Труды МАИ. 2026. № 150.

Trudy MAI. 2026. No. 150. (In Russ.)

Научная статья
УДК 621.396.96
URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=189692
EDN: https://www.elibrary.ru/JWVLRR

МОДЕЛЬ КОРРЕКЦИИ РЕТРАНСЛИРОВАННОГО СИГНАЛА В ЗАДАЧАХ КАЛИБРОВКИ КОСМИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАТОРОВ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ

К.И. Титов, А.В. Шульженко, С.Н. Гусев

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия

✉ vka@mil.ru

Цитирование: Титов К.И., Шульженко А.В., Гусев С.Н. Модель коррекции ретранслированного сигнала в задачах калибровки космических радиолокаторов с синтезированной апертурой // Труды МАИ: электрон. журнал. № 150. URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=189692

Аннотация. В статье представлены результаты моделирования процесса формирования виртуальных точечных объектов транспондерами в интересах калибровки космических радиолокаторов с синтезированной апертурой. Проведен анализ причин расфокусировки их радиолокационных изображений. Предложены методы коррекции ретранслированного сигнала, компенсирующие возникающие различия в фазовой и геометрической структуре голограмм реального и виртуального объектов.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой; калибровка радиолокационных средств; ретранслятор; радиолокационное изображение; модель.

MODEL FOR CORRECTING THE RETRANSMITTED SIGNAL IN THE CALIBRATION OF SYNTHETIC APERTURE SPACE RADARS

K.I. Titov, A.V. Shulzhenko, S.N. Gusev

Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russia

✉ vka@mil.ru

Citation: Titov K.I., Shulzhenko A.V., Gusev S.N. Model for correcting the retransmitted signal in the calibration of synthetic aperture space radars // Trudy MAI. 2026. No. 150. (In Russ.). URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=189692

Abstract. The paper presents the results of modeling the formation of virtual point objects by transponders for the calibration of spaceborne synthetic aperture radars. The causes of defocusing of their radar images are analyzed. Methods for correcting the retransmitted signal are proposed, which compensate for the differences arising in the phase and geometric structure of the holograms of real and virtual objects.
Keywords: synthetic aperture radar; calibration of radar; repeater; radar image; model.

Введение

Для обеспечения требуемых информационных и измерительных характеристик космических радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) необходима их калибровка с использованием соответствующих полигонов, оборудованных тестовыми объектами с заданными значениями эффективной площади рассеивания (ЭПР) и позволяющими производить оценивание реальной разрешающей способности, радиометрических характеристик и точности координатной привязки формируемых радиолокационных изображений (РЛИ) [1, 3].

В последние годы для решения указанной задачи все большее распространение находят активные ретрансляторы радиолокационных сигналов (транспондеры). С их помощью на РЛИ могут быть сформированы как тестовые виртуальные объекты (ВО) с целью амплитудной калибровки РЛИ, определения пространственного разрешения на местности и оценки точности координатной привязки РЛИ [1, 2, 5, 6, 14], так и тестовые шумоподобные области заданной интенсивности для решения задач радиометрической калибровки и оценки радиометрического разрешения [8, 9]. При этом координаты ВО задаются по дальности временной задержкой сигнала, а по азимуту – частотным сдвигом доплеровского спектра [1, 6]. Указанный частотный сдвиг приводит к рассогласованию доплеровского спектра, формируемого транспондером, и частотной характеристики РСА, что в свою очередь искажает РЛИ калибровочного ВО [2, 5].

Для реальных объектов (РО) геометрия волнового фронта и фазовая часть отражённого сигнала однозначно связаны друг с другом. Однако при

формировании виртуальных РЛИ указанное соответствие нарушается вследствие искусственно вводимых временной задержки и частотного сдвига доплеровского спектра, что приводит к ухудшению семантических характеристик их РЛИ (главным образом – за счет ухудшения пространственного разрешения). Указанное обстоятельство требует применения методов коррекции характеристик сигнала, формируемого транспондером.

Аналитическая модель коррекции ретранслированного сигнала при выносе виртуального объекта по дальности

Если транспондер, обладающий координатой $R_т$ по дальности, формирует ВО, вынесенный на величину ΔR, путём временной задержки ретранслированного сигнала, то зависимость изменения наклонной дальности $r_{во}(x)$ от РСА до ВО от путевой азимутальной координаты $x = Vt$ можно записать в виде:

$$r_{во}(x) = \sqrt{{R_т}^2 + x^2} + \Delta R \approx R_т + \Delta R + \frac{x^2}{2R_т}. \qquad (1)$$

В свою очередь зависимость изменения наклонной дальности $r_{ро}(x)$ от РСА до РО, расположенного на той же дальности $R_т + \Delta R$, от путевой азимутальной координаты $x = Vt$ имеет вид:

$$r_{ро}(x) = \sqrt{(R_т + \Delta R)^2 + (x - x_T)^2} \approx R_т + \Delta R + \frac{(x - x_T)^2}{2(R_т + \Delta R)}. \qquad (2)$$

Различие в законах изменения дальности голограммы РО $r_{ро}(x)$ и ВО $r_{во}(x)$ подчиняется зависимости

$$\Delta r_{\Delta R}(x) = r_{ро}(x) - r_{во}(x) \approx -\frac{\Delta R}{2(R_т + \Delta R)R_т}x^2. \qquad (3)$$

Соответственно различие в законах изменения фазы составляет:

$$\Delta\varphi_{\Delta R}(t) = \frac{4\pi}{\lambda}\Delta r_{\Delta R}(Vt) \approx \frac{2\pi \cdot \Delta R}{\lambda(R_т + \Delta R)R_т}(Vt)^2, \qquad (4)$$

а разностная доплеровская частота определяется соотношением:

$$\Delta f_{\Delta R}(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta\varphi_{\Delta R}(t)}{dt} = \frac{2 \cdot \Delta R \cdot V^2}{\lambda(R_т + \Delta R)R_т} \cdot t, \qquad (5)$$

и представляет собой дополнительный ЛЧМ-сигнал, обусловленный наличием выноса ВО ΔR по дальности, который должен быть использован для компенсации различий доплеровских частот ВО и РО.

Таким образом, коррекция голограммы ВО путём введения дополнительного квадратичного изменения дальности (2), что позволяет компенсировать не только фазовые, но и геометрические различия голограмм ВО и РО.

Аналитическая модель коррекции ретранслированного сигнала при выносе виртуального объекта по координате азимута

При осуществлении выноса ВО по азимуту ΔX относительно точки расположения транспондера путём сдвига доплеровского спектра ретранслированного сигнала размер зоны допустимого выноса ВО определяется азимутальным размером пятна $\theta_{\text{г}} R$, засвечиваемого диаграммой направленности антенны (ДНА) на местности, где $\theta_{\text{г}}$ – раскрыв ДНА по азимуту, R – наклонная дальность.

