

Труды МАИ. 2024. № 139  
Trudy MAI. 2024. No. 139. (In Russ.)

Научная статья  
УДК 621.396.96  
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=183463>  
EDN: <https://www.elibrary.ru/TGJWKQ>

## **СИНХРОНИЗАЦИЯ РАБОТЫ РЕТРАНСЛЯТОРА РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА КВАЗИ-СОГЛАСОВАННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ**

**Константин Игоревич Титов<sup>1</sup>, Андрей Викторович Шульженко<sup>2</sup>**✉

<sup>1,2</sup>Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>[vka@mil.ru](mailto:vka@mil.ru)✉

*Аннотация.* В статье представлены требования к точности временной синхронизации работы активных средств калибровки радиолокаторов с синтезированной апертурой с периодом следования зондирующих импульсов. Предлагается метод обеспечения требуемой точности синхронизации на основе метода квази-согласованной фильтрации принимаемых ретранслятором зондирующих импульсов. Предложена схема построения устройства синхронизации. Представлены аналитические выражения, характеризующие эффективность применения предложенного метода.

**Ключевые слова:** радиолокатор с синтезированной апертурой, радиометрическая калибровка, ретранслятор, устройство синхронизации, квази-согласованная фильтрация

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

Original article

## SYNCHRONIZATION OF THE RADAR SIGNAL REPEATER OPERATION BASED ON THE QUASI-MATCHED FILTERING METHOD

**Konstantin I. Titov<sup>1</sup>, Andrey V. Shulzhenko<sup>2</sup>**✉

<sup>1,2</sup>Military space Academy named after A.F. Mozhaisky,  
Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup>[vka@mil.ru](mailto:vka@mil.ru)✉

**Abstract.** The article presents the principle of forming test noise-like areas on radar images. The areas have a limited size and are characterized by specified average brightness values. It is being developed for radiometric calibration of space-based synthetic-aperture radars. The principle of forming test noise-like areas is based on the partial (controlled) destruction of the coherence of relayed signals. Time synchronization of the repeater operation with the repetition period of the probing pulses is necessary for its implementation. High

requirements for time synchronization accuracy amount to units of nanoseconds and cannot be met by a classical threshold amplitude detector.

The aim of the work is to ensure the required accuracy of synchronization of the active calibration means. To achieve the aim, a special device can be used, the basis of which is a filter of radar probe pulses. The main problem of the work is to develop such a filter.

To solve the problem, quasi-matched filtering of probing pulses is used. In a quasi-matched filter, in the absence of a priori information on the amplitude-frequency characteristic of probing signals, the preceding complex-conjugate pulse is used to convolve each subsequent pulse.

The result of the work is proposals for the design of a device for synchronizing the operation of active means of calibration of synthetic-aperture radar based on quasi-matched filtering, as well as an assessment of the efficiency of the application of the proposed method.

The developed method of quasi-matched filtering was tested in the course of analytical and simulation modeling. The results of modeling show that the required accuracy of time synchronization of the repeater can be ensured by using a synchronization device based on the proposed method when solving the problem of forming test noise-like areas on radar images for their radiometric calibration.

The proposed method of quasi-matched filtering of probing radar pulses can be used for:

- developing active means of calibrating synthetic-aperture radar and assessing the radiometric resolution of radar images;
- conducting a technical analysis of probing pulses of prototypes of space radar means for remote sensing of the Earth during flight tests.

**Keywords:** synthetic aperture radar; radiometric calibration; relay; synchronization device; quasi-coherent filtering

**For citation:** Titov K.I., Shulzhenko A.V. Synchronization of the radar signal repeater operation based on the quasi-matched filtering method. *Trudy MAI*. 2024. No. 139. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=183463>

## **Введение**

Одним из основных показателей, характеризующих способность радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) наблюдать слабоконтрастные площадные объекты, являются радиометрическое разрешение и радиометрическая чувствительность, которые должны быть оценены в процессе калибровки средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Для калибровки радиолокационных средств ДЗЗ все большее распространение находят активные ретрансляторы зондирующих импульсов (ЗИ). С их помощью на РЛИ могут быть сформированы как тестовые точечные отметки с целью амплитудной калибровки РЛИ и определения пространственного разрешения на местности [1, 2, 11, 12, 20], так и тестовые шумоподобные области заданной интенсивности для решения задач радиометрической калибровки и оценки радиометрического разрешения [3, 4].

