



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-53-61>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.396.96

## СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ВИНТОВ В ЛЕТАТЕЛЬНОМ АППАРАТЕ ПО РАДИОЛОКАЦИОННОМУ ИЗОБРАЖЕНИЮ, ПОЛУЧЕННОМУ ПУТЕМ ОБРАЩЕННОГО СИНТЕЗА АПЕРТУРЫ АНТЕННЫ

С. Р. ГЕЙСТЕР, В. В. КИРИЧЕНКО

ОАО «АЛЕВКУРП» (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 21.05.2024

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

**Аннотация.** Технология обращенного синтеза апертуры антенны, использованная для построения радиолокационного изображения винтов летательного аппарата, показала высокую эффективность. Радиолокационное изображение позволяет визуализировать лопасти винтов, входящих в функциональную группу (тянущие винты самолета, несущие винты двухвинтового вертолета, несущие винты мультикоптера). При наличии одного винта в летательном аппарате (тянущий винт самолета, несущий винт одновинтового вертолета) радиолокационное изображение является простым и ясно воспринимаемым. В случае нескольких винтов, принадлежащих к одной функциональной группе, анализ радиолокационного изображения существенно усложняется. Это обусловлено случайным взаимным положением лопастей разных винтов в момент начала построения изображения, а также возможным случайным совпадением пространственного положения лопастей, принадлежащих к разным винтам. В связи с этим определение количества винтов в летательном аппарате является новой актуальной задачей, решение которой позволяет получить дополнительную информацию для распознавания. В основу рассматриваемого способа определения количества винтов положены наиболее распространенные конструктивные особенности – лопасти в винте следуют с одинаковым угловым интервалом, в винтах функциональной группы число лопастей одинаковое.

**Ключевые слова:** радиолокационное изображение, обращенный синтез апертуры антенны, винты летательного аппарата.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Гейстер, С. Р. Способ определения количества винтов в летательном аппарате по радиолокационному изображению, полученному путем обращенного синтеза апертуры антенны / С. Р. Гейстер, В. В. Кириченко // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 5. С. 53–61. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-53-61>.

## METHOD FOR DETERMINING THE NUMBER OF PROPELLERS IN AN AIRCRAFT FROM A RADAR IMAGE OBTAINED BY INVERSE SYNTHESIS OF THE ANTENNA APERTURE

SERGEY R. HEISTER, VALERY V. KIRYCHENKA

JSC "ALEVKURP" (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 21.05.2024

**Abstract.** The inverse antenna aperture synthesis technology used to construct a radar image of an aircraft's propellers has shown high efficiency. The radar image allows to visualize the blades of the rotors included in the functional group (traction rotors of an aircraft, rotors of a twin-rotor helicopter, rotors of a multicopter). In the case of a single rotor in an aircraft (an airplane's tractor rotor, a single-rotor helicopter's main rotor), the radar image is simple and clearly perceptible. In the case of several propellers belonging to the same functional group, the analysis of the radar image becomes significantly more complicated. This is due to the random relative position of the blades of different propellers at the moment the image begins to be constructed, as well as the possible random coincidence of the spatial position of the blades belonging to different propellers. In this regard, determining the number of propellers in an aircraft is a new urgent task, the solution of which allows us to obtain additional information for recognition. The method under consideration for determining the number of propellers is based on the most common design features – the blades in the propeller follow at the same angular interval, in the propellers of the functional group the number of blades is the same.

**Keywords:** radar image, inverse antenna aperture synthesis, aircraft propellers.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**For citation.** Heister S. R., Kirychenka V. V. (2024) Method for Determining the Number of Propellers in an Aircraft from a Radar Image Obtained by Inverse Synthesis of the Antenna Aperture. *Doklady BGUIR*. 22 (5), 53–61. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-53-61> (in Russian).

### Введение

Исследования по разработке радиолокационных способов и устройств, обеспечивающих получение информации о классе (типе) наблюдаемого объекта, начались во второй половине XX века. Примеры таких исследований приведены в [1–4].