Так, например, при горизонтальном размере антенны РСА d_a=16 м на дальности R=1000 км азимутальный размер зоны возможных выносов ВО составляет $\Delta X_{\text{макс}} = \pm\ \theta_{\text{г}} R/2 = \pm 930$ м для λ=3 см.

Введение в ретранслированный сигнал дополнительной доплеровской частоты приводит к возникновению двух эффектов, вызывающих ухудшение пространственного разрешения РЛИ ВО [1, 2].

Первый заключается в том, что РЛИ ВО формируется в точке нулевого значения доплеровской частоты $f_{\text{д}} = 0$, которая при наличии сдвига доплеровского спектра соответствует заданной величине азимутального выноса ΔX. При этом геометрия волнового фронта остаётся неизменной и соответствует азимутальной координате транспондера, что приводит к перекосу голограммы ВО [10, 12, 13].

Второй эффект заключается в частотном рассогласовании доплеровского спектра голограммы ВО с частотной характеристикой устройства формирования РЛИ, что обусловлено его сдвигом [12, 15].

При высоком пространственном разрешении (реализуемом в прожекторном режиме) перекос голограммы ВО, обусловленный рассогласованием закона изменения её фазы и геометрии, приводит к тому, что в каждом стробе дальности оказывается лишь часть голограммы [12, 19]. Это приводит к размытию РЛИ и требует применения геометрической коррекции волнового фронта ретранслированного сигнала.

Если закон изменения дальности от РСА до транспондера, обладающего координатой $R_т$ по дальности, определяется выражением

$$r_т(x) = \sqrt{{R_т}^2 + x^2} \approx R_т + \frac{x^2}{2R_т}, \qquad (6)$$

где, как и ранее, $x = Vt$ – путевая азимутальная координата РСА, то закон изменения дальности от РСА до РО, расположенного на той же дальности $R_т$, но имеющего азимутальную координату ΔX относительно точки расположения транспондера, подчиняется зависимости

$$r_{ро}(x, \Delta X) = \sqrt{{R_т}^2 + (x + \Delta X)^2} \approx R_т + \frac{x^2}{2R_т} + \frac{\Delta X}{R_т}x + \frac{{\Delta X}^2}{2R_т}, \qquad (7)$$

Тогда различие указанных законов изменения дальности от РСА есть

$$\Delta r_{\Delta X}(x) = r_{ро}(x, \Delta X) - r_т(x) \approx \frac{\Delta X}{R_т}x + \frac{{\Delta X}^2}{2R_т}. \qquad (8)$$

Последнее выражение определяет дополнительное приращение дальности, которое необходимо для геометрической коррекции волнового фронта ретранслируемого транспондером сигнала при азимутальном выносе ВО на ΔX.

Первый член в представленном выражении соответствует линейному изменению дальности, а соответственно и фазы ретранслируемого сигнала:

$$\varphi(x) = \frac{4\pi}{\lambda}\Delta r_{\Delta X}(x) = \frac{4\pi \cdot \Delta X}{\lambda R_т}x = \frac{4\pi \cdot \Delta X \cdot V}{\lambda R_т}t, \qquad (9)$$

которая соответствует доплеровской частоте:

$$f_д = \frac{1}{2\pi}\frac{d\varphi(t)}{dt} = \frac{2V}{\lambda R_т}\Delta X, \qquad (10)$$

приводящей к сдвигу доплеровского спектра и соответственно отметки ВО на величину, равную требуемому азимутальному выносу ΔX.

Очевидно, что коррекция голограммы ВО путём введения дополнительного линейного изменения дальности (8) позволяет не только компенсировать геометрические различия голограмм ВО и РО, но и обеспечить дополнительный сдвиг доплеровского спектра (8), приводящий к формированию требуемого азимутального выноса ВО ΔX.

Диапазон линейного изменения дальности $\Delta r_{\text{лин}}$, соответствующий первому члену выражения (8), может быть определён при $\Delta X = \Delta X_{\text{макс}} = \pm\theta_{\text{г}} R_{\text{т}}/2$ и $x = x_{\text{макс}} = L_s/2 = \lambda R_{\text{т}}/(4\delta_x)$, где L_s – интервал синтезирования апертуры, определяющий также время работы транспондера на излучение $T_{\text{изл}} = L_s/V$.

В результате величина диапазона линейного изменения дальности составляет:

$$\Delta r_{\Delta X1}(\Delta X_{\text{макс}}, x_{\text{макс}}) \approx \pm\frac{\lambda^2 \cdot R_{\text{т}}}{8 \cdot d_a \cdot \delta_x}. \qquad (11)$$

Оценка величины $\Delta r_{\Delta X1}$ при d_a=16 м, $R_{\text{т}}$=1000 км, и азимутальном разрешении РСА $\delta_x = 1 \ldots 0.25$ м, составляет $\Delta r_{\Delta X1} = \pm 7 \ldots \pm 28$ м для λ=3 см.

Величина второго члена $\Delta r_{\Delta X2}(\Delta X_{\text{макс}})$ выражения (8) составляет лишь 0.4 м независимо от величины пространственного разрешения РСА.

Поскольку изменение дальности обеспечивается временными задержками ретранслированного транспондером сигнала, то, как следует из анализа выражений (8) и (11), отрицательные значения величины $\Delta r_{\text{лин}}$ не могут быть реализованы на практике. Формирование положительных задержек вызывает необходимость дополнительного сдвига ВО по координате дальности на величину $r_{\text{доп}} = |\Delta r_{\Delta X1}|$. Величина указанного сдвига помимо длины волны λ зависит также от координаты ВО ΔX. Это приводит к необходимости либо расчёта $r_{\text{доп}}$ для каждого ВО, либо общего выноса по дальности всех ВО на максимальную величину $r_{\text{доп}} = |\Delta r_{\Delta X1}(\Delta X_{\text{макс}}, x_{\text{макс}})|$.