Принцип и алгоритм формирования тестовых шумоподобных областей на основе ретрансляции ЗИ с частичным разрушением их когерентности представлены

в работах [3, 4]. При этом результаты моделирования, представленные в [5], свидетельствуют, что формирование на РЛИ тестовых шумоподобных областей связано с необходимостью осуществления временной синхронизации работы ретранслятора с моментами прихода ЗИ РСА. Ошибки определения момента регистрации переднего фронта ЗИ приводят к тому, что размер РЛИ тестовой области по координате азимута остается постоянным, а по координате наклонной дальности существенно зависит от величины указанных ошибок.

В ходе имитационного моделирования [5], было установлено, что требуемая точность временной синхронизации, обеспечивающая формирование тестовой области с ухудшением размера по координате наклонной дальности не более чем на 10% определяется выражением (1):

$$\sigma_t \leq 0.1 \cdot \tau_{\text{и}} \cdot \delta_r / \Delta R_{\text{обл}}, \quad (1)$$

где  $\sigma_t$  – среднеквадратическое отклонение (СКО) момента обнаружения ЗИ;

$\tau_{\text{и}}$  – длительность зондирующего импульса РСА;

$\Delta R_{\text{обл}}$  – задаваемый размер РЛИ тестовой области по координате наклонной дальности.

Выражение (1) позволяет сделать количественные оценки необходимой точности синхронизации момента запуска ГМФ с моментом обнаружения ЗИ. Так, например, при  $\tau_{\text{и}} = 10$  мкс,  $\delta_r = 0.5$  м СКО момента обнаружения ЗИ должно быть не более  $\sigma_t \leq 10$  нс (для  $\Delta R_{\text{обл}} = 50$  м);  $\sigma_t \leq 5$  нс (для  $\Delta R_{\text{обл}} = 100$  м) и  $\sigma_t \leq 1$  нс (для  $\Delta R_{\text{обл}} = 500$  м).

Очевидно, что предъявляемые требования к точности определения момента прихода ЗИ весьма высокие, и не могут быть обеспечены использованием в ретрансляторе обычного порогового обнаружителя.

Требуемая точность временной синхронизации может быть обеспечена технической реализацией метода квази-согласованной фильтрации (КСФ) принимаемых ЗИ РСА.

### 1. Устройство синхронизации на основе квази-согласованного фильтра

При достаточно высоких требованиях к точности временной синхронизации работы ретранслятора с ЗИ РСА техническая реализация устройства, обеспечивающего указанные требования, должна представлять собой последовательно включённые фильтр, детектор огибающей и пороговое устройство (рисунок 1). По превышению уровня сигнала порогового значения выдается управляющий синхроимпульс на запуск генератора модулирующей функции (ГМФ), задачей которого является частичное разрушение когерентности ретранслируемого сигнала.



Рисунок 1. Обобщенная схема устройства синхронизации

Задачей фильтра, входящего в устройство синхронизации, является повышение отношения сигнал/шум  $q$  [6, 10, 13, 21] на входе порогового устройства, которое равно:

$$q = P_{\text{и}}/P_N = P_{\text{и}}/\sigma_{\text{ш}}^2, \quad (2)$$

где  $P_{\text{и}}$  – мощность обнаруживаемого импульса;

$\sigma_{\text{ш}}$  – СКО шума на выходе фильтра, снижение которого приводит к росту величины  $q$ .

