

Методика оценки количества винтов в мультикоптере на основе анализа сигнала вторичной модуляции

Е. С. Плотницкая^{1✉}, С. Р. Гейстер², В. И. Веремьев¹

¹ НИИ "Прогноз", Санкт-Петербург, Россия

² ОАО "Алевкурп", Королев Стан, Республика Беларусь

✉ katya.plotnitskaya@yandex.ru

Аннотация

Введение. В области радиолокационного мониторинга воздушного пространства высокую актуальность имеет задача различения мультикоптеров, что предполагает определение класса мультикоптера (малый, средний, тяжелый). Задача распознавания напрямую связана с анализом радиолокационных портретов (РЛП) и определением количества винтов в мультикоптере. Применительно к построению РЛП винтов летательных аппаратов особый интерес представляют РЛП, полученные на основе метода обращенного синтеза апертуры антенны (ОСАА). Для построения таких портретов необходима информация о частотах вращения винтов, которая определяется при реализации предлагаемого метода.

Цель работы. Разработка методики оценки количества винтов в мультикоптере на основе анализа радиолокационного сигнала вторичной модуляции, обусловленной вращением лопастей.

Материалы и методы. Задача оценки количества винтов связана с задачей оценки частоты вращения винтов, которая, в свою очередь, рассматривается как задача аккумуляции откликов вторичной модуляции, создаваемой вращением, в структуре сигнала с параллельной компенсацией фазовых набегов. При моделировании рассматривается монохроматический сигнал с частотой 10 ГГц. Для реализации и оценки используемых в методике алгоритмов применены методы корреляционной обработки и статистического анализа.

Результаты. Разработана методика оценки количества винтов в мультикоптере на основе анализа сигнала вторичной модуляции. Проведена проверка работоспособности методики на данных математического моделирования при разных сценариях движения цели.

Заключение. Разработанная методика оценки количества винтов в мультикоптере на основе анализа сигнала вторичной модуляции является основой для разработки алгоритма формирования изображений винтов квадрокоптера с помощью обратного синтеза апертуры антенны. Информация о количестве винтов и частотах их вращения может быть использована для построения РЛП винтов мультикоптеров на основе метода ОСАА и последующей оценки особенности конструкции и различения одиночной и групповой целей.

Ключевые слова: летательный аппарат, мультикоптер, квадрокоптер, обращенный синтез апертуры антенны, радиолокационное распознавание

Для цитирования: Плотницкая Е. С., Гейстер С. Р., Веремьев В. И. Методика оценки количества винтов в мультикоптере на основе анализа сигнала вторичной модуляции // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2026. Т. 29, № 1. С. 103–113.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-1-103-113

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 01.12.2025; принята к публикации после рецензирования 12.01.2026; опубликована онлайн 27.02.2026

Methodology for Estimating the Number of Multicopter Rotors Based on Secondary Modulation Signal Analysis

Ekaterina S. Plotnitskaya^{1✉}, Sergey R. Heister², Vladimir I. Veremyev¹

¹ Research Institute "Prognoz", St Petersburg, Russia

² JSC "ALEVKURP", Korolev Stan, Republic of Belarus

✉ katya.plotnitskaya@yandex.ru

Abstract

Introduction. In the field of radar monitoring of airspace, multicopter discrimination is a highly relevant task, which includes determination of their class, i.e., small-, medium-, or heavy multicopters. The discrimination task is directly related to the analysis of radar signatures and determining the rotor number in a multicopter. Regarding the construction of radar rotors for aircrafts, radar systems obtained using the method of inverse synthetic aperture radar (ISAR) are particularly interesting. In order to create such signatures, information on the rotational frequency of the rotors is required, which can be determined using the method proposed in this paper.

Aim. Development of a methodology for estimating the number of rotors in a multicopter based on the analysis of the radar signal of secondary modulation caused by blade rotation.

Materials and methods. The task of estimating the number of rotors is related to the task of estimating the frequency of their rotation, which, in turn, is considered as the task of accumulating secondary modulation responses created by rotation in the signal structure with simultaneous compensation of phase incursions. For simulation purposes, a monochromatic signal with a frequency of 10 GHz was considered. Correlation processing and statistical analysis were used to implement and evaluate the algorithms used in the methodology.

Results. A methodology for estimating the number of rotors in a multicopter based on the analysis of secondary modulation signals was developed. Its operability was tested by simulating different scenarios of target movement.

Conclusion. The developed methodology for estimating the number of rotors in a multicopter based on the analysis of secondary modulation signals forms a basis for developing an algorithm for imaging quadcopter rotors using the ISAR method. Information on the number and rotation frequencies of rotors can be used to construct radar signatures of multicopter rotors based on the ISAR method followed by subsequent evaluation of design features and distinction between single- and integrated targets.

Keywords: aircraft, multicopter, quadcopter, inverse synthetic aperture radar, radar discrimination

For citation: Plotnitskaya E. S., Heister S. R., Veremyev V. I. Methodology for Estimating the Number of Multicopter Rotors Based on Secondary Modulation Signal Analysis. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2026, vol. 29, no. 1, pp. 103–113.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-1-103-113

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 01.12.2025; accepted 12.01.2026; published online 27.02.2026

Введение. В сфере радиолокационного мониторинга воздушного пространства задача распознавания мультикоптера, включающая определение класса (малый, средний, тяжелый), имеет высокую степень актуальности. В основе наиболее информативных способов решения данной задачи лежит использование радиолокационных портретов (РЛП), несущих информацию о конструкции и размерах летательного аппарата [1, 2]. Для построения РЛП

винтов на основе метода обращенного синтеза апертуры антенны (ОСАА) [3–7] необходима информация о частотах вращения винтов. Целесообразно создать условия для определения частот вращения винтов с погрешностью, обеспечивающей оценку конструкции, а также различение одиночной и групповой целей.

В публикациях описывается ряд алгоритмов решения задачи оценки частоты вращения винтов, построенных на косвенном определении

частот по временным диаграммам отраженных сигналов и их спектрам [8–13]. Однако такие алгоритмы не всегда могут гарантировать требуемое по точности представление о количестве винтов летательного аппарата (ЛА). Также недостатком использования спектрального анализа в задачах радиолокационного распознавания является "размывание" спектра во время маневрирования ЛА.