В этом случае транспондер должен формировать сигнал, соответствующий положению РО не только вынесенного по координате азимута на величину ΔX, но и вынесенного по дальности на $r_{\text{доп}}$, текущая дальность до которого определяется выражением

$$r_{\text{ро}}(x, \Delta X, r_{\text{доп}}) = \sqrt{(R_{\text{т}} + r_{\text{доп}})^2 + (x + \Delta X)^2}. \quad (12)$$

Указанный сдвиг, как было показано ранее, приводит к расфокусировке РЛИ, устранение которой требует дополнительной коррекции ретранслированного сигнала. Различие законов изменения дальности от РСА до транспондера и до реального объекта, обладающего в соответствии с последним выражением координатами ΔX по азимуту и $r_{\text{доп}}$ по дальности, подчиняется зависимости

$$\Delta r_{\Delta X}(x) = r_{\text{ро}}(x, \Delta X, r_{\text{доп}}) - r_{\text{т}}(x) \approx \frac{\Delta X}{R_{\text{т}}} x + \frac{\Delta X^2}{2R_{\text{т}}} + r_{\text{доп}} - \frac{r_{\text{доп}}}{2(R_{\text{т}} + r_{\text{доп}})R_{\text{т}}} x^2 \quad (13)$$

Последнее выражение определяет общую задержку ретранслированного транспондером сигнала, обеспечивающего формирование РЛИ ВО, вынесенного относительно транспондера на величину ΔX по азимуту и $r_{\text{доп}}$ по дальности. При этом первые два члена обеспечивают сдвиг РЛИ ВО по азимуту, третий член компенсирует отрицательные значения задержек, сдвигая голограмму ВО по дальности, а четвёртое слагаемое компенсирует различия в законах изменения дальности при сдвиге голограммы по дальности.

Имитационное моделирование характеристик РЛИ виртуального объекта в прожекторном режиме работы РСА

Приведённые выше аналитические выражения не позволяют в должной мере провести анализ формирования РЛИ ВО в прожекторном режиме работы РСА по следующим причинам.

При азимутальном разрешении $\delta_x = 0.25$ м для d_a=16 м, R=1000 км, и λ=3 см интервал когерентной обработки (интервал синтезирования апертуры) составляет $L_S = \lambda R/(2 \cdot \delta_x) = 60$ км. Очевидно, что при таких величинах L_S условие $R \gg L_S$ вряд ли можно считать корректным, а, соответственно, неприменим квадратичный закон изменения дальности и фазы сигнала, на котором основаны аналитические выражения. Результаты, полученные при гауссовских аппроксимациях, присутствующих в аналитических выражениях также нуждаются в уточнении.

Для анализа процесса формирования РЛИ ВО проведено имитационное моделирование получения РЛИ точечного ВО при его наблюдении космическим РСА, работающим в прожекторном режиме [3, 6, 7, 18]. Основными параметрами РСА были выбраны: рабочая длина волны РСА λ=3 см; горизонтальный размер антенны d_a=16 м; скорость носителя РСА V= 7.5 км/с. Величины пространственного разрешения РЛИ выбирались равными по координатам азимута и дальности $\delta_x = \delta_r = \delta_0$ и составляли значения 1 м, 0.5 м и 0.25 м.

Наклонная дальность на траверзе точки расположения транспондера была выбрана R=1000 км. При этом азимутальный размер облучаемого ДНА участка местности составил $\theta_r R = 1860$ м, а азимутальный размер зоны допустимого выноса ВО для указанной длины волны составил $\Delta X_{\text{макс}} = \pm 930$ м. Размер зоны выноса ВО по дальности $\Delta R_{\text{макс}}$ выбирался в диапазоне $0 \ldots 30$ км.

Результаты имитационного моделирования характеристик РЛИ ВО при его выносе по координате дальности в прожекторном режиме работы РСА

При отсутствии выносов ВО по дальности $\Delta R = 0$ и азимуту $\Delta X = 0$ отметка цели достаточно хорошо описывается функцией типа $\sin x / x$. Это иллюстрирует рисунок 1, на котором для пространственного разрешения $\delta_0 = 0.5$ м показаны амплитуда РЛИ точечного рассеивателя в координатах азимута x и дальности r (А), а также её сечения по указанным координатам (Б и В) при $\Delta R = \Delta X = 0$.

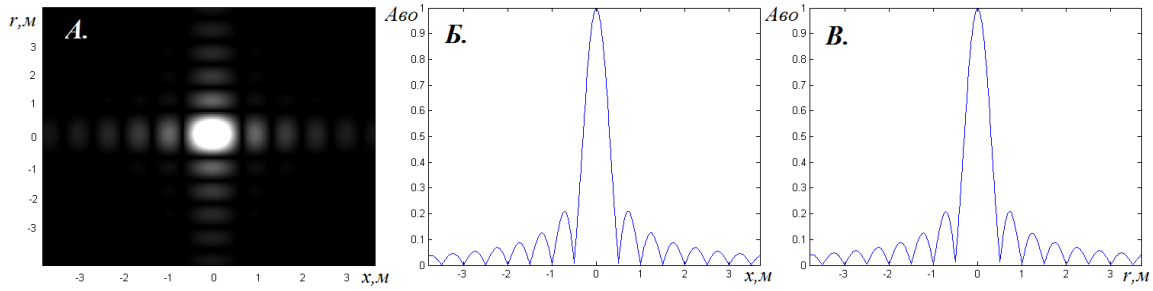


Рисунок 1 - РЛИ точечного рассеивателя (А) и сечения амплитуды РЛИ по координатам азимута (Б) и дальности (В) при $\Delta R = \Delta X = 0$

Оценивание пространственного разрешения δ_r и δ_x ВО производилось по ширине этих отметок на уровне 0.7. При отсутствии выноса ВО по дальности $\Delta R = 0$ и азимуту $\Delta X = 0$ величины $\delta_x = \delta_r$ соответствовали заданным значениям 1 м, 0.5 м и 0.25 м.

В то же время, как было показано ранее, вынос ВО по координате дальности ($\Delta R > 0$) сопровождается рассогласованием законов изменения фазы голограммы и опорной функции процессора РСА, что приводит к размытию РЛИ ВО. Это иллюстрирует рисунок 2, на котором для пространственного разрешения $\delta_0 = 1$ м и λ=3 см показаны РЛИ точечного рассеивателя в координатах азимута x и дальности r (А), а также сечения амплитуды РЛИ по указанным координатам (Б и В) при выносе ВО по дальности $\Delta R = 250$ м.