Подход к построению радиолокационного изображения (РЛИ) периодической в пространстве и вращающейся относительно центра симметрии системы отражателей в конструкции объекта, основанный на обращенном синтезе апертуры антенны, был разработан в приложении к радиолокационному наблюдению колесно-гусеничной техники [5, 6]. Затем этот подход применялся при построении РЛИ винтов летательных аппаратов (ЛА) [7–9]. В основе подхода лежат многоканальная корреляционная обработка принятого сигнала, включающая компенсацию междупериодного сдвига фазы сигнала, отраженного от вращающейся лопасти в составе винта, и последующее когерентное накопление. Опорный сигнал для корреляционной обработки формируется как сигнал, «отраженный» от виртуальной лопасти [7].

Радиолокационное изображение винтов ЛА может быть использовано для решения следующих задач:

- распознавание класса (типа) наблюдаемого ЛА;
- селекция (выделение) отметок ЛА определенного класса из совокупности, включающей отметки движущихся наземных объектов различных классов. Примером является селекция винтовых малоскоростных беспилотных летательных аппаратов на фоне отметок движущихся наземных объектов (автомобили, гусеничные машины, мотоциклы, велосипеды).

РЛИ винтов ЛА представляет собой совокупность комплексных амплитуд сигналов, полученных в элементах анализа по углу в плоскости вращения винта: в вертикальной – изображение тянущих винтов самолетов и рулевых винтов одновинтовых вертолетов, в горизонтальной – изображение несущих винтов вертолетов, квадрокоптеров, автожиров. Если ЛА имеет один винт (например, тянущий винт самолета или несущий винт одновинтового вертолета, отражения от которого существенно преобладают над отражениями от рулевого винта), то РЛИ является простым – представляет собой регулярную структуру [9]. Если же ЛА имеет несколько одинаково-

вых винтов (многовинтовой самолет, двухвинтовой вертолет, мультикоптер), то РЛИ существенно усложняется. Это обусловлено двумя основными факторами:

- типичным случайным взаимным расположением системы лопастей разных винтов в момент начала построения РЛИ;
- возможным случайным совпадением пространственного положения лопастей, принадлежащих к разным винтам, которое приводит или к увеличению суммарной комплексной амплитуды в соответствующем элементе РЛИ (синфазное сложение сигналов, отраженных от этих лопастей), или к существенному уменьшению этой амплитуды (противофазное сложение).

Важной информацией, упрощающей анализ РЛИ винтов и повышающей возможности распознавания (селекции) ЛА, является информация о количестве винтов. Она может быть получена на основе поиска в РЛИ регулярных структур, которые формируются в РЛИ каждым винтом отдельно, а их регулярность обусловлена тем, что лопасти в типовом винте (за исключением рулевых винтов по схеме «ножницы») следуют с одинаковым угловым интервалом:

$$\theta_{LN} = \frac{360^\circ}{N_L},$$

где  $N_L$  – число лопастей в винте.

### Радиолокационные изображения винтов летательного аппарата

Невозможно точно предсказать ширину лопасти для наблюдаемого ЛА, поэтому когерентную обработку при построении РЛИ можно выполнить только отдельно для приближающихся и удаляющихся кромок лопастей винта [7, 9]. Для построения РЛИ приближающихся кромок винтов необходимо выделить отраженные от них сигналы, что обеспечивается на основе обработки спектра принятого сигнала.

Далее для пояснений используются иллюстративные примеры, которые получены путем моделирования для следующих параметров зондирующего сигнала: частота повторения  $F_r = 100$  кГц, длина волны  $\lambda = 0,03$  м. Размерности функций на рисунках в статье приведены в относительных единицах, значения которых в данном рассмотрении неинформативны.

На рис. 1 представлена межпериодная временная структура реальной части принятого сигнала  $u_{Rc}(n)$ ,  $n = \overline{0, N-1}$ , где  $n$  – номер периода зондирования, а число анализируемых периодов  $N = 10^5$ . Сигнал получен на выходе устройства внутрипериодной обработки путем межпериодного стробирования в элементе разрешения по дальности, в котором находится приближающийся вертолет Ми-8. Принятый сигнал содержит шумовую помеху и отраженный сигнал. На временной диаграмме видны сигналы, отраженные от лопастей несущего винта вертолета.

