 + D_\chi$.

После выполнения коррекции математическое ожидание амплитуды пикселя (оценка коэффициента переотражения $\hat{A}(i, j)$) и дисперсия ошибки $D_{\hat{A}(i, j)}$ составят:

$$\hat{A}(i, j) = M\{\zeta(i, j)K(i, j)\} = \frac{A(i, j)}{1 + \frac{D_\chi}{|A(i, j)|^2 k_{ij}^4}}$$

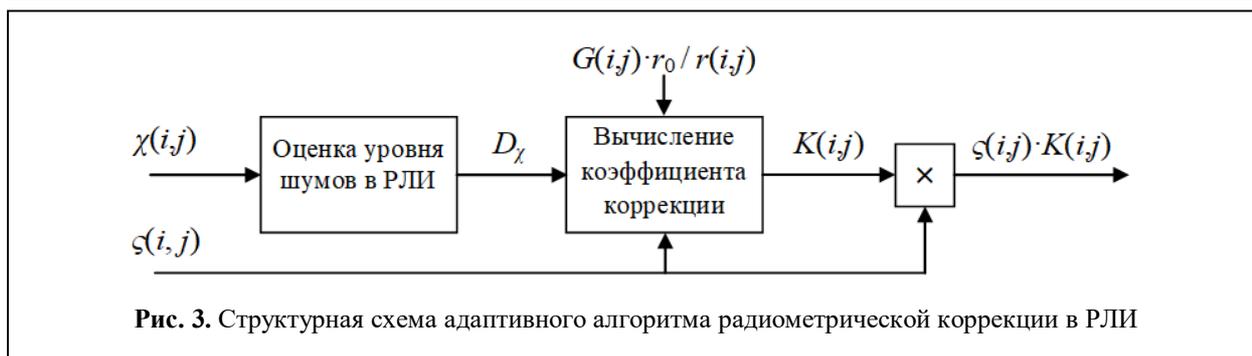


Рис. 3. Структурная схема адаптивного алгоритма радиометрической коррекции в РЛИ

$$D_{\chi}(i, j) = \min \left\{ \left| \zeta(i, j) K(i, j) - A(i, j) \right|^2 \right\} = \frac{|A(i, j)|^2 D_{\chi} [1 + k_{ij}^2]}{|A(i, j)|^2 k_{ij}^4 + D_{\chi}} \quad (7)$$

Структурная схема данного алгоритма показана на рис. 3.

Анализируя полученные выражения (6) и (7), отметим следующее:

1) с увеличением отношения сигнал/шум значение $K(i, j)$ асимптотически стремится к величине $(G(i, j) \cdot r_0 / r(i, j))^{-2}$, при этом после выполнения процедуры коррекции математическое ожидание амплитуды пикселя стремится к $A(i, j)$, а дисперсия ошибки коррекции — к $D_{\chi} / (G(i, j) \cdot r_0 / r(i, j))^2$;

2) при очень низком отношении сиг-

нал/шум значение коэффициента $K(i, j)$ асимптотически стремится к нулю, при этом после выполнения коррекции математическое ожидание амплитуды пикселя и дисперсии ошибки коррекции тоже стремятся к нулю;

3) для функционирования алгоритма необходимо предварительно измерить форму ДНА по азимуту и наклону, а также произвести оценку уровня шумов в РЛИ.

Результаты исследования показали, что при адаптивной радиометрической коррекции осязаемое усиление сигнала $K(i, j)$ осуществляется только в пикселях с отношением сигнал/шум q более 5 дБ, поэтому РЛИ формируются практически с одинаковой средней яркостью по всему полю изображения. В качестве примера на рис. 4 показаны расчётные зависи-