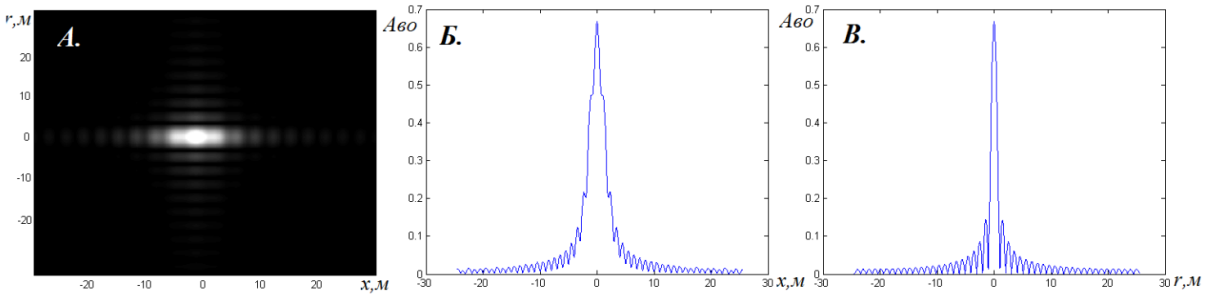


Рисунок 2 - РЛИ ВО (А) и сечения амплитуды РЛИ по координатам азимута (Б) и дальности (В) при $\Delta R = 250$ м и $\delta_0 = 1$ м без коррекции ретранслируемого сигнала

Применение фазовой коррекции голограммы позволяет устранить азимутальное размытие РЛИ и привести отметку ВО к виду, представленному на рисунке 1. Однако, при выносах $\Delta R > 10$ км РЛИ ВО претерпевает геометрические искажения несмотря на то, что оценка пространственного разрешения по координатам азимута δ_x и дальности δ_r остаётся практически постоянной.

Проявление указанных искажений иллюстрирует рисунок 3, на котором для пространственного разрешения $\delta_0 = 1$ м показаны РЛИ точечного рассеивателя (А), а также сечения амплитуды РЛИ по координатам азимута x (Б) и дальности r (В) при выносе ВО по дальности $\Delta R = 30$ км и проведённой фазовой коррекции голограммы.

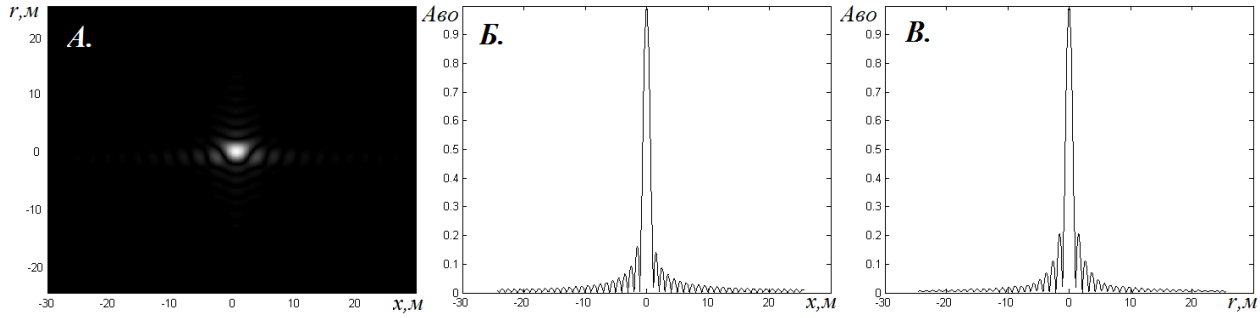


Рисунок 3 - РЛИ ВО (А) и сечения амплитуды РЛИ по координатам азимута (Б) и дальности (В) при $\Delta R = 30$ км, $\delta_0 = 1$ м с фазовой коррекцией

Причины и характер этих искажений объясняет рисунок 4, на котором представлены зависимости разностной дальности $\Delta r_{\Delta R}$ (3) между РО и ВО от текущей азимутальной координаты голограммы x, для значений пространственного разрешения РСА $\delta_o = 1$ м (А), $\delta_o = 0{,}5$ м (Б), $\delta_o = 0{,}25$ м (В) и различных значений выноса ВО по координате дальности.

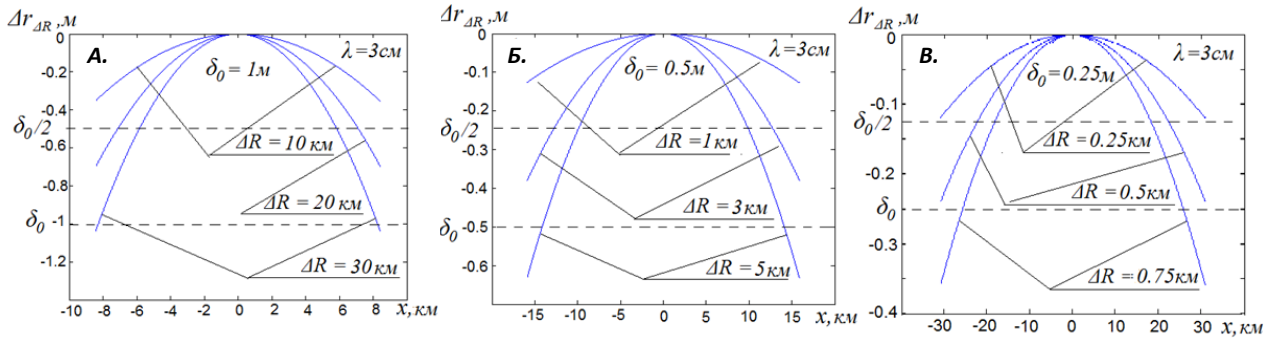


Рисунок 4 - Зависимости разностной дальности $\Delta r_{\Delta R}$ между РО и ВО от текущей азимутальной координаты x при пространственном разрешении РСА $\delta_o = 1$ м (А), $\delta_o = 0{,}5$ м (Б), $\delta_o = 0{,}25$ м (В)

Так, при простанственном разрешении РСА $\delta_o = 1$ м (рисунок 4А) разностная дальность $\Delta r_{\Delta R}$ между РО и ВО становится соизмеримой с величиной элемента разрешения при значениях выноса ВО по координате дальности $\Delta R > 10$ км, что приводит к «перетеканию» крайних участков голограммы в соседние элементы разрешения по дальности и искажению РЛИ ВО [2, 5].

При улучшении пространственного разрешения РСА до величины $\delta_o = 0.5$ м (рисунок 4Б) разностная дальность $\Delta r_{\Delta R}$ становится соизмеримой с величиной элемента разрешения δ_o уже при величинах выноса $\Delta R > 1$ км, что приводит к появлению геометрических искажений РЛИ, а при разрешении $\delta_o = 0.25$ м – при $\Delta R > 250$ м (рисунок 4В).

Полученные выше результаты свидетельствуют о том, что причиной искажения РЛИ ВО являются различия в геометрии волнового фронта РО и ВО, соизмеримые с величиной элемента разрешения по дальности. Поэтому устранение рассмотренных геометрических искажений может быть обеспечено путём применения не фазовой, а геометрической коррекции волнового фронта ретранслированного сигнала в соответствии с выражением (3).