Поэтому целесообразно обратить внимание на способы, которые направлены на прямое измерение частот следования лопастей винтов летательных аппаратов в системах с ОСАА [14, 15].

Задачу оценки частоты вращения винтов можно рассматривать как задачу аккумуляции откликов вторичной модуляции, создаваемой вращением, в структуре сигнала с одновременной компенсацией фазовых набегов. Кроме того, процедура аккумуляции откликов от вращающихся винтов обеспечивает устойчивость алгоритма к шумам и помехам, что является важным фактором и дает преимущество работы в сложной помеховой обстановке по сравнению со спектральным анализом. На рис. 1 приведен график сравнения вероятности правильной оценки частоты вращения винта для спектрального анализа и алгоритма обработки, соответствующего предлагаемой методике. Данные получены путем компьютерного моделирования с использованием уточненной модели сигнала, отраженного от квадрокоптера [16]. Вероятность правильной оценки частоты вращения винта здесь представлена в зависимости от отношения сигнал-шум (ОСШ) на входе устройства обработки сигнала, отраженного от корпуса и винтов квадрокоптера, и шума в полосе 60 кГц.

Методика оценки количества винтов в мультикоптере на основе сигнала вторичной модуляции. Обработку, лежащую в основе методики оценки количества винтов и частот их вращения, предлагается реализовывать в многоканальном устройстве (МУ) на основе корреляции отраженного сигнала с опорной функцией (рис. 2). Каждый канал отождествляется с одним из возможных значений частоты вращения винта $F_B(i)$, $i = \overline{1, N_K}$, где N_K – число возможных частот вращения винта (число каналов МУ). Множество возможных частот вращения винта формируется, начиная с минимального

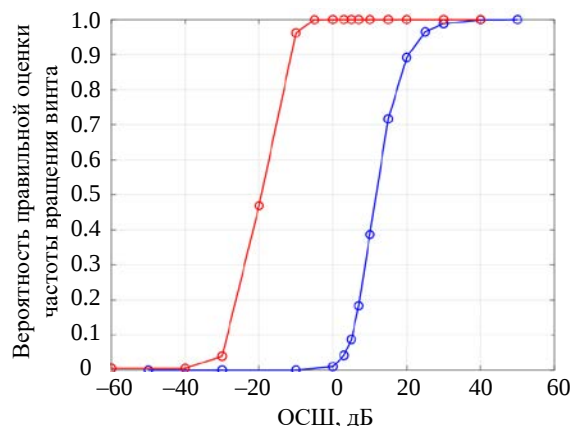


Рис. 1. Вероятности правильной оценки частоты вращения винта для спектрального анализа (синяя кривая) и предлагаемого алгоритма (красная кривая)

Fig. 1. Probabilities of the correct estimation of rotor frequency for spectral analysis (blue curve) and the proposed algorithm (red curve)

значения возможной частоты вращения винта (F_{B_min}) и заканчивая максимальным значением возможной частоты вращения винта (F_{B_max}) с шагом ΔF . Кроме того, каждый канал содержит набор подканалов, которые соответствуют возможным начальным угловым положениям лопасти в момент начала зондирования $\varphi_{н.з}(j)$, $j = \overline{1, N_c}$. Таким образом, в устройстве поиска максимумов исследуется пространство "частота вращения – начальная фаза". Предполагается, что с помощью описываемого устройства обрабатывается сигнал, отраженный от двухлопастного винта мультикоптера. Однако возможно применение данного алгоритма обработки для винтов с другим количеством лопастей.

В момент обнаружения мультикоптера определяется направление его движения относительно наблюдателя (приближение/удаление), и на основании этого происходит анализ сигнала, отраженного от соответствующих кромок лопастей винтов. В материалах приведенных исследований рассматриваются случаи зависшей и приближающейся цели, вследствие чего рассматривается сигнал, отраженный от передних (приближающихся) кромок лопастей винтов.

Рассмотрим формирование отсчетов опорной функции $K_{\Pi}(t, F_B(i), \varphi_{н.з}(j))$, используемой в алгоритме обработки. Для расчета опорной функции в соответствии с теоретической моделью сигнала, отраженного от лопастей

винта квадрокоптера [16], необходимо знать три основные координаты, определяемые РЛС (дальность, азимут, угол места), линейную скорость квадрокоптера, а также уже упомянутые возможные значения частоты вращения винта. Законы изменения координат для формирования опорной функции будут соответствовать законам изменения координат вращающихся лопастей, описанным в [16], с использованием при расчетах компенсирующего углового положения лопасти:

$$\Phi_{\text{комп}}(t, F_B(i), \Phi_{\text{н.з.}}(j)) = 2\pi F_B(i)t + \Phi_{\text{н.з.}}(j).$$

Расчеты компенсирующего множителя выполняются для каждого i -го возможного значения ожидаемой частоты вращения винта и для каждого j -го возможного значения начального углового положения лопасти:

$$K_{\Pi}(t, F_B(i), \Phi_{\text{н.з.}}(j)) = \exp[j2kr_{\Pi_комп}(t, F_B(i), \Phi_{\text{н.з.}}(j))],$$

где $K_{\Pi}(t, F_B(i), \Phi_{\text{н.з.}}(j))$ – отсчеты опорной функции для передних кромок лопастей винта квадрокоптера; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; $r_{\Pi_комп}(t, F_B(i), \Phi_{\text{н.з.}}(j))$ – расстояние от фазового центра совокупности отражателей, расположенных на передних кромках лопастей винтов, до фазового центра приемной антенны.

Исходя из схемы, представленной на рис. 2, после перемножителя, на который поступают отсчеты отраженного сигнала и опорной функции, в каждом подканале МУ происходит суммирование временных отсчетов результатов перемножения и формирование квадрата модуля суммы:

$$\begin{aligned} & |\xi(F_B(i), \Phi_{\text{н.з.}}(j))|^2 = \\ & = \left| \sum_{nT_d} U_{\text{пр-п}}(t) K_{\Pi}^*(t, F_B(i), \Phi_{\text{н.з.}}(j)) \right|^2. \end{aligned}$$

Максимальные значения корреляционных сверток фиксируются с помощью устройства поиска максимумов (УПМ) и выделяются как соответствующие измеренным частотам вращения винтов $F_{\text{в.изм}}$.