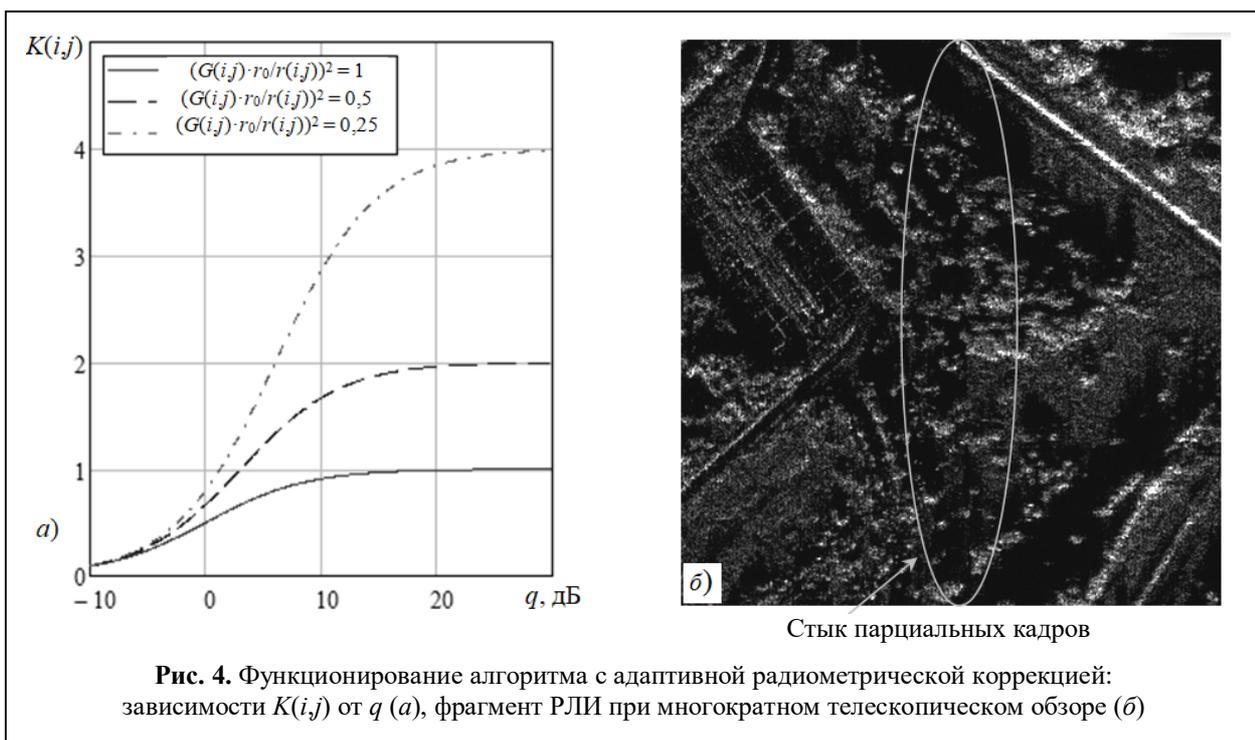


Рис. 4. Функционирование алгоритма с адаптивной радиометрической коррекцией: зависимости $K(i, j)$ от q (а), фрагмент РЛИ при многократном телескопическом обзоре (б)

мости $K(i,j)$ от q при различных значениях параметра $(G(i,j) \cdot r_0 / r(i,j))^2$ (a) и фрагмент РЛИ с разрешением 0,5 м, полученный в лётных экспериментах с МБРЛС Ку-диапазона, когда применялась адаптивная радиометрическая коррекция при многократном телескопическом обзоре (b).

Таким образом, разработанный алгоритм с адаптивной радиометрической коррекцией позволяет существенно улучшить яркостные характеристики РЛИ, формируемого РСА, что было подтверждено как путём имитационного моделирования, так и в лётных экспериментах.

Литература

1. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений / Под ред. Л.А. Школьного. М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. 531 с.
2. Ильин Е.М., Репников Д.А., Савостьянов В.Ю. и др. Режимы функционирования многофункциональной бортовой РЛС БЛА малой и средней дальности // Вестник СибГУТИ, 2019. № 2 (46). С. 68–86.
3. Ильин Е., Полубехин А., Савостьянов В., Самарин О., Ярмола А. МБРЛС Ку-диапазона длин радиоволн. Важный шаг к внедрению в состав бортового радиоэлектронного оборудования БЛА // Радиоэлектронные технологии. 2020. № 3. С. 20–25.
4. Mittermayer J. and Moreira A., Desnos Y.L. Radiometric Accuracy and Algorithms for ScanSAR Data Processing // Proceedings of CEOS SAR Workshop '98, WPP-138. ESA Publications Division, Noordwijk, The Netherlands. Noordwijk / The Netherlands, 02.02.-08.02.1998. Pp. 133–143.
5. Feng M., Jun H. The critical techniques for ScanSAR radiometric correction // 2007 1st Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar Proceedings (APSAR 2007). DOI:10.1109/APSAR.2007.4418543.
6. Тутов М.П. Проблемы формирования РЛИ в обзорных режимах РСА космического аппарата «Кондор-Э» // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2017. № 3. С. 43–49.
7. Тутов М.П., Костров В.В., Цветков О.Е. Проблемы стыковки по дальности кадров РЛИ в обзорных режимах // 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. 357–362.
8. Padro J.-C., Munoz F.-J., Avila L.A., Pesquer L., Pons X. Radiometric Correction of Landsat-8 and Sentinel-2A Scenes Using Drone Imagery in Synergy with Field Spectroradiometry // Remote Sens. 2018, 10, 1687, 26 p.; DOI:10.3390/rs10111687.
9. Zhong L., Qiu X., Han B., Hu Y. An Improved Descalloping Method Combined With Imaging Parameters for GaoFen-3 ScanSAR // Remote Sens. 2020, 12, 822, 23 p.; DOI:10.3390/rs12050822.
10. TerraSAR-X Image Product Guide. Basic and Enhanced Radar Satellite Imagery. Issue 2.1 March 2015 Airbus Defence and Space. 23 p.
11. COSMO-SkyMed Mission and Products Description. Doc. No. ASI-CSM-PMG-NT-001. 2019. Issue 3. 151 p.

Поступила 15 октября 2021 г.

English

ADAPTIVE RADIOMETRIC CORRECTION IN RADAR IMAGES

Oleg Anatolyevich Karpov — Grand Dr. in Engineering, Senior Research Associate, CJSC AEROKON.