При таком способе коррекции РЛИ ВО удаётся приблизить к виду, представленному на рисунке 1. Так, в качестве примера, на рисунке 5 показаны РЛИ точечного рассеивателя (А), а также сечения амплитуды РЛИ для разрешения $\delta_o = 0.25$ м при выносе ВО по дальности $\Delta R = 3$ км и проведённой геометрической коррекции голограммы.

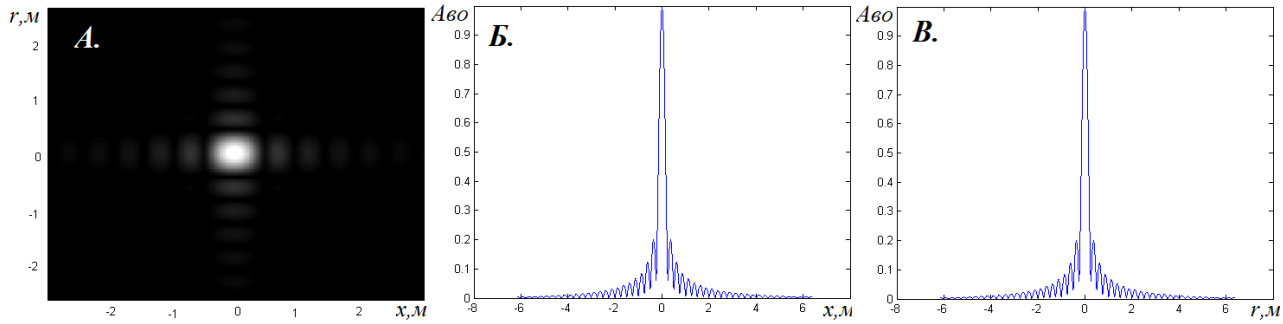


Рисунок 5 - РЛИ ВО (А) и сечения амплитуды РЛИ по координатам азимута (Б) и дальности (В) для $\Delta R = 3$ км, λ=3 см и $\delta_o = 0.25$ м, сформированное с учетом геометрической коррекции голограммы

В то же время при увеличении выноса ВО до величины $\Delta R > 10$ км и при пространственном разрешении РСА $\delta_o = 0.25$м наблюдается размытие РЛИ, как показано на рисунке 6 для $\Delta R = 30$ км.

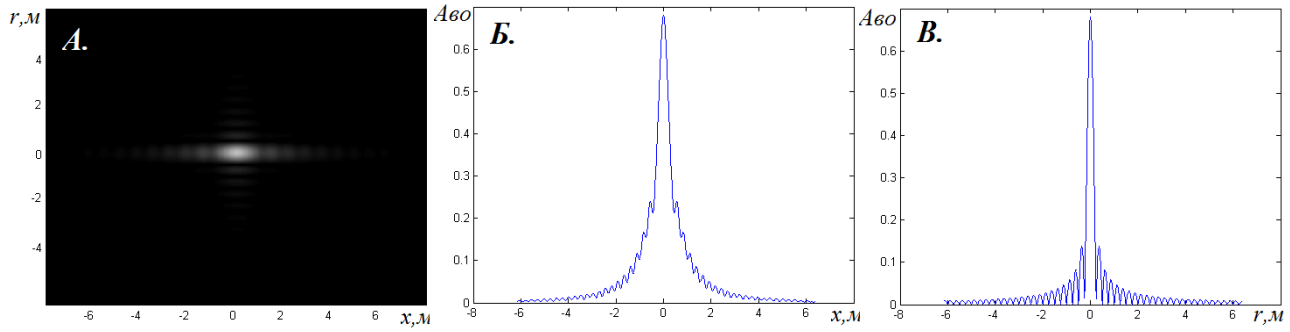


Рисунок 6 - РЛИ ВО (А) и сечения амплитуды РЛИ (Б) и (В) для $\Delta R = 30$ км, λ=3 см и $\delta_o = 0.25$ м, сформированное с учетом геометрической коррекции голограммы

В ходе моделирования установлено, что причиной указанного размытия РЛИ ВО является погрешность $\widetilde{\Delta r}_{\Delta R}$, возникающая при использовании двух первых членов разложения в ряд квадратных корней, присутствующих в выражениях (1) и (2). При этом различие в законах изменения дальности голограммы РО $r_{\text{ро}}(x)$ и ВО $r_{\text{во}}(x)$ перестаёт подчиняться квадратичной зависимости (3) при значительных интервалах синтезирования апертуры L_S.

В качестве примера на рисунке 7 представлены зависимости указанной погрешности $\widetilde{\Delta r}_{\Delta R}$ (рисунок 7А) и соответствующего ей фазового набега

$\widetilde{\Delta\varphi}_{\Delta R} = 4\pi \cdot \widetilde{\Delta r}_{\Delta R}/\lambda$ (рисунок 7Б) от текущей азимутальной координаты x для выноса ВО $\Delta R = 30$ км и пространственного разрешения РСА $\delta_o = 0.25$ м.

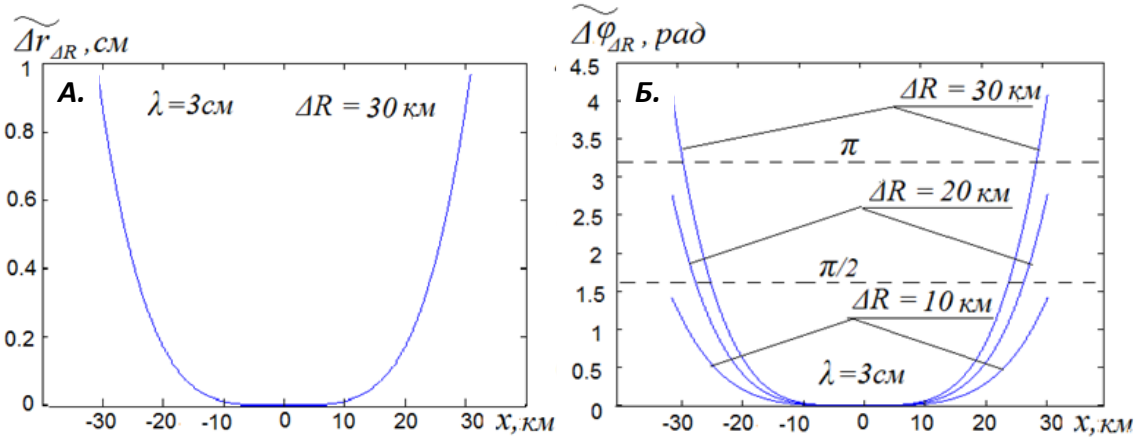


Рисунок 7 - Зависимость погрешности $\widetilde{\Delta r}_{\Delta R}$ (А) и соответствующего ей фазового набега $\widetilde{\Delta\varphi}_{\Delta R}$ от азимутальной координаты x для различных значений выноса ВО (Б)

Анализ представленного рисунка свидетельствует о том, что даже на краях голограммы величины погрешности $\widetilde{\Delta r}_{\Delta R}$ (рисунок 7А) при выносе ВО на ΔR=30 км составляют лишь доли сантиметра, однако соответствующий им фазовый набег $\widetilde{\Delta\varphi}_{\Delta R}$ (рисунок 7Б) оказывается превышающим величину π, что приводит к расфокусировке РЛИ ВО по координате азимута.