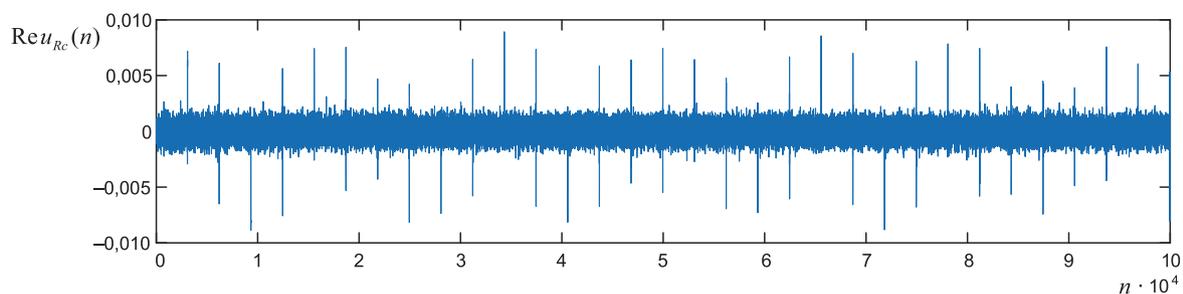
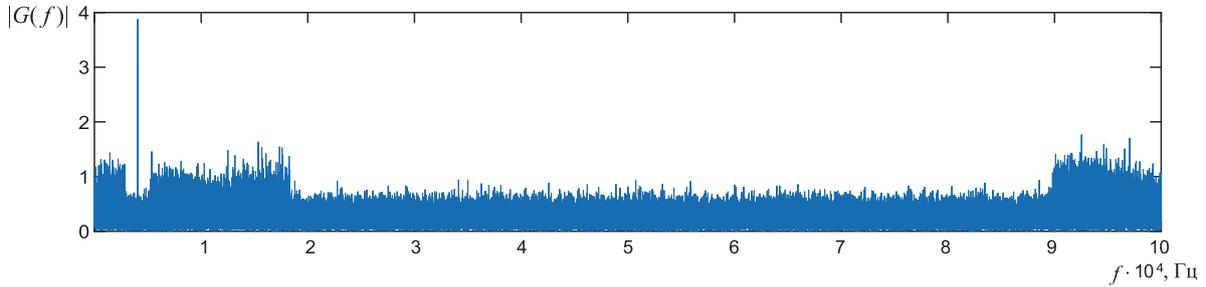


Рис. 1. Реальная часть принятого сигнала  $\text{Re} u_{Rc}(n)$ ,  $n = \overline{0, N-1}$

Fig. 1. Real part of the received signal  $\text{Re} u_{Rc}(n)$ ,  $n = \overline{0, N-1}$

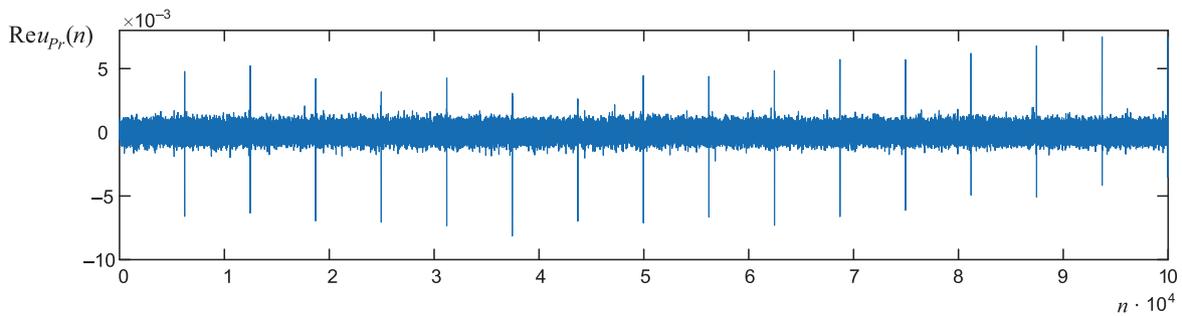
На рис. 2 показан амплитудно-частотный спектр  $|G(f)|$  принятого сигнала  $u_{Rc}(n)$ ,  $n = \overline{0, N-1}$ , в котором имеются:

- спектральная составляющая сигнала, отраженного от корпуса ЛА (наибольшая составляющая);
- спектральные составляющие сигналов, отраженных от приближающихся кромок лопастей (справа от спектральной составляющей корпуса);
- спектральные составляющие сигналов, отраженных от удаляющихся кромок лопастей (слева от спектральной составляющей корпуса).