E-mail: karp.smtp@mail.ru

Vladimir Yuryevich Savostyanov — PhD, Associate Professor, Senior Engineer, CJSC AEROKON.

E-mail: v-savostyanov@yandex.ru

Oleg Evgenyevich Tsvetkov — PhD, Associate Professor, Senior Research Associate, CJSC AEROKON.

E-mail: al.vetckov@yandex.ru

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

Abstract: Amplitude distortions related to variation of received signal level drastically affect radiometric response of radar images (RI) reducing its informational content and decodability. Radiometric correction needs to be done to enhance RI visual quality generated in synthetic aperture radar (SAR). The problem of RI radiometric response distortion is common both for airborne and space-based SAR. Especially heavy these

effects are manifested in Scansar (broadband scan modes) when RI are made of partial frames and jointing of which is further complicated due to available geometric distortions, unknown ground profile, calibration errors. Signal attenuation compensation due to range, compensation of antenna pattern variation and allowance for incident angle of electromagnetic wave are ordinary operations performed by an operator during radiometric correction. The paper aims at synthesis of algorithms for adaptive radiometric correction that enable to make automatic this stage of RI processing. Minimum mean-square error to evaluate wanted signal amplitude is applied as quality criterion for resultant RI when synthesizing adaptive algorithm. Ratios are obtained to calculate evaluation of re-reflection coefficient and dispersion of estimation errors. Structural diagram of adaptive algorithm for RI radiometric correction was developed. Developed algorithm research was done using mathematical model method. It is made clear that signal amplification comes about only in those image pixels where signal-to-noise ratio is more than 5-7 dB. That's why average brightness matches up throughout the frame in generated RI. Algorithm performance efficiency is confirmed by the results of flight tests of multifunctional airborne Ku-band radar of multiple telescopic scan observation. Application of adaptive algorithm enabled to synthesize almost stichless 0.5 m resolution RI. Thus, the developed algorithm with adaptive radiometric correction enables to vastly improve brightness performance of SAR-generated RI and which was confirmed both by simulation modeling and by flight tests.

Keywords: synthetic aperture radar (SAR), amplitude distortions in the radar image, radiometric correction, adaptation, signal to noise ratio.

References

1. Radar systems of aerial reconnaissance, decryption of radar images. Edited by *L.A. Shkolny*. Moscow: Publishing House of the VVIA named after prof. N.E. Zhukovsky, 2008. 531 p.
2. *Ilyin E.M., Repnikov D.A., Savostyanov V.Yu.*, etc. Modes of operation of the multifunctional on-board radar UAV of short and medium range. *Vestnik SibGUTI*. 2019. No. 2 (46). Pp. 68–86.
3. *Ilyin E., Polubekhin A., Savostyanov V., Samarin O., Yarmola A.* MBRLS of the Ku-band of radio wave lengths. An important step towards the introduction of on-board electronic equipment of UAVs. *Radioelektronnye tehnologii*. 2020. No. 3. Pp. 20–25.
4. *Mittermayer J., Moreira A., Desnos Y.L.* Radiometric Accuracy and Algorithms for ScanSAR Data Processing. Proceedings of CEOS SAR Workshop '98, WPP-138. ESA Publications Division, Noordwijk, The Netherlands. Noordwijk. The Netherlands, 02.02.-08.02.1998. Pp. 133–143.
5. *Feng M., Jun H.* The critical techniques for ScanSAR radiometric correction // 2007 1st Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar Proceedings (APSAR 2007). DOI:[10.1109/APSAR.2007.4418543](https://doi.org/10.1109/APSAR.2007.4418543).
6. *Titov M.P.* Problems of radar formation in the survey modes of the radar of the spacecraft "Condor-E". *Radiotekhnicheskiye I telekommunikacionnye sistemy*. 2017. No. 3. Pp. 43–49.
7. *Titov M.P., Kostrov V.V., Tsvetkov O.E.* Problems of docking by the range of radar frames in survey modes // VII All-Russian Readings named after Armand: Modern problems of remote sensing, radar, propagation and diffraction of waves. Materials of the All-Russian Scientific Conference. Murom: MI VISU, 2017. Pp. 357–362.
8. *Padro J.-C., Munoz F.-J., Avila L.A., Pesquer L., Pons X.* Radiometric Correction of Landsat-8 and Sentinel-2A Scenes Using Drone Imagery in Synergy with Field Spectroradiometry. *Remote Sens.* 2018, 10, 1687, 26 p.; DOI:[10.3390/rs10111687](https://doi.org/10.3390/rs10111687).
9. *Zhong L., Qiu X., Han B., Hu Y.* An Improved Descalloping Method Combined With Imaging Parameters for GaoFen-3 ScanSAR. *Remote Sens.* 2020, 12, 822, 23 p.; DOI:[10.3390/rs12050822](https://doi.org/10.3390/rs12050822).
10. TerraSAR-X Image Product Guide. Basic and Enhanced Radar Satellite Imagery. Issue 2.1 March 2015 Airbus Defence and Space. 23 p.
11. COSMO-SkyMed Mission and Products Description. Doc. No. ASI-CSM-PMG-NT-001. 2019. Issue 3. 151 p.