Поскольку устройство синхронизации должно реализовывать временную привязку запуска ГМФ к моменту прихода каждого ЗИ, то выбор параметров фильтра должен обеспечивать вероятность правильного обнаружения импульса [9, 14, 16]:

$$P_{\text{обн}} = P_{\text{лт}}^{\frac{1}{q}} \rightarrow 1, \quad (3)$$

при вероятностях ложной тревоги  $P_{\text{лт}} \rightarrow 0$  и пропуска сигнала  $P_{\text{пс}} \rightarrow 0$ .

В свою очередь задачей порогового устройства является определение моментов времени  $t_{\text{пф}}$  и  $t_{\text{зф}}$ , соответствующих переднему и заднему фронтам обнаруживаемого импульса при равенстве амплитуды сигнала на выходе фильтра  $u_c$  заданному порогу  $u_{\text{пор}}$ .

Очевидно, что оценка времени фиксации фронта импульса  $t_{\text{ф}}$  связана с пороговым значением его амплитуды  $u_{\text{пор}}$  соотношением:

$$t_{\text{ф}} = u_{\text{пор}}/K_{\text{ф}}, \quad (4)$$

где  $K_{\text{ф}} = du/dt$  – крутизна передаточной характеристики применяемого фильтра.

Последнее равенство позволяет считать, что СКО  $\sigma_t$  оценки времени фиксации фронта импульса и СКО  $\sigma_u$  его амплитуды [6, 13, 19] соотносятся как  $\sigma_t = \sigma_u/K_{\text{ф}}$ .

Таким образом, повышение точности синхронизации работы ГМФ с моментами приема ЗИ РСА может быть достигнуто выбором фильтра с максимальной крутизной передаточной характеристики ( $K_{\text{ф}} = \text{max}$ ) при выполнении условия (3).

Так, например, если передаточная характеристика фильтра описывается функцией вида  $\sin(x)/x$ , то её максимальная крутизна достигается при  $x = 2.08$  и соответствует амплитуде  $\sin(x)/x = 0.42$ . При передаточной характеристике фильтра вида  $\exp(-x^2)$  максимальная крутизна характеристики достигается при  $x = 0.707$  и соответствует величине амплитуды  $\exp(-x^2) = 0.61$ .

Выдвинутым выше требованиям к характеристике фильтра наилучшим образом удовлетворяет согласованный фильтр (СФ) [6, 13, 17, 18], который реализует свёртку принимаемого сигнала с комплексно-сопряжённой ему функцией. Однако в силу того, что устройство синхронизации должно обеспечивать обнаружение импульсов с априорно неизвестной амплитудно-частотной характеристикой, техническая реализация такого фильтра крайне затруднена.

В то же время, как показывает практический опыт [7, 8, 9], амплитудно-частотная характеристика ЗИ остаётся неизменной за время сеанса наблюдения РСА. Это позволяет использовать предшествующий ЗИ для его свёртки с последующим и реализовать алгоритм КСФ.

Метод КСФ может быть реализован с помощью устройства, блок-схема которого представлена на рисунке 2.



Рисунок 2. Блок-схема устройства синхронизации на основе КСФ



Импульсный сигнал с выхода квадратурного детектора (КвД) приемного устройства (ПРМ) после операции комплексного сопряжения (замены знака в  $\sin$  –й квадратуре) задерживается линией задержки на время  $t_{\text{зад}} \approx T_{\text{пи}}$ , примерно равное периоду повторения импульсов.

Операция КСФ реализуется коррелятором путём свёртки задержанного импульса с последующим ЗИ, поступающим на коррелятор из регистра.

После выделения огибающей пороговое устройство определяет моменты времени  $t_{\text{пф}}$  и  $t_{\text{зф}}$ , соответствующие переднему и заднему фронтам импульса, формируемого коррелятором. Запуск ГМФ осуществляется синхроимпульсом, генерируемым в момент времени  $t_{\text{си}} = (t_{\text{пф}} + t_{\text{зф}})/2$ .