В результате моделирования установлено, что расфокусировка РЛИ ВО проявляется при выносах ВО ΔR, приводящих к величинам фазового набега $\widetilde{\Delta\varphi}_{\Delta R}$, превышающим $\pi/2$.

На рисунке 7Б представлены зависимости фазового набега $\widetilde{\Delta\varphi}_{\Delta R}$, соответствующего погрешности $\widetilde{\Delta r}_{\Delta R}$, от текущей азимутальной координаты x для различных величин выноса ВО ΔR при простанственном разрешении РСА $\delta_o = 0.25$ м.

Таким образом, результаты имитационного моделирования показали, что при длине волны λ=3 см и пространственном разрешении РСА $\delta_o = 0.25$ м фазовый набег $\widetilde{\Delta\varphi}_{\Delta R}$, соответствующий погрешности $\widetilde{\Delta r}_{\Delta R}$, превышает значение $\pi/2$ при величинах выноса ВО $\Delta R > 10$ км, что приводит к азимутальной расфокусировке РЛИ ВО.

Очевидно, что для достижения РЛИ ВО требуемого качества следует использовать корректирующую дальность, вычисленную непосредственно на

основе квадратных корней, присутствующих в выражениях (1) и (2). Данное положение подтверждено при моделировании РЛИ ВО.

Результаты имитационного моделирования характеристик РЛИ ВО при его выносе по координате азимут в прожекторном режиме работы РСА

Моделирование проводилось при тех же параметрах РСА, что и при моделировании ВО вынесенного по координате дальности. Величины выноса ВО составляли $\Delta X \approx \Delta X_{\text{макс}} = \pm\theta_{\text{г}} R_{\text{т}}/2 = \pm 900$ м для длины волны λ=3 см.

Применение геометрической коррекции волнового фронта голограммы ВО путём введения в ретранслируемый сигнал временной задержки в соответствии с выражением (13) позволяют получить неискажённое РЛИ (рисунок 1) в диапазоне λ=3 см при пространственном разрешении РСА $\delta_{\text{о}} = 1$ и 0.5 м во всём диапазоне заданных выносов ВО $\Delta X = \pm 900$ м.

В то же время, при улучшении пространственного разрешения РСА до величины $\delta_{\text{о}} = 0.25$ м неискажённое РЛИ ВО формируется при величинах азимутального выноса, не превышающих $\Delta X = \pm 200$ м.

В качестве примера на рисунке 8 представлено РЛИ точечного рассеивателя (А), а также сечения амплитуды РЛИ по азимуту (Б) и дальности (В) для разрешения $\delta_{\text{о}} = 0.25$ м при выносе ВО по азимуту $\Delta X = 450$ м и проведённой геометрической коррекции голограммы.

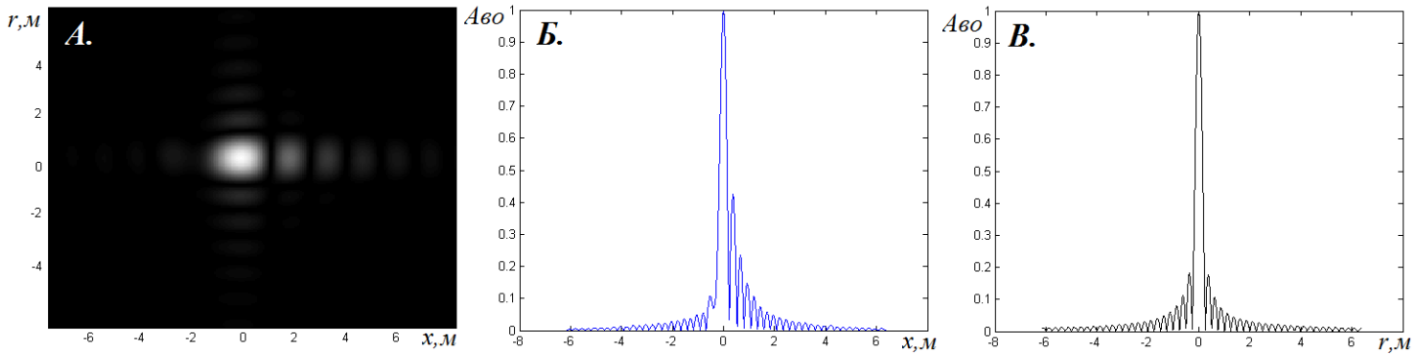


Рисунок 8 - РЛИ ВО (А) и сечения амплитуды РЛИ по координатам азимута (Б) и дальности (В) для $\Delta X = 450$ м, λ=3 см и $\delta_{\text{о}} = 0.25$ м

При тех же параметрах РСА увеличение азимутального выноса ВО до предельных величин $\Delta X = 900$ м приводит к росту геометрических искажений РЛИ, как показано на рисунке 9.

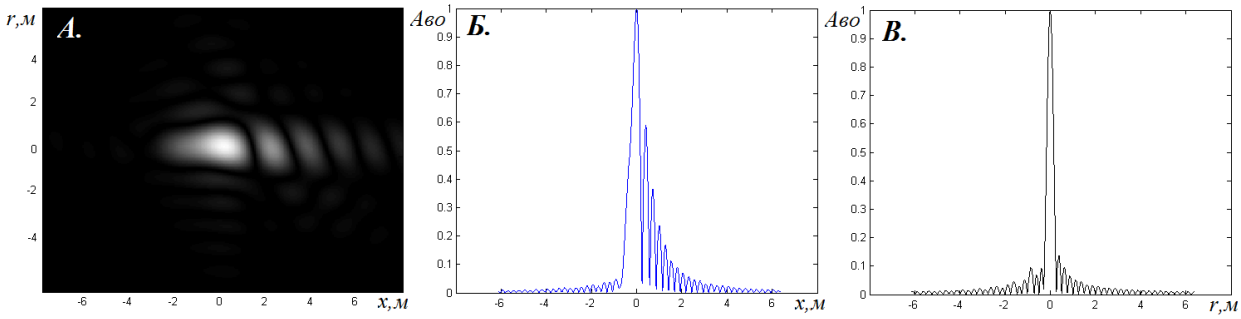


Рисунок 9 - РЛИ ВО (А) и сечения амплитуды РЛИ по координатам азимута (Б) и дальности (В) для $\Delta X = 900$ м, λ=3 см и $\delta_{\text{о}} = 0.25$ м

Анализ представленных рисунков показывает, что как и при выносе ВО по координате дальности ΔR, искажения РЛИ, обусловленных азимутальным выносом ВО ΔX, проявляются главным образом по азимутальной координате РЛИ.