**Рис. 2.** Амплитудно-частотный спектр принятого сигнала  
**Fig. 2.** Amplitude-frequency spectrum of the received signal

На рис. 3 представлена междупериодная временная структура реальной части принятого сигнала  $u_{pr}(n)$ ,  $n = \overline{0, N-1}$ , в котором присутствуют только сигналы, отраженные от приближающихся кромок лопастей несущего и рулевого винтов, а также часть шумовой помехи из области спектра, в которой существуют сигналы приближающихся кромок.

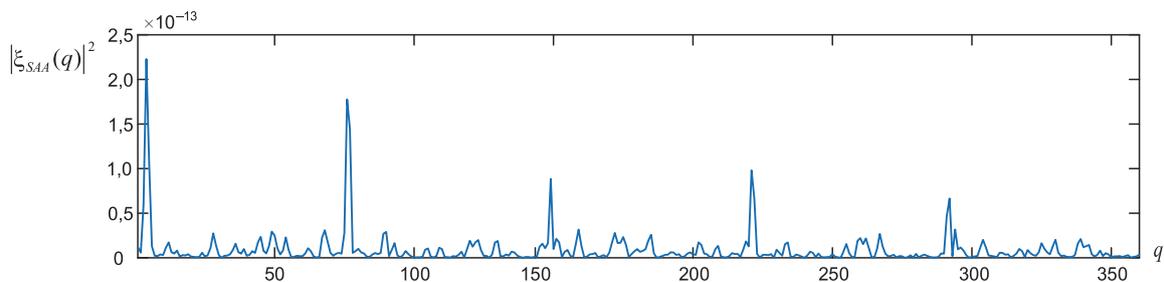


**Рис. 3.** Реальная часть принятого сигнала  $Re u_{pr}(n)$ ,  $n = \overline{0, N-1}$ , содержащая только сигналы от приближающихся кромок  
**Fig. 3.** The real part of the received signal  $Re u_{pr}(n)$ ,  $n = \overline{0, N-1}$ , containing only the signals from approaching edges

Изображение приближающихся (передних) кромок лопастей винта (винтов) строится с использованием  $N_{K\_SAA}$  каналов в горизонтальной (несущие винты) или вертикальной (тянущие винты, рулевой винт) плоскостях [7]. Каналы следуют с угловым интервалом  $\Delta\theta_K = \frac{360^\circ}{N_{K\_SAA}}$ .

РЛИ представляется в виде совокупности комплексных амплитуд  $\xi_{SAA}(q)$ ,  $q = \overline{1, N_{K\_SAA}}$ , относящихся к  $N_{K\_SAA}$  каналам.

На рис. 4 представлено РЛИ  $|\xi_{SAA}(q)|^2$ ,  $q = \overline{1, N_{K\_SAA}}$ , передних (приближающихся) кромок несущего винта вертолета Ми-8, построенное с использованием сигнала  $u_{pr}(n)$ ,  $n = \overline{0, N-1}$ , при  $N_{K\_SAA} = 360$  и длительности интервала когерентной обработки  $T_{SAA} = 3\hat{T}_{VN}$ , где  $\hat{T}_{VN}$  – измеренное значение периода вращения несущего винта Ми-8. На этом рисунке отчетливо наблюдаются изображения приближающихся кромок пяти лопастей несущего винта Ми-8.



**Рис. 4.** Радиолокационное изображение передних кромок несущего винта вертолета Ми-8  
**Fig. 4.** Radar image of the leading edges of the main rotor of the Mi-8 helicopter

Анализ РЛИ усложняется при наблюдении летательных аппаратов, у которых в одной функциональной группе два и более винтов.

На рис. 5 приведено РЛИ приближающихся кромок тянущих винтов самолета Ан-24 (два четырехлопастных винта), построенное с использованием сигнала  $u_p(n)$ ,  $n = \overline{0, N-1}$ , при  $N_{K\_SAA} = 360$  и  $T_{SAA} = 2\hat{T}_{VT}$ , где  $\hat{T}_{VT}$  – измеренное значение периода вращения тянущих винтов Ан-24.