## **2. Сравнительная оценка эффективности применения устройства синхронизации на основе квази-согласованного фильтра**

Поскольку опорная функция, используемая при свёртке с принимаемым ЗИ, формируется путём задержки принимаемого импульса, то основным недостатком КСФ по сравнению с согласованной фильтрацией является наличие дополнительных шумов, присутствующих в опорной функции.

Так, если на входе согласованного фильтра присутствует аддитивная смесь сигнала  $\dot{s}$ , имеющего амплитуду  $S = |\dot{s}|$ , и шума  $\dot{n}$ , то сигнал на его выходе также содержит сигнальную  $\dot{s}_{\text{сф}}$  и шумовую  $\dot{n}_{\text{сф}}$  составляющие, которые можно записать в виде:

$$\dot{u}_{\text{сф}}(\tau) = \int [\dot{s}(t) + \dot{n}(t)] \cdot \dot{e}(t + \tau) dt = \dot{s}_{\text{сф}}(\tau) + \dot{n}_{\text{сф}}(\tau), \quad (5)$$

где  $\dot{e}$  – опорная функция единичной амплитуды, комплексно-сопряжённая с входным сигналом  $\dot{e} = \text{conj}(\dot{s})/S$ .

Амплитуду входного импульса можно представить в виде  $S = \sigma_n \sqrt{q_{\text{вх}}}$ , где  $\sigma_n$  – СКО шума,  $q_{\text{вх}} = S^2/\sigma_n^2$  – отношение сигнал/шум на входе фильтра. Тогда отношение сигнал/шум  $q_{\text{сф}}$  на выходе СФ определяется в соответствии с выражением:

$$q_{\text{сф}} = P_{\text{Ссф}}/P_{\text{Нсф}} = B \cdot S^2/\sigma_n^2 = B \cdot q_{\text{вх}}, \quad (6)$$

где  $P_{\text{Ссф}}$  и  $P_{\text{Нсф}}$  – мощности сигнала и шума на выходе фильтра.

Основным отличием КСФ от СФ является наличие шума в опорной функции, поскольку в качестве её используется предшествующий ЗИ  $\dot{s}_1$ , комплексно сопряжённый с текущим сигналом  $\dot{s}_2$ . Тогда сигнал на выходе КСФ можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \dot{u}_{\text{ксф}}(\tau) &= \int [\dot{s}_1(t) + \dot{n}_1(t)] \cdot [\dot{s}_2(t + \tau) + \dot{n}_2(t + \tau)]^* dt = \\ &= \dot{s}_{\text{ксф}}(\tau) + \dot{n}_{\text{ксф1}}(\tau) + \dot{n}_{\text{ксф2}}(\tau) + \dot{n}_{\text{ксф3}}(\tau), \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\dot{s}_{\text{ксф}}$  – полезный сигнал, являющийся результатом свёртки сигнальных компонент  $\dot{s}_1$  и  $\dot{s}_2$ , амплитуда которого в отличие от СФ равна  $S_{\text{ксф}} = B \cdot S_{\text{вх}}^2 = B \cdot \sigma_n^2 q_{\text{вх}}$ , а мощность  $P_{\text{Сксф}} = S_{\text{ксф}}^2 = B^2 \cdot \sigma_n^4 \cdot q_{\text{вх}}^2$ .

В свою очередь  $\dot{n}_{\text{ксф1}}$ ,  $\dot{n}_{\text{ксф2}}$ ,  $\dot{n}_{\text{ксф3}}$  представляют собой сумму шумовых компонент, из которых  $\dot{n}_{\text{ксф1}}$  и  $\dot{n}_{\text{ксф2}}$  являются результатом свёртки шума, присутствующего в сигнале  $\dot{n}_1$  и в опорной функции  $\dot{n}_2$ , с сигнальными

составляющими входного  $\dot{s}_1$  и опорного  $\dot{s}_2$  сигналов. Компонента  $\dot{n}_{\text{кcf3}}$  есть автокорреляционная функция шумов ( $\dot{n}_1$  и  $\dot{n}_2$ ).