Однако в отличие от искажений РЛИ, обусловленных выносом ВО по координате дальности ΔR, азимутальный вынос ВО ΔX приводит к асимметричному искажению РЛИ объекта. При этом вынос противоположного знака ΔX влечёт за собой зеркальное отображение РЛИ по координате азимута.

В ходе моделирования установлено, что, как и при выносе ВО по координате дальности ΔR, причиной указанных искажений РЛИ ВО является погрешность $\widetilde{\Delta r}_{\Delta X}$, возникающая при использовании двух первых членов разложения в ряд квадратных корней, присутствующих в выражениях (6) и (7). При этом различие $\Delta r_{\Delta X}(x)$ в законах изменения дальности голограммы РО $r_{\text{ро}}(x)$ и ретранслируемого транспондером сигнала $r_{\text{т}}(x)$ перестаёт подчиняться линейной зависимости (8) при значительных интервалах синтезирования апертуры L_S.

Таким образом, результаты моделирования показали, что избежать искажений РЛИ ВО можно при использовании корректирующей дальности, вычисленной не согласно аппроксимации (8), а непосредственно на основе квадратных корней, присутствующих в выражениях (6) и (7). В этом случае вид РЛИ ВО соответствует представленному на рисунке 1.

Заключение

Результаты проведенного моделирования позволяют сформулировать следующие выводы:

1. при выносе ВО по дальности достижение заданного качества РЛИ ВО требует применения геометрической коррекции волнового фронта ретранслированного сигнала, представляющей дополнительно вводимое квадратичное изменение дальности (задержки сигнала), приводящее одновременно к необходимой коррекции фазы голограммы ВО;

2. при высоком пространственном разрешении перекос голограммы, обусловленный рассогласованием закона изменения её фазы и геометрии при азимутальном выносе ВО ΔX, приводит к тому, что в каждом стробе дальности оказывается лишь часть голограммы, что в свою очередь приводит к размытию РЛИ ВО и требует применения геометрической коррекции волнового фронта ретранслированного сигнала;

3. при азимутальном выносе ВО ΔX геометрическая коррекция волнового фронта ретранслированного сигнала должна осуществляться путём введения дополнительного линейного изменения дальности (временной задержки ретранслированного сигналя), которое позволяет не только компенсировать геометрические различия голограмм ВО и РО, но и обеспечить дополнительный сдвиг доплеровского спектра, приводящий к формированию требуемой азимутальной координаты ВО ΔX;

4. при расчетах корректирующей задержки при формировании ВО в интересах калибровки РСА высокого разрешения ($\delta_0 = 0.5$ и лучше) вычисление корректирующих функций должно осуществляться на основе квадратных корней, присутствующих в выражениях (1), (2), (3) и (4), без использования квадратичной аппроксимации в соответствии с выражениями (3) и (8);

5. предложенный способ коррекции ретранслированного сигнала при формировании ВО позволяет существенно повысить достоверность выполнения задач калибровки космических РСА и оценки (верификации) их основных характеристик при использовании активных средств калибровки (транспондеров).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Евсеев В.И., Титов К.И., Колачев И.О. Вопросы обеспечения калибровки радиолокационных станций в системах дистанционного зондирования Земли // Информация и космос. 2023. № 4. С. 12–24.
2. Ильин, А.Л., Титов К.И. Искажения радиолокационного изображения при использовании активных ретрансляторов в задачах калибровки космических радиолокаторов с синтезированной апертурой // Труды Военно-космической акад. им. А.Ф. Можайского. 2021. № 680. С. 136–140.
3. Молчанов А.С., Коломоец В.А. Цифровые портреты типовых объектов воздушной разведки. М.: Издательство «Перо», 2025. 194 с.
4. Результаты экспериментальной оценки реально достижимых характеристик самолётной РСА / И.В. Сахно, А.Л. Ильин, К.И. Титов, А.В. Шульженко // Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды. СПб., 2012, С. 491–549. URL: https://www.mivlgu.ru/conf/armand2012/pdf/S4_16.pdf
5. Гусев С.Н., Сахно И.В., Хуббиев Р.В. Методика оценивания качества формирования виртуальных объектов на радиолокационных изображениях // Труды МАИ: электрон. журнал. 2019. № 104. URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=102169.
6. Гусев С.Н., Миклин Д.В. Модель имитатора тестовых радиолокационных сигналов авиационных систем обзора земной поверхности // Труды МАИ: электрон. журнал. 2020. № 112. URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=116355. DOI 10.34759/trd-2020-112-11.
7. Занин К.А. Разработка модели оценки пространственного разрешения космического радиолокатора синтезированной апертуры // Труды МАИ: электрон. журнал. 2017. № 96. URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=85931.

8. Ильин А.Л., Шульженко А.В., Шульженко А.Д. Принцип формирования тестовых локальных шумоподобных областей на радиолокационных изображениях путем переизлучения зондирующих сигналов с частичным разрушением их когерентности и требования к точности временной синхронизации работы ретранслятора при решении задач радиометрической калибровки радиолокаторов с синтезированной апертурой // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2022. № 4. С. 60–67.

9. Титов К.И., Шульженко А.В. Синхронизация работы ретранслятора радиолокационных сигналов на основе метода квази-согласованной фильтрации // Труды МАИ: электрон. журнал. 2024. № 139. URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=183463.

10. Ильин А.Л., Шульженко А.В., Шульженко А.Д. Особенности применения авиационных носителей при испытаниях космических радиолокационных средств землеобзора // Труды Военно-космической акад. им. А.Ф. Можайского. 2019. № 670. С. 159–163.

11. Ильин А.Л., Титов К.И., Шульженко А.В. Использование экспериментальных данных для оценки влияния некогерентного осреднения на дешифровочные свойства радиолокационных изображений // Труды Военно-космической акад. Им. А.Ф. Можайского. 2014. № 645. С. 113–116.

12. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В.С. Верба, Л.Б. Неронский, В.Г. Осипов, В.Э. Турук. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.

13. Мухтаров Э.И., Петров А.С. Анализ искажений, возникающих при фильтрации сигналов с линейной частотной модуляцией // Труды МАИ: электрон. журнал. 2024. № 135. URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=179690.