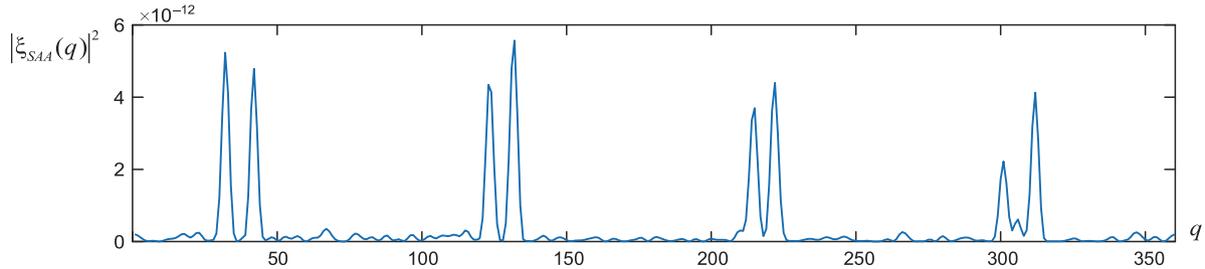


Рис. 5. Радиолокационное изображение передних кромок тянущих винтов самолета Ан-24  
Fig. 5. Radar image of the leading edges of the An-24 aircraft's tractor propellers

На рис. 6 представлено РЛИ приближающихся кромок несущих винтов квадрокоптера Z4-10 (четыре двухлопастных винта), построенное при  $N_{K\_SAA} = 360$  и  $T_{SAA} = 1,5\hat{T}_{VN}$ , где  $\hat{T}_{VN}$  – измеренное значение периода вращения несущих винтов Z4-10. По РЛИ на рис. 6 видно, что ЛА имеет несколько винтов, однако ответить на вопрос об их количестве сложно.

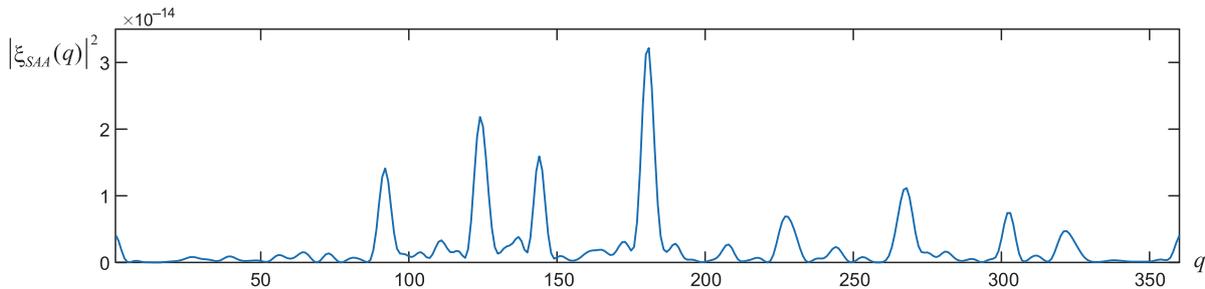


Рис. 6. Радиолокационное изображение передних кромок несущих винтов квадрокоптера Z4-10  
Fig. 6. Radar image of the leading edges of the rotors of the Z4-10 quadcopter

### Способ определения количества винтов в радиолокационном изображении

Способ определения количества винтов в РЛИ основан на периодичности следования изображений лопастей, принадлежащих одному винту. Исходными данными для рассматриваемого способа являются:

- изображение приближающихся кромок винта (винтов)  $\xi_{SAA}(q)$ ,  $q = \overline{1, N_{K\_SAA}}$ , построенное на основе измеренной в радиолокационной станции координатной информации о ЛА и оценки частоты вращения винта  $\hat{F}_V$ ;
- предполагаемое число лопастей в винте  $N_L$ , соответствующее полученной оценке частоты вращения винта  $\hat{F}_V$ .