В силу статистической независимости шумов входного сигнала и опорной функции суммарную мощность шума можно представить в виде:

$$P_{N_{\text{кcf}}} = P_{N_{\text{кcf1}}} + P_{N_{\text{кcf2}}} + P_{N_{\text{кcf3}}} . \quad (8)$$

Если длительность действия шума опорной функции  $t_{n2}$  равна длительности сигнальной компоненты  $t_{s2}$  и, соответственно, равна длительности ЛЧМ импульса  $t_{n2} = t_{s2} = \tau_{\text{имп}}$ , то  $P_{N_{\text{кcf1}}} = P_{N_{\text{кcf2}}}$ .

Однако, если длительность опорной функции превышает длительность её сигнальной компоненты ( $t_{n2} > t_{s2} = \tau_{\text{и}}$ ), то это влечёт за собой пропорциональный рост шума в сигнале на выходе КСФ. В этом случае мощность шума, являющегося результатом свёртки шума, присутствующего в сигнале  $\dot{n}_1$  с сигнальной составляющей опорной функции  $\dot{s}_2$ , аналогично согласованной фильтрации равна:

$$P_{N_{\text{кcf1}}} = B \cdot q_{\text{вх}} \cdot \sigma_n^4 . \quad (9)$$

В свою очередь мощность шума, являющегося результатом свёртки шума, присутствующего в опорной функции  $\dot{n}_2$  с сигнальной составляющей входного импульса  $\dot{s}_1$ , есть:

$$P_{N_{\text{кcf2}}} = B \cdot q_{\text{вх}} \cdot \sigma_n^4 \cdot L , \quad (10)$$

где  $L = t_{n2}/t_{s2} = t_{n2}/\tau_{\text{и}}$  – отношение длительности сигнальной компоненты  $t_{s2} = \tau_{\text{и}}$  к длительности действия шума  $t_{n2}$  в опорной функции. Соответственно последняя шумовая составляющая равна:

$$P_{N_{\text{КСФ}3}} = B \cdot \sigma_n^4 \cdot L. \quad (11)$$

А отношение сигнал/шум  $q_{\text{КСФ}}$  на выходе КСФ будет определяться выражением:

$$q_{\text{КСФ}} = \frac{P_{S_{\text{КСФ}}}}{P_{N_{\text{КСФ}1}} + P_{N_{\text{КСФ}2}} + P_{N_{\text{КСФ}3}}} = \frac{q_{\text{СФ}}}{1 + 2L/q_{\text{ВХ}}} = q_{\text{СФ}} \cdot \mu, \quad (12)$$

где  $\mu = 1/(1 + 2L/q_{\text{ВХ}})$  – коэффициент, характеризующий ухудшение отношения сигнал/шум при использовании КСФ по сравнению с СФ.

При  $L = 0$   $\mu = 1$  КСФ сводится к согласованной фильтрации. Однако при реализации метода КСФ параметр  $L \geq 1$ , а случай  $L = 1$  соответствует абсолютно точному знанию длительности ЗИ, позволяющему устранить излишний шум в опорной функции ( $t_{n2} = t_{s2} = \tau_n$ ).

В то же время, степень ухудшения отношения сигнал/шум при использовании КСФ по сравнению с СФ  $\mu$  существенным образом зависит от отношения сигнал/шум на входе фильтра  $q_{\text{ВХ}}$ .

В качестве примера на рисунке 3 показана расчётная зависимость коэффициента  $\mu$  от отношения сигнал/шум на входе фильтра  $q_{\text{ВХ}}$  для значений параметра  $L = 1, 2, 4, 10$ .