Таким образом, методику оценки количества винтов мультикоптера можно представить как последовательность выполнения следующих операций:

– обработка сигнала вторичной модуляции с помощью МУ, реализующего корреляционную свертку принятого сигнала с опорными функциями в наборе каналов. Каждая опорная функция отождествляется с конкретным значением частоты следования лопастей, а также учитывает возможные положения лопасти в момент начала зондирования;

– формирование квадратов модулей накопленных амплитуд в каждом подканале МУ;

– выделение максимумов среди полученных значений квадратов модулей накопленных амплитуд в УПМ;

– оценка количества винтов (пар винтов) на основе количества найденных максимумов.

Результаты проверки функционирования алгоритма на основе математического моделирования. Рассмотрим результаты работы приведенного алгоритма на основе данных моделирования сигналов, отраженных от винтов квадрокоптера.

При моделировании использовались структурные параметры лопасти двухлопастного винта DJI Phantom 3, описанные в [16]. Частота вращения винта $F_B = 120$ Гц; частота следования лопастей двухлопастного винта $F_{\text{л.в}} = 2F_B$; линейная скорость движения при моделировании $v = 0$ м/с (зависший квадрокоптер). Тип сигнала – монохроматический. Длина волны при моделировании полагалась равной $\lambda = 0.03$ м, частота дискретизации $F_d = 60$ кГц. Максимальное значение эффективной площади рассеяния одного точечного отражателя на передней и задней кромках лопасти полагались одинаковыми и равными $\sigma_{0\Pi(3)} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$. Начальная дальность $r_0 = 50$ м и угол места $\varepsilon = \pi/18$ полагались не зависящими от времени при нулевой скорости линейного движения.

При работе алгоритма исследовались возможные значения частот вращения винта от $F_{\text{в.мин}} = 80$ Гц до $F_{\text{в.макс}} = 180$ Гц с шагом $\Delta F = 0.5$ Гц.

В данной статье для определенности рассматривается случай, когда на вход алгоритма поступает сигнал, отраженный от передних (приближающихся) кромок лопастей винта, полученный посредством исключения из процесса анализа части сигнала, соответствующей отра-

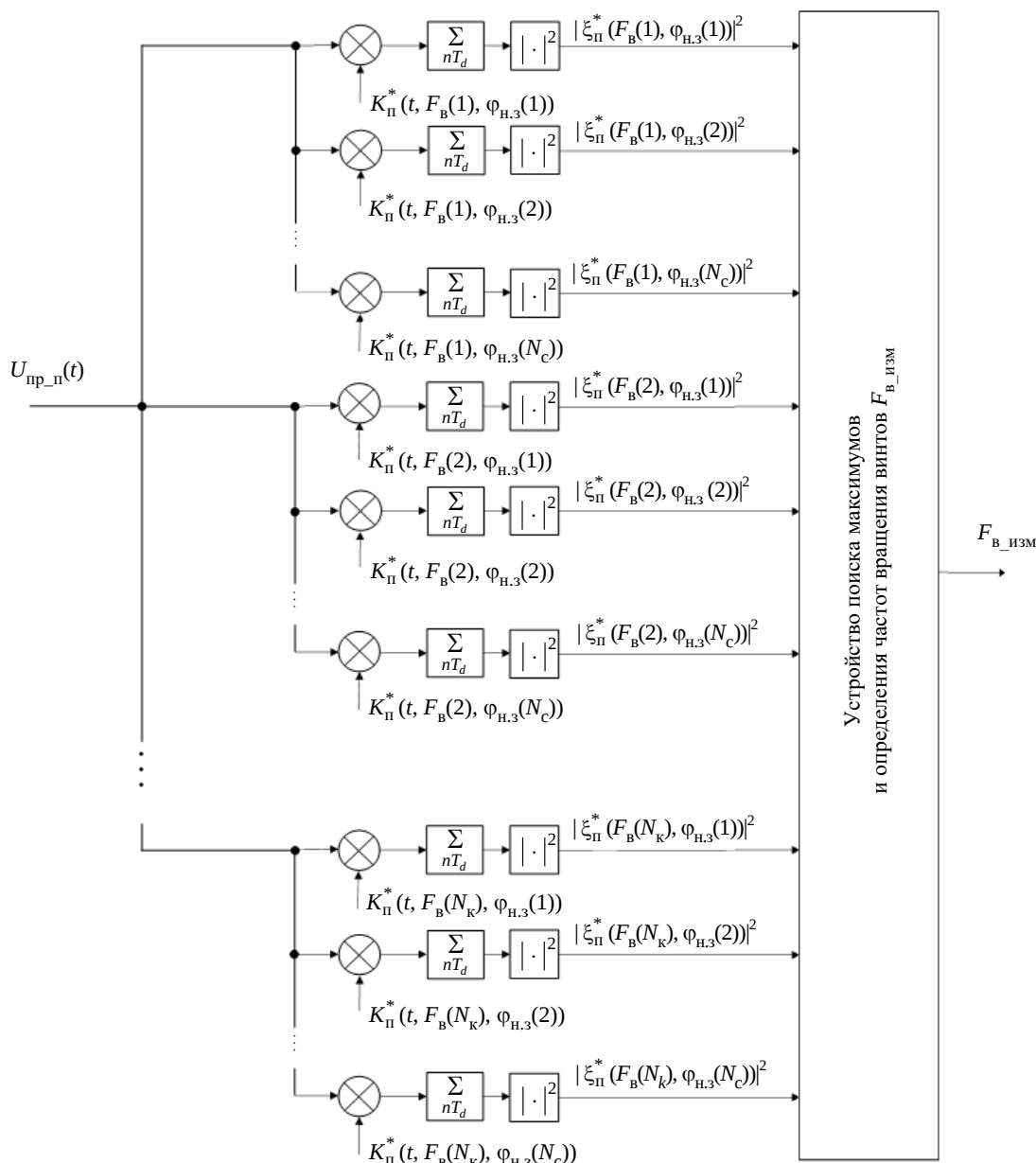


Рис. 2. Схема обработки для реализации метода оценки количества винтов

Fig. 2. Processing scheme for the implementation of the rotor number estimation method

жению от задних (удаляющихся) кромок лопастей винта и корпуса летательного аппарата. Это обеспечивается последовательным выполнением следующих процедур: 1) прямое преобразование Фурье с формированием амплитудно-частотного спектра; 2) обнуление спектральных составляющих, отраженных от корпуса ЛА и удаляющихся лопастей; 3) обратное преобразование Фурье с формированием сигналов, отраженных от приближающихся лопастей.