Вначале выполняется расчет предполагаемого интервала следования изображений передних кромок лопастей в РЛИ

$$\Delta_{K\_SAA} = \frac{N_{K\_SAA}}{N_L}.$$

На основе значения  $\Delta_{K\_SAA}$  задается интервал  $k = \overline{1, K_L}$  возможных положений передних кромок всех лопастей в составе винта (винтов) ЛА, где  $K_L = \left[ \Delta_{K\_SAA} \right]_{\text{целая часть}}$  – максимальное количество возможных положений передних кромок всех лопастей (шагов при получении изображения винтов). Затем выполняется  $K_L$  циклических операций по свертке изображения одного винта в РЛИ и получению изображения винтов:

– для текущего значения  $k$  рассчитываются местоположения изображений передних кромок лопастей одного винта в РЛИ (причем для 1-й лопасти ( $g = 1$ )  $\theta_L(g) = k$ ):

$$\theta_L(g) = \left[ k + (g-1)\Delta_{K\_SAA} \right]_{\substack{\text{Целая} \\ \text{часть}}}, \quad g = \overline{1, N_L}; \quad (1)$$

– формирование свертки изображения винта для текущего значения  $k$ , которое может быть выполнено по трем вариантам:

- вариант 1 основан на произведении и имеет вид

$$Z_{S1}(k) = |\xi_{SAA}(\theta_L(1))| \times |\xi_{SAA}(\theta_L(2))| \times \dots \times |\xi_{SAA}(\theta_L(N_L))| = \prod_{g=1}^{N_L} |\xi_{SAA}(\theta_L(g))|, \quad (2)$$

где  $\prod_{g=1}^{N_L}$  – знак произведения по индексу  $g$ ;

- вариант 2 основан на сумме и имеет вид

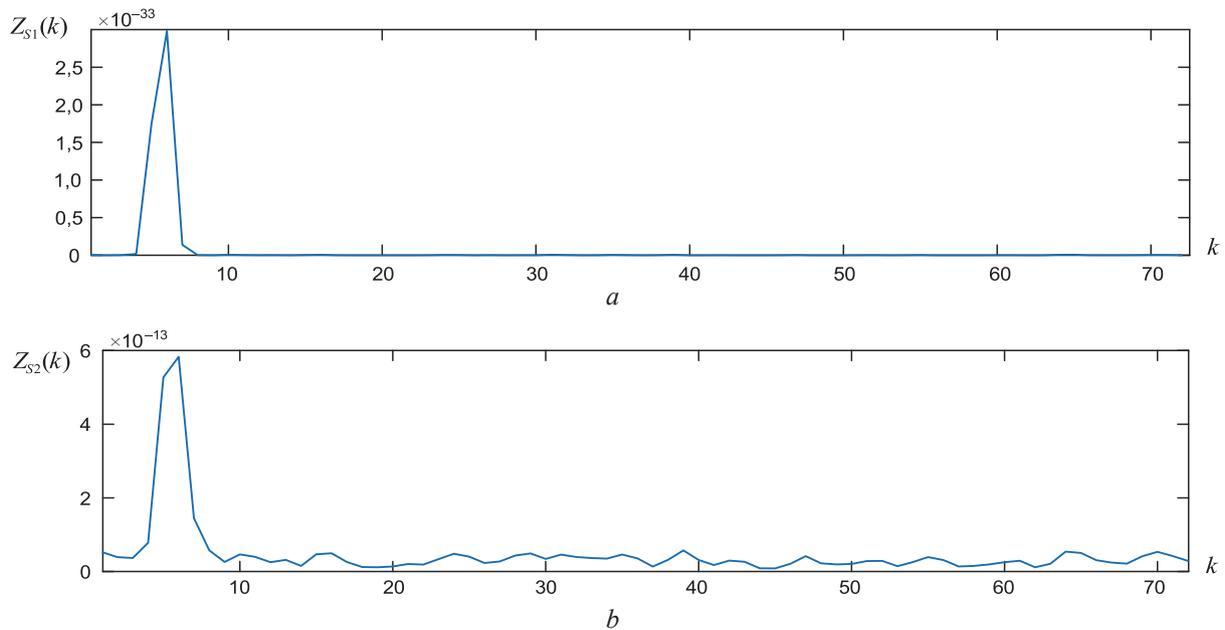
$$Z_{S2}(k) = |\xi_{SAA}(\theta_L(1))|^2 + |\xi_{SAA}(\theta_L(2))|^2 + \dots + |\xi_{SAA}(\theta_L(N_L))|^2 = \sum_{g=1}^{N_L} |\xi_{SAA}(\theta_L(g))|^2; \quad (3)$$

• вариант 3 объединяет процедуры, используемые в вариантах 1 и 2, и основан на квадрате суммы модулей

$$Z_{S3}(k) = \left( \sum_{g=1}^{N_L} |\xi_{SAA}(\theta_L(g))| \right)^2. \quad (4)$$

После выполнения всех  $k = \overline{1, K_L}$  циклов обработки получается изображение винтов  $Z_{S1(2,3)}(k)$ ,  $k = \overline{1, K_L}$ , по которому можно определить их количество.