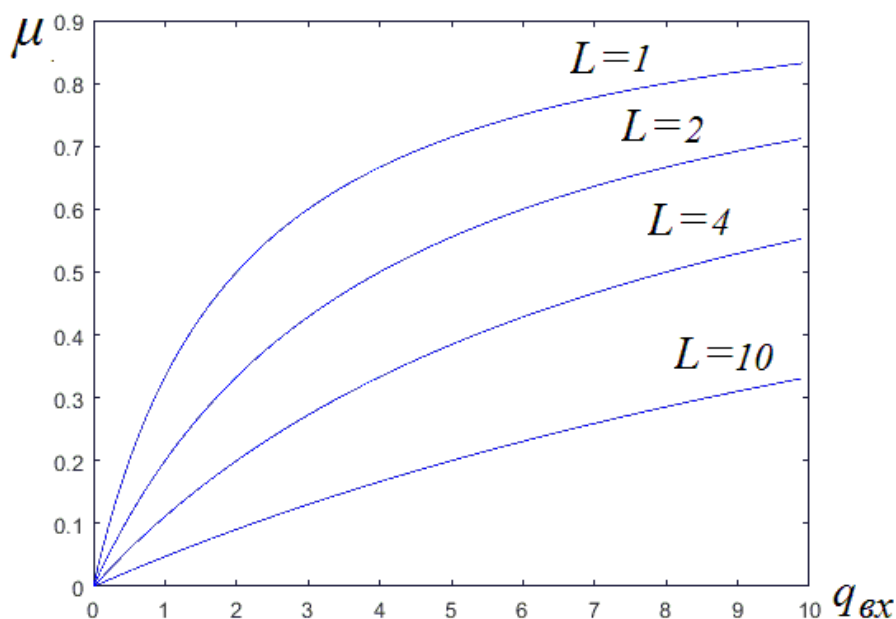


Рисунок 3. Зависимость коэффициента  $\mu$  от отношения сигнал/шум на входе фильтра  $q_{вх}$

Анализ представленного рисунка показывает, что при использовании КСФ отношение сигнал/шум на выходе фильтра существенно зависит от точности знания длительности ЗИ и соответствующего выбора длительности опорного сигнала (параметр  $L$ ). При росте отношения сигнал/шум на входе фильтра  $q_{вх}$  эффективность применения КСФ приближается к эффективности согласованного фильтра ( $\mu = 1$ ), однако скорость указанного приближения тем выше, чем длительность опорной функции ближе к длительности ЛЧМ импульса ( $L=1$ ).

### Заключение

Таким образом, требуемая точность синхронизации работы ретранслятора с ЗИ РСА при решении задачи формирования на РЛИ тестовых шумоподобных областей в интересах радиометрической калибровки радиолокационных средств ДЗЗ, может

быть обеспечена применением устройства синхронизации на основе метода КСФ. В тоже время, для реализации указанного метода требуется либо априорное знание длительности ЗИ и периода их следования, либо их оперативное уточнение в процессе приема сигнала. Для определения допустимых погрешностей в определении значений указанных параметров, а также допустимого отношения сигнал/шум  $q_{вх}$  на входе фильтра, обеспечивающих решение поставленной задачи с требуемой точностью, необходимо проведение дополнительных исследований с привлечением методов имитационного моделирования.

### **Список источников**

1. Сахно И.В., Ильин А.Л., Титов К.И., Шульженко А.В. Результаты экспериментальной оценки реально достижимых характеристик самолётной РСА. URL: [https://www.mivlgu.ru/conf/armand2012/pdf/S4\\_16.pdf](https://www.mivlgu.ru/conf/armand2012/pdf/S4_16.pdf)
2. Гусев С.Н., Сахно И.В., Хуббиев Р.В. Методика оценивания качества формирования виртуальных объектов на радиолокационных изображениях // Труды МАИ. 2019. № 104. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=102169>
3. Гусев С.Н., Миклин Д.В. Модель имитатора тестовых радиолокационных сигналов авиационных систем обзора земной поверхности // Труды МАИ. 2020. № 112. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=116355>. DOI: [10.34759/trd-2020-112-11](https://doi.org/10.34759/trd-2020-112-11)