При представлении результатов для каждого канала по частоте вращения $F_B(i)$ визуализируется максимум модуля квадрата накопленной ам-

плитуды $|\xi(F_B(i))|^2 = |\xi(F_B(i), \varphi_{H.3}(j))|_{\max}^2$ среди подканалов по начальной фазе $\varphi_{H.3}(j)$.

На рис. 3 изображены результаты, полученные с помощью вышеописанного алгоритма обработки сигнала, отраженного от одного винта квадрокоптера, совершающего вращение в двух направлениях. Для удобства отображения выполнена нормировка результатов относительно максимальных значений.

Исследуем пары винтов с учетом конструктивных особенностей квадрокоптера. Во-первых, для устранения реактивного момента половина

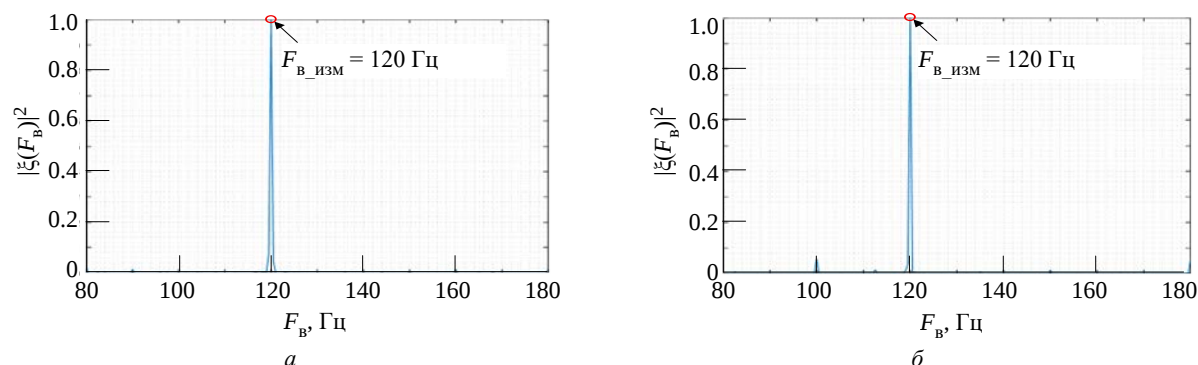


Рис. 3. Выходной сигнал устройства обработки при подаче на вход сигнала, отраженного от одного винта квадрокоптера: а – вращающегося против часовой стрелки; б – вращающегося по часовой стрелке

Fig. 3. Output signal of the processing device when applying a signal reflected from one quadcopter rotor to the input: а – rotating counterclockwise; б – rotating clockwise

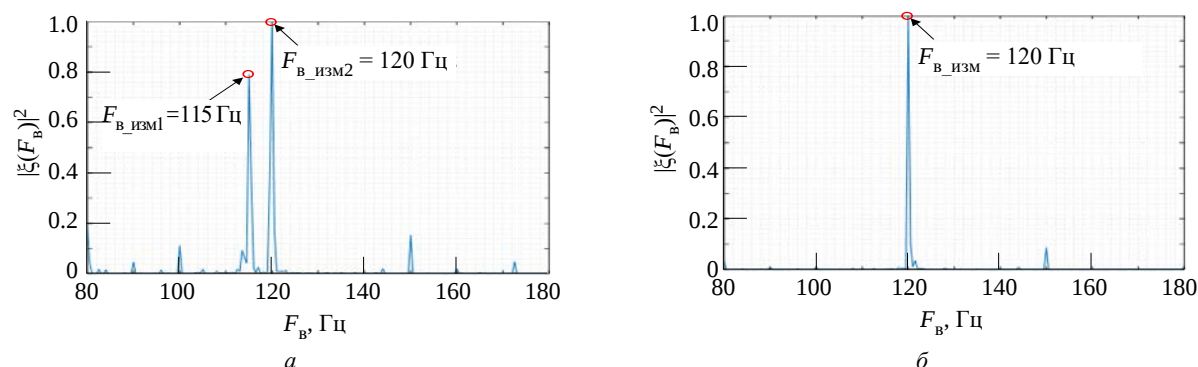


Рис. 4. Выходной сигнал устройства обработки при подаче на вход сигнала, отраженного от пары винтов квадрокоптера: а – два соседних винта (вращение в разных направлениях); б – два диагональных винта (вращающихся против часовой стрелки)

Fig. 4. Output signal of the processing device when applying a signal reflected from a pair of quadcopter rotors to the input: а – two adjacent rotors (rotating in different directions); б – two diagonal rotors (rotating counterclockwise)

винтов вращается по часовой стрелке, а вторая – против. Во-вторых, для выполнения прямолинейного полета при наличии бокового ветра винты квадрокоптера вращаются по определенной схеме: два соседних винта совершают вращение с небольшой расстройкой по частоте, когда два винта, расположенных на одной диагонали, согласованы по частоте. На рис. 4 рассматриваются результаты работы алгоритма для пары соседних винтов и для пары диагональных винтов. При этом одна диагональная пара винтов совершает вращение с частотой $F_{в1} = 120$ Гц, а вторая – $F_{в2} = 115$ Гц.