14. Гусев С.Н. Методика программного формирования траекторного сигнала при решении задачи калибровки радиолокационных систем с синтезированной апертурой антенны // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 6. С. 368-377.

15. Кондратенков Г.С. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. М.: Радиотехника, 2005. 368 с.

16. Альрубеи М.А. Сравнительный анализ способов интерполяции при оценке частоты дискретизированного гармонического сигнала // Труды МАИ: электрон. журнал. 2023. № 130. URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=174612. DOI 10.34759/trd-2023-130-15.

17. Сычев М.И., Осипов П.В. Траекторная обработка радиолокационной информации на основе многомодельного подхода // Труды МАИ: электрон. журнал. 2023. № 129. URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=173031. DOI 10.34759/trd-2023-129-19.

18. Короленко П.В., Рыжикова Ю.В. Моделирование и обработка случайных сигналов и структур. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2012. 67 с.

19. Cook Ch. E., Bernfeld M. Radar signals. London: Academic Press Inc, 1967, 531 p.

20. Linearity measurements of an accurate transponder for calibrating future spaceborne SAR systems / M. Jirousek, B.J. Döring, P. Looser, M. Schwerdt // Proc. of 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar Conference EUSAR-2012, Nuremberg, Germany. 2012. P. 67-70.

References

1. Evseev V.I., Titov K.I., Kolachev I.O. *Informatsiya i kosmos,* 2023, no. 4, pp. 12–24.

2. Ilyin, A.L., Titov K.I. *Trudy Voenno-kosmicheskoi akademii imeni A.F. Mozhaiskogo*, 2021, no. 680, pp. 136–140.

3. Molchanov A.S., Kolomoets V.A. *Tsifrovye portrety tipovykh ob''ektov vozdushnoi razvedki* [Digital portraits of typical aerial reconnaissance objects]. Moscow, Izdatel'stvo “Pero”, 2025, 194 p.

4. Sakhno I.V., Ilyin A.L., Titov K.I., Shulzhenko A.V. *Problemy voenno-prikladnoi geofiziki i kontrolya sostoyaniya prirodnoi sredy* [Problems of military-applied geophysics and environmental control], St. Petersburg, 2012, pp. 491–549. Available at: https://www.mivlgu.ru/conf/armand2012/pdf/S4_16.pdf.

5. Gusev S.N., Sakhno I.V., Khubbiev R.V. *Trudy MAI: elektron. zhurnal*, 2019, no. 104. Avialable at: https://trudymai.ru/published.php?ID=102169.

6. Gusev S.N., Miklin D.V. *Trudy MAI: elektron. zhurnal*, 2020, no. 112. Avialable at: https://trudymai.ru/published.php?ID=116355. DOI 10.34759/trd-2020-112-11.

7. Zanin K.A. *Trudy MAI: elektron. zhurnal,* 2017, no. 96. Avialable at: https://trudymai.ru/published.php?ID=85931.

8. Ilyin A.L., Shulzhenko A.V., Shulzhenko A.D. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2022, no. 4, pp. 60–67.

9. Titov K.I., Shulzhenko A.V. *Trudy MAI: elektron. zhurnal,* 2024, no. 139. Avialable at: https://trudymai.ru/published.php?ID=183463.

10. Ilyin A.L., Shulzhenko A.V., Shulzhenko A.D. *Trudy Voenno-kosmicheskoi akad. im. A.F. Mozhaiskogo,* 2019, no. 670, pp. 159–163.

11. Ilyin A.L., Titov K.I., Shulzhenko A.V. *Trudy Voenno-kosmicheskoi akad. im. A.F. Mozhaiskogo,* 2014, no. 645, pp. 113-116.

12. Verba V.S., Neronskiy L.B., Osipov B.G., Turuk V.E**.** *Radiolokatsionnye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya* [Space-based earth survey radar systems]. Moscow, Radiotekhnika, 2010, 680 p.

13. Mukhtarov E.I., Petrov A.S. *Trudy MAI: elektron. zhurnal,* 2024, no. 135. Avialable at: https://trudymai.ru/published.php?ID=179690.

14. Gusev S.N. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki,* 2017, no. 6, pp. 368–377.

15. Kondratenkov G.S. *Radiovidenie. Radiolokatsionnye sistemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli* [Radio vision. Radar systems for remote sensing of the Earth]. Moscow, Radiotekhnika, 2005, 368 p.

16. Al'rubei M.A. *Trudy MAI: elektron. zhurnal*, 2023, no. 130. Avialable at: https://trudymai.ru/published.php?ID=174612. DOI 10.34759/trd-2023-130-15.

17. Sychev M.I., Osipov P.V.*Trudy MAI: elektron. zhurnal*, 2023, no. 129. Avialable at: https://trudymai.ru/published.php?ID=173031. DOI 10.34759/trd-2023-129-19.

18. Korolenko P.V., Ryzhikova Yu.V. *Modelirovanie i obrabotka sluchainykh signalov i struktur* [Modeling and processing of random signals and structures]. Moscow, MGU im. M.V. Lomonosova, 2012, 67 p.

19. Cook Ch. E., Bernfeld M. *Radar signals*, London, Academic Press Inc, 1967, 531 p.

20. Jirousek M., Döring B.J., Looser P., Schwerdt M. Linearity measurements of an accurate transponder for calibrating future spaceborne SAR systems. *Proc. of 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar Conference EUSAR-2012, Nuremberg, Germany*, 2012, pp. 67–70.

Информация об авторах

Константин Игоревич Титов, кандидат технических наук, начальник 45 отдела военного института (научно-исследовательского), Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского; г. Санкт-Петербург, Россия; e-mail: vka@mil.ru

Андрей Викторович Шульженко, кандидат технических наук; начальник 453 лаборатории военного института (научно-исследовательского), Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского; г. Санкт-Петербург, Россия; e-mail: vka@mil.ru

Сергей Николаевич Гусев, кандидат технических наук, начальник 451 лаборатории военного института (научно-исследовательского), Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского; г. Санкт-Петербург, Россия; e-mail: vka@mil.ru

Information about the authors

Konstantin I. Titov, Candidate of Technical Sciences, Head of Department 45, Military Institute (Research), Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia; e-mail: vka@mil.ru

Andrey V. Shulzhenko, Candidate of Technical Sciences, Head of Laboratory 453, Military Institute (Research), Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia; e-mail: vka@mil.ru

Sergey N. Gusev, Candidate of Technical Sciences, Head of Laboratory 451, Military Institute (Research), Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia; e-mail: vka@mil.ru

Получено 18 февраля 2026 ● Принято к публикации 08 июня 2026 ● Опубликовано 28 октября 2026
Received 18 February 2026 ● Accepted 08 June 2026 ● Published 28 October 2026