4. Занин К.А. Разработка модели оценки пространственного разрешения космического радиолокатора синтезированной апертуры // Труды МАИ. 2017. № 96.  
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=85931>
5. 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.
6. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. - Москва: Радио и связь, 1989. - 656 с.
7. Ильин А.Л., Шульженко А.В., Шульженко А.Д. Особенности применения авиационных носителей при испытаниях космических радиолокационных средств землеобзора // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2019. № 670. С. 159-163.
8. 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 академии имени А.Ф. Можайского. 2014. № 645. С. 113-116.
9. Верба В.С., Неронский Л.Б, Осипов В.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. – Москва: Радиотехника, 2010. – 680 с.

10. Мухтаров Э.И., Петров А.С. Анализ искажений, возникающих при фильтрации сигналов с линейной частотной модуляцией // Труды МАИ. 2024. № 135. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=179690>
11. 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.
12. Горбунова А.А. Разработка алгоритма получения точечного портрета сложной цели по комплексному радиолокационному изображению // Труды МАИ. 2011. № 45. URL: [https://trudymai.ru/published.php?ID=25366&PAGEN\\_2=2](https://trudymai.ru/published.php?ID=25366&PAGEN_2=2)
13. Ширман Я.Д. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория: справочник. – Москва: Изд-во Радиотехника. 2007. – 510 с.
14. Кондратенков Г.С. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. - Москва: Радиотехника, 2005. - 368 с.
15. Альрубей М.А. Сравнительный анализ способов интерполяции при оценке частоты дискретизированного гармонического сигнала // Труды МАИ. 2023. № 130. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=174612>. DOI: [10.34759/trd-2023-130-15](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-15)
16. Волосюк В.К., Павликов В.В. Цифровые методы обработки информационных процессов. - Харьков: Харьковский авиационный институт, 2012. Т. 2. - 78 с.
17. Сычев М.И., Осипов П.В. Траекторная обработка радиолокационной информации на основе многомодельного подхода // Труды МАИ. 2023. № 129. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=173031>. DOI: [10.34759/trd-2023-129-19](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-19)



18. Короленко П.В., Рыжикова Ю.В. Моделирование и обработка случайных сигналов и структур. – Москва: МГУ имени М.В. Ломоносова, 2012. – 67 с.
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.
21. Liu Chun-Yang, Jiao Yong-Chang. SAR Echo-wave Signal Simulation Systems Based on MATLAB // International Conference Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), 2012, vol. 5. pp. 1-4. DOI: [10.1109/ICMMT.2012.6230417](https://doi.org/10.1109/ICMMT.2012.6230417)

## References

1. Sakhno I.V., Il'in A.L., Titov K.I., Shul'zhenko A.V. *Rezultaty eksperimental'noi otsenki real'no dostizhimykh kharakteristik samoletnoi RSA* (The results of the experimental evaluation of the realistically achievable characteristics of the aircraft radar). URL: [https://www.mivlgu.ru/conf/armand2012/pdf/S4\\_16.pdf](https://www.mivlgu.ru/conf/armand2012/pdf/S4_16.pdf)
2. Gusev S.N., Sakhno I.V., Khubbiev R.V. Methodology for assessing the quality of formation of virtual objects on radar images. *Trudy MAI*. 2019. No. 104. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=102169>