На рис. 5 приведены выходные сигналы устройства обработки при облучении четырех винтов квадрокоптера. На рис. 5, а рассматривается случай, описанный ранее, когда квадрокоптер удерживает равновесие при наличии бокового ветра. На рис. 5, б приведен результат для варианта, при котором квадрокоптер со-

вершает разворот и все четыре винта квадрокоптера совершают вращение с расстройкой по частоте между собой: $F_{в1} = 120$ Гц; $F_{в2} = 115$ Гц; $F_{в3} = 118$ Гц; $F_{в4} = 113$ Гц. Максимальная ошибка определения частоты вращения, как видно из рис. 5, б, равна $\delta F = 0.5$ Гц, что совпадает с шагом между исследуемыми частотами вращения винта.

Разница пиков по амплитуде, соответствующих разным винтам, связана с определенным начальным положением винтов в момент начала когерентного накопления (КН) и взаимодействием сигналов, отраженных от передних и задних кромок лопастей.

Поскольку поставленная задача предполагает возможность наблюдения группы квадрокоптеров, то целесообразно будет исследовать работу данного алгоритма для пары квадрокоптеров. На рис. 6 изображен результат работы алгоритма в случае, когда модели-

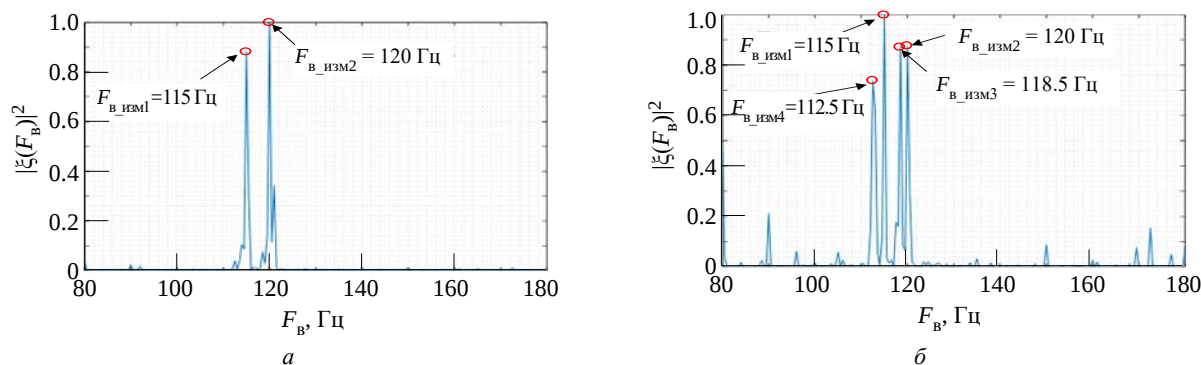


Рис. 5. Выходной сигнал устройства обработки при подаче на вход сигнала, отраженного от четырех винтов квадрокоптера: *а* – четыре винта в режиме удержания равновесия; *б* – четыре винта в режиме разворота

Fig. 5. Output signal of the processing device when applying a signal reflected from the four rotors of the quadcopter to the input: *a* – four rotors in the balance mode; *b* – four rotors in the turn mode

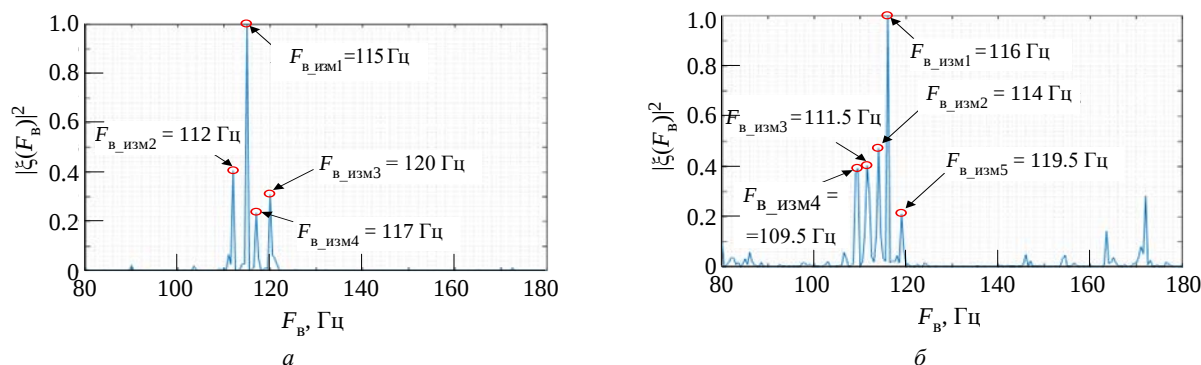


Рис. 6. Выходной сигнал устройства обработки при подаче на вход сигнала, отраженного от двух квадрокоптеров: *а* – зависших; *б* – движущихся с разными скоростями

Fig. 6. Output signal of the processing device when applying a signal reflected from two quadcopters to the input: *a* – suspended; *b* – moving at different speeds

ровался сигнал, отраженный от винтов двух зависших квадрокоптеров (рис. 6, *а*). Параметры конструкции лопастей винтов полагались одинаковыми.

Для первого квадрокоптера данные при моделировании были теми же, частоты вращения винтов соответствовали случаю удержания равновесия.

Для второго квадрокоптера: начальная дальность $r_0 = 58$ м и угол места $\varepsilon = \frac{\pi}{18} + \frac{\pi}{360}$ полагались не зависящими от времени при нулевой скорости линейного движения. Частоты вращения винтов: для первой диагонали $F_{в1} = 117$ Гц, для второй диагонали $F_{в2} = 112$ Гц.

На рис. 6, *б* представлен результат для случая, когда для двух квадрокоптеров при моделировании задавались разные радиальные скорости: для первого квадрокоптера $v_1 = 9$ м/с, для второго квадрокоптера $v_2 = 11$ м/с.

Как видно из рис. 6, *б*, для двух квадрокоптеров с отличающимися радиальными скоростями на графике выходного сигнала устройства обработки количество составляющих становится больше. Таким образом, становится возможным различить присутствие одного и двух квадрокоптеров по количеству пиков.