3. Gusev S.N., Miklin D.V. A simulator model of test radar signals of aviation ground survey systems. *Trudy MAI*. 2020. No. 112. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=116355>. DOI: [10.34759/trd-2020-112-11](https://doi.org/10.34759/trd-2020-112-11)
4. Zanin K.A. Development of a model for estimating the spatial resolution of a synthetic aperture space radar. *Trudy MAI*. 2017. No. 96. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=859315>
5. Il'in A.L., Shul'zhenko A.V., Shul'zhenko A.D. The principle of forming test local noise-like regions on radar images by re-emitting probing signals with partial destruction of their coherence and requirements for the accuracy of time synchronization of repeater operation when solving problems of radiometric calibration of radars with synthesized aperture. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*. 2022. No. 4. P. 60–67. (In Russ.).
6. Levin B.R. *Teoreticheskie osnovy statisticheskoi radiotekhniki* (Theoretical foundations of statistical radio engineering). Moscow: Radio i svyaz' Publ., 1989. 656 p.
7. Il'in A.L., Shul'zhenko A.V., Shul'zhenko A.D. Features of the use of aircraft carriers in testing space radar survey equipment. *Trudy Voенno-kosmicheskoi akademii imeni A.F.Mozhaiskogo*. 2019. No. 670. P. 159-163. (In Russ.).
8. Il'in A.L., Titov K.I., Shul'zhenko A.V. Using experimental data to assess the effect of incoherent averaging on the decoding properties of radar images. *Trudy Voенno-kosmicheskoi akademii imeni A.F. Mozhaiskogo*. 2014. No. 645. P. 113-116. (In Russ.).
9. Verba V.S., Neronskii L.B, Osipov B.G., Turuk V.E. *Radiolokatsionnye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya* (Space borne radar systems for terrestrial observation). Moscow: Radiotekhnika Publ., 2010. 680 p.

10. Mukhtarov E.I., Petrov A.S. Analysis of distortions that occur when filtering signals with linear frequency modulation. *Trudy MAI*. 2024. no. 135. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=179690>
11. Gusev S.N. The method of software formation of the trajectory signal in solving the problem of calibration of radar systems with synthesized antenna aperture. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2017. No. 6. P. 368-377. (In Russ.).
12. Gorbunova A.A. Development of an algorithm for obtaining a point portrait of a complex target based on a complex radar image. *Trudy MAI*. 2011. No. 45. (In Russ.). URL: [https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=25366&PAGEN\\_2=2](https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=25366&PAGEN_2=2)
13. Shirman Ya.D. *Radioelektronnye sistemy. Osnovy postroeniya i teoriya* (Radioelectronic systems. Fundamentals of construction and theory: a reference book). Moscow: Radiotekhnika Publ., 2007. 510 p.
14. Kondratenkov G.S. *Radiovidenie. Radiolokatsionnye sistemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli* (Radio vision. Radar Systems for Earth Remote Sensing). Moscow: Radiotekhnika Publ., 2005. 368 p.
15. Al'rubei M.A. Comparative analysis of interpolation methods for estimating the frequency of a sampled harmonic signal. *Trudy MAI*. 2023. No. 130. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=174612>. DOI: [10.34759/trd-2023-130-15](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-15)
16. Volosyuk V.K., Pavlikov V.V. *Tsifrovye metody obrabotki informatsionnykh protsessov. V. 2* (Digital methods for informatio processes processing. V. 2). Khar'kov: Khar'kovskii aviatsionnyi institut Publ., 2012. 78 p.

17. Sychev M.I., Osipov P.V. Trajectory processing of radar information based on a multi-model approach. *Trudy MAI*. 2023. No. 129. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=173031>. DOI: [10.34759/trd-2023-129-19](https://doi.org/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 imeni M.V. Lomonosova Publ., 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. P. 67 70.
21. Liu Chun-Yang, Jiao Yong-Chang. SAR Echo-wave Signal Simulation Systems Based on MATLAB. *International Conference Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, Shenzhen, China, 2012. V. 5, P. 1-4. DOI: [10.1109/ICMMT.2012.6230417](https://doi.org/10.1109/ICMMT.2012.6230417)

Статья поступила в редакцию 07.07.2024

Одобрена после рецензирования 09.09.2024

Принята к публикации 25.12.2024

The article was submitted on 07.07.2024; approved after reviewing on 09.09.2024; accepted for publication on 25.12.2024