Упрощенный алгоритм формирования опорной функции для многоканального устройства обработки. Для более широкого применения описанного алгоритма обработки в рамках методики оценки количества винтов мультикоптера возможно использование опорной функции обработки сигналов, отраженных от передних кромок лопастей двухлопастного винта, которая представляет собой универсальный эталон и не зависит от дальности, угла места и азимута. С этой целью в качестве опорной функции необходимо сформировать последовательность импульсов формы главного лепестка функции sinc (рис. 7), которая бу-

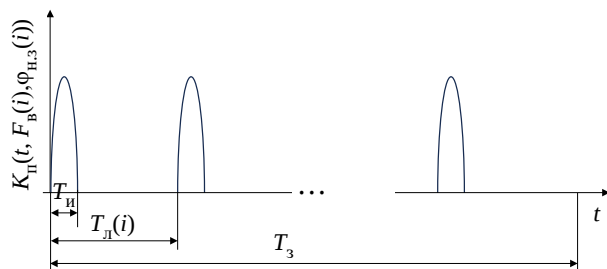


Рис. 7. Форма упрощенной опорной функции

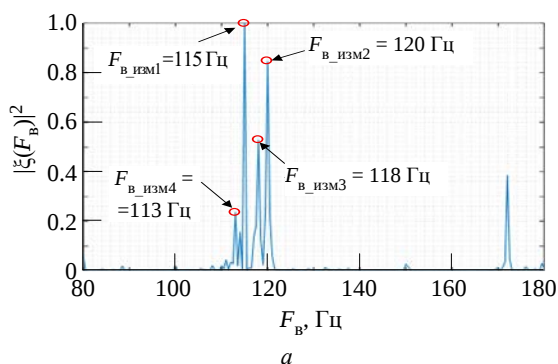
Fig. 7. Simplified support function

дет зависеть от частоты вращения винта, а также от выбранной длительности импульса опорной функции (выражения приводятся для двухлопастных винтов):

$$K_{\Pi}(t, F_B(i), \varphi_{H.3}(j)) = \sum_{k=1}^{N_{\Pi}(i)} K_{\Pi 1} \left(t - kT_L(i) - \frac{\varphi_{H.3}(j)}{2\pi/T_B(i)} \right) + \sum_{k=1}^{N_{\Pi}(i)} K_{\Pi 2} \left(t - kT_L(i) - \frac{\varphi_{H.3}(j) + \pi}{2\pi/T_B(i)} \right);$$

$$K_{\Pi 1(2)}(t) = \begin{cases} \sin\left(\pi \frac{t}{T_{\Pi}}\right), & \text{если } 0 \leq t \leq T_{\Pi}; \\ 0, & \text{если } t > T_{\Pi}, \end{cases}$$

где T_{Π} – длительность импульса опорной функции; $N_{\Pi}(i) = \frac{T_3}{T_B(i)}$ – количество оборотов винта за время зондирования T_3 ; $T_L(i) = \frac{T_B(i)}{N_L} = \frac{1}{F_B(i)N_L}$ – период следования лопастей (период следования импульсов) винта, имеющего N_L лопастей.



Далее приводятся результаты работы алгоритма на основе математического моделирования с учетом упрощенного формирования опорной функции. Для формирования опорной функции значения длительности импульса опорной функции для передней и задней кромок лопасти полагались одинаковыми и равными $T_{\Pi} = 5 \cdot 10^{-5}$ с. Рассматривались уже упомянутые сценарии для одного квадрокоптера с винтами, работающими в режиме разворота (рис. 8, а), а также для двух квадрокоптеров, движущихся с разными радиальными скоростями (рис. 8, б).

На рис. 8, а видно, что в результате корреляции принятого сигнала и опорной функции происходят некоторые потери по мощности по сравнению с аналогичным случаем, приведенным на рис. 5, б. Однако при этом формирование опорных функций становится существенно проще, так как исключена их зависимость от координат цели.

На рис. 8, б происходит заметное "размытие" появляющихся пиков по значениям частот вращения на выходном сигнале устройства обработки по сравнению с аналогичным вариантом, приведенным на рис. 6, б. Это происходит из-за неполного соответствия формы опорной функции (только упрощенный главный лепесток) форме сигнала, отраженного от кромки лопасти. Несмотря на это, остается возможным определение присутствия нескольких квадрокоптеров.

Заключение. В основе методики оценки частот вращения и количества винтов мультикоптера лежит корреляция сигнала, отраженно-

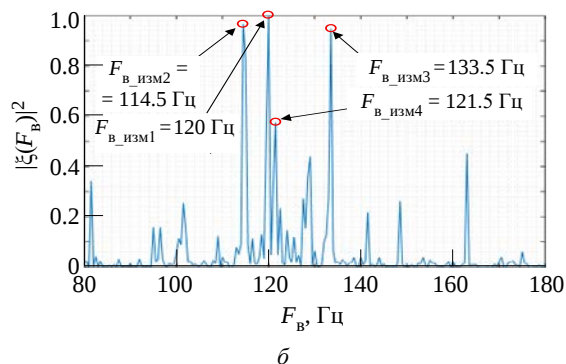


Рис. 8. Выходной сигнал устройства обработки при подаче на вход сигнала, отраженного:
а – от квадрокоптера в режиме разворота; б – двух квадрокоптеров, движущихся с разными скоростями

Fig. 8. Output signal of the processing device when applying to the input a signal reflected from:
а – a quadcopter in the turn mode; б – two quadcopters moving at different speeds

го от винтов летательного аппарата, с опорной функцией, характеризующей ожидаемый отраженный сигнал. Качество оценки частот во многом зависит от соответствия опорной функции форме и параметрам сигнала, отраженного от лопастей винта.

При моделировании алгоритма, соответствующего разработанной методике, максимальная ошибка оценки частоты вращения винта находилась в пределах шага 0.5 Гц расстановки каналов обработки.

Работоспособность алгоритма оценки количества винтов опробована на разных схемах вращения винтов квадрокоптера (удержание равновесия при наличии бокового ветра, маневрирование). Во всех типовых опробованных вариантах работы винтов квадрокоптера разработанный алгоритм обеспечивает формирование изображения винтов в поле «частота вращения – начальное положение лопасти». Это позволяет в ходе радиолокационного наблюдения квадрокоптера решить задачу определения количества пар винтов и количества винтов.

Анализ результатов моделирования показал, что разница уровней выходных сигналов

устройства обработки, соответствующих разным винтам, объясняется определенным начальным положением винтов в момент начала когерентного накопления и взаимодействием сигналов, отраженных от передних и задних кромок лопастей.

Для более широкого применения алгоритма и устройства обработки, представленных в рамках предлагаемой методики оценивания количества винтов мультикоптера, целесообразно использование опорной функции, которая представляет собой универсальный эталон и не зависит от дальности, угла места и азимута. Отклонение упрощенной опорной функции от реального сигнала сопровождается соответствующим снижением отношения сигнал/шум и появлением дополнительных составляющих, однако при этом формирование опорной функции становится весьма простым.

Информация о количестве винтов и частотах их вращения может быть использована для построения РЛП винтов мультикоптеров на основе метода ОСАА и последующей оценки особенности конструкции и различия одиночной и групповой целей.

Список литературы

1. Automatic Target Recognition in Synthetic Aperture Radar Imagery: A State-of-the-Art Review / K. Eldarymli, E. Gill, P. McGuire, D. Poewr, C. Moloney // IEEE Access. 2016. Vol. 4. P. 6014–6058. doi: 10.1109/ACCESS.2016.2611492
2. Jacobs S. P., O'Sullivan J. A. Automatic target recognition using sequences of high resolution radar range-profiles // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2000. Vol. 36, № 2. P. 364–381. doi: 10.1109/7.845214
3. Chen V. C., Martorella M. Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging: Principles, Algorithms and Applications. Raleigh, USA: SciTech Publishing, 2014. 304 p.
4. Rong J. J., Wang Y., Han T. Iterative Optimization-based ISAR Imaging with Sparse Aperture and Its Application in Interferometric ISAR Imaging // IEEE Sensors J. 2019. Vol. 19, iss. 19. P. 8681–8693. doi: 10.1109/JSEN.2019.2923447
5. Sayed A. N., Ramahi O. M., Shaker G. In the Realm of Aerial Deception: UAV Classification via ISAR Images and Radar Digital Twins for Enhanced Security // IEEE Sensors Let. 2024. Vol. 8, № 7. P. 1–4. Art. № 6007704. doi: 10.1109/LENS.2024.3416381
6. Ozdemir C. Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging with MATLAB Algorithms. 2nd ed. Hoboken: John Wiley and Sons, 2021. 672 p.

7. Removal of Micro-Doppler Effect in ISAR Imaging Based on Data-Driven Deep Network / H. Wang, K. Li, Y. Luo, Y. Liu, Q. Zhang, Q. Zhang // IEEE Sensors J. 2023. Vol. 23, № 12. P. 13198–13209. doi: 10.1109/JSEN.2023.3270226
8. Misiurewicz, J., Kulpa, K., Czekala Z. Multi-channel detection of the helicopter echo // Proc. of the Intern. Radar Symp. 1998. Vol. 2. P. 829–838.
9. Radar Detection of Helicopters with Application of CLEAN Method / J. Misiurewicz, K. S. Kulpa, Z. Czekala, T. A. Filipek // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2012. Vol. 48, № 4. P. 3525–3537. doi: 10.1109/TAES.2012.6324734
10. Tikkinen J., Helander E., Visa A. Joint Utilization of Incoherently and Coherently Integrated Radar Signal in Helicopter Categorization // IEEE Intern. Radar Conf., Arlington, USA, 9–12 May 2005. IEEE, 2005. P. 540–545. doi: 10.1109/RADAR.2005.1435885
11. Plotnitskaya E., Vorobev E., Veremyev V. Analysis of Spectrum Signatures from Rotating Blades of Small Drone // Signal Processing Symp. (SPSymo), LODZ, Poland, 20–23 Sept. 2021. IEEE, 2021. P. 212–215. doi: 10.1109/SPSymo51155.2020.9593405
12. Method of Micro-motion Feature Extraction of Rotor Target in Time Domain / M. Long, J. Yang,

S. Xia, X. Wei, M. Lv, W. Chen // IEEE 2nd Intern. Conf. on Information Technology, Big Data and Artificial Intelligence (ICIBA), Chongqing, China, 17–19 Dec. 2021. IEEE, 2021. P. 356–360.
doi: 10.1109/ICIBA52610.2021.9688160

13. Chen V. The Micro-Doppler Effect in Radar. 2nd ed. Norwood: Artech House, 2019. 341 p.

14. Гейстер С. Р., Нгуен Т. Т. Способ измерения частот следования лопастей винтов летательного аппарата на основе свертки спектра "вторичной" модуляции // Докл. БГУИР. Минск, 2019. № 1 (119). С. 68–74.

15. Гейстер С. Р., Кириченко В. В. Способ двух-этапного радиолокационного измерения частоты следования лопастей винтовых летательных аппаратов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 3. С. 68–80.

doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-3-68-80

16. Плотницкая Е. С., Гейстер С. Р., Веремьев В. И. Уточнение математической модели сигнала, отраженного от лопасти винта квадрокоптера, на основе экспериментальных исследований // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 4. С. 73–85.
doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-4-73-85

Информация об авторах

Плотницкая Екатерина Сергеевна – магистр по направлению "Радиотехника" (2023), аспирантка Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), младший научный сотрудник НИИ "Прогноз". Автор 10 научных публикаций. Сфера научных интересов – радиолокационное распознавание.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: kattya.plotnitskaya@yandex.ru.

Гейстер Сергей Романович – доктор технических наук (2004), профессор (2006), главный научный сотрудник ОАО "АЛЕВКУРП". Автор более 150 научных работ. Сфера научных интересов – построение радиотехнических систем различного назначения; радиолокационное распознавание; адаптивная обработка сигналов; радиоэлектронная защита.

Адрес: ОАО "АЛЕВКУРП", ул. Московская, д. 1а, Королев Стан, 223050, Республика Беларусь
E-mail: hsr_1960@yahoo.com

Веремьев Владимир Иванович – кандидат технических наук (2000), профессор кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), директор НИИ "Прогноз". Автор более 130 научных работ. Сфера научных интересов – комплексный экологический мониторинг; комплексные вопросы построения радиолокационных систем; многодиапазонные многопозиционные радиолокационные комплексы для мониторинга воздушного пространства и морской поверхности.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: vervladiv@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-8167-6616>

References

1. El-Darymli K., Gill E., McGuire P., Poewr D., Moloney C. Automatic Target Recognition in Synthetic Aperture Radar Imagery: A State-of-the-Art Review. IEEE Access. 2016, vol. 4, pp. 6014–6058.
doi: 10.1109/ACCESS.2016.2611492

2. Jacobs S. P., O'Sullivan J. A. Automatic Target Recognition Using Sequences of High Resolution Radar Range-Profiles. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2000, vol. 36, no. 2, pp. 364–381.
doi: 10.1109/7.845214

3. Chen V. C., Martorella M. Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging: Principles, Algorithms, and Applications. Raleigh, USA, SciTech Publishing, 2014, 304 p.

4. Rong J. J., Wang Y., Han T. Iterative Optimization-based ISAR Imaging with Sparse Aperture and Its Application in Interferometric ISAR Imaging. IEEE Sensors J. 2019, vol. 19, iss. 19, pp. 8681–8693.
doi: 10.1109/JSEN.2019.2923447

5. Sayed A. N., Ramahi O. M., Shaker G. In the Realm of Aerial Deception: UAV Classification via ISAR Images and Radar Digital Twins for Enhanced

Security. IEEE Sensors Let. 2024, vol. 8, no. 7, pp. 1–4, art. no. 6007704.

doi: 10.1109/LENS.2024.3416381

6. Ozdemir C. Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging with MATLAB Algorithms. 2nd ed. Hoboken, John Wiley and Sons, 2021, 672 p.

7. Wang H., Li K., Luo Y., Liu Y., Zhang Q., Zhang Q. Removal of Micro-Doppler Effect in ISAR Imaging Based on Data-Driven Deep Network. IEEE Sensors J. 2023, vol. 23, no. 12, pp. 13198–13209.
doi: 10.1109/JSEN.2023.3270226

8. Misiurewicz, J., Kulpa, K., Czekala Z. Multi-channel Detection of the Helicopter Echo. Proc. of the Intern. Radar Symp. 1998, vol. 2, pp. 829–838.

9. Misiurewicz J., Kulpa K. S., Czekala Z., Filippek T. A. Radar Detection of Helicopters with Application of CLEAN Method. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2012, vol. 48, no. 4, pp. 3525–3537.
doi: 10.1109/TAES.2012.6324734

10. Tikkinen J., Helander E., Visa A. Joint Utilization of Incoherently and Coherently Integrated Radar Signal in

Helicopter Categorization. IEEE Intern. Radar Conf., Arlington, USA, 9–12 May 2005. IEEE, 2005, pp. 540–545.
doi: 10.1109/RADAR.2005.1435885

11. Plotnitskaya E., Vorobev E., Veremyev V. Analysis of Spectrum Signatures from Rotating Blades of Small Drone. Signal Processing Symp. (SPSymo), LODZ, Poland, 20–23 Sept. 2021. IEEE, 2021, pp. 212–215.
doi: 10.1109/SPSymo51155.2020.9593405

12. Long M., Yang J., Xia S., Wei X., Lv M., Chen W. Method of Micro-motion Feature Extraction of Rotor Target in Time Domain. IEEE 2nd Intern. Conf. on Information Technology, Big Data and Artificial Intelligence (ICIBA), Chongqing, China, 17–19 Dec. 2021. IEEE, 2021, pp. 356–360.
doi: 10.1109/ICIBA52610.2021.9688160

13. Chen V. The Micro-Doppler Effect in Radar. 2nd ed. Norwood, Artech House, 2019, 341 p.

14. Heister S. R., Nguyen T. T. Measurement Method for Repetition Frequencies of the Blades of an Aerial Vehicle on the Base of the Convolution of the "Secondary" Modulation Spectrum. *Doklady BGUIR*. 2019, no. 1 (119), pp. 68–74. (In Russ.)

15. Heister S. R., Kirichenko V. V. Method for Two-Stage Radar Measurement of the Blade Repetition Rate of a Propeller-Driven Aircraft. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 3, pp. 68–80. (In Russ.)
doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-3-68-80

16. Plotnitskaya E. S., Heister S. R., Veremyev V. I. Experimental Refinement of a Mathematical Model of the Signal Reflected from Quadcopter Rotor Blade. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 4, pp. 73–85. (In Russ.)
doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-4-73-85

Information about the authors

Ekaterina S. Plotnitskaya – Master in Radio Engineering (2023, Saint Petersburg Electrotechnical University). Postgraduate student of Saint Petersburg Electrotechnical University, Junior Research Fellow of the Research Institute "Prognoz". The author of 9 scientific publications. Area of expertise: radar recognition.
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5F, Professor Popov St., Saint Petersburg 197022, Russia
E-mail: katya.plotnitskaya@yandex.ru

Sergey R. Heister, Dr Sci. (Eng.) (2004), Professor (2006), Chief Researcher at the JSC "ALEVKURP". The author of more than 150 scientific publications. Area of expertise: construction of radio engineering systems for various purposes; radar recognition; adaptive signal processing; radioelectronic protective measures.
Address: JSC "ALEVKURP", 1a, Moscow St., Korolev Stan 223050, Republic of Belarus
E-mail: hsr_1960@yahoo.com

Vladimir I. Veremyev – Cand. Sci. (2000), Professor of the Department of Radio Engineering Systems in Saint Petersburg Electrotechnical University, Director of the Research Institute "Prognoz". The author of more than 130 scientific publications. Area of expertise: integrated environmental monitoring; complex issues of building radar systems; multi-band multi-position radar systems for airspace and sea surface monitoring.
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5F, Professor Popov St., Saint Petersburg 197022, Russia
E-mail: vervladiv@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-8167-6616>