На рис. 7–9 представлены изображения винтов для вертолета Ми-8, самолета Ан-24 и квадрокоптера Z4-10, полученные путем обработки РЛИ передних кромок лопастей (рис. 4–6) по вариантам 1 и 2. Изображения  $Z_{S1}(k)$ ,  $k = \overline{1, 72}$ , и  $Z_{S2}(k)$ ,  $k = \overline{1, 72}$ , полученные в результате обработки РЛИ горизонтальных винтов вертолета Ми-8 и представленные на рис. 7 *a, b*, однозначно указывают на наличие только одного несущего винта.

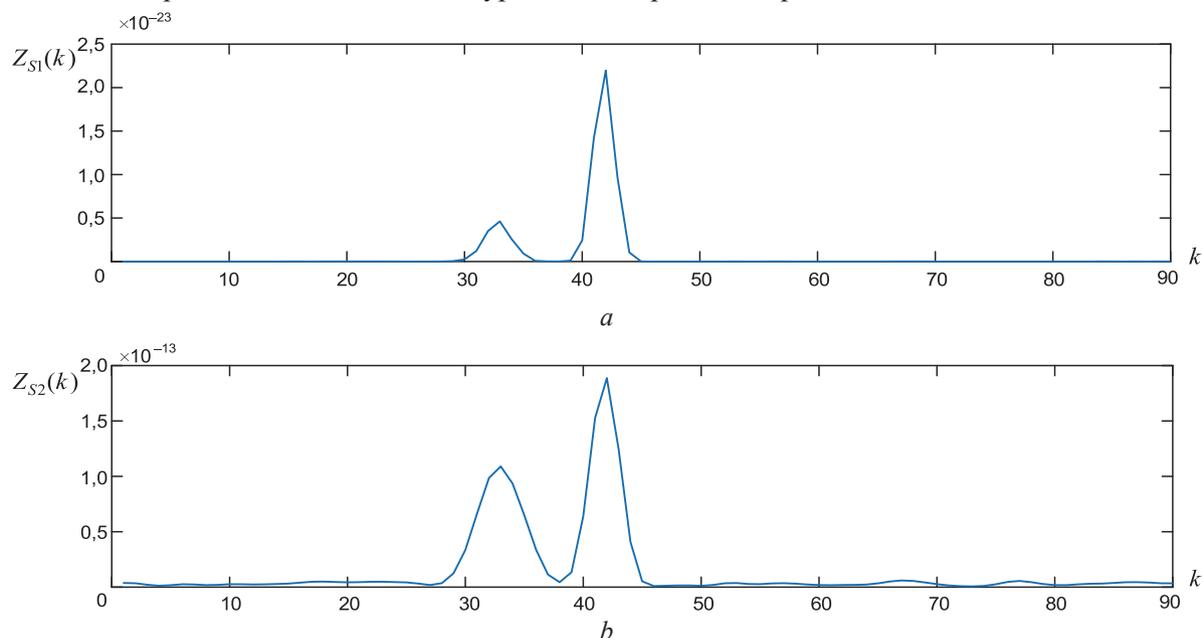


**Рис. 7.** Изображение винтов для вертолета Ми-8 по вариантам 1 (*a*) и 2 (*b*)  
**Fig. 7.** Image of propellers for the Mi-8 helicopter according to options 1 (*a*) and 2 (*b*)

Анализ изображений винтов для самолета Ан-24 (рис. 8, *a, b*), выполненный для  $k = \overline{1,90}$ , однозначно указывает на наличие двух тянущих винтов. Сопоставление изображений  $Z_{S1}(k)$ ,  $k = \overline{1,90}$ , и  $Z_{S2}(k)$ ,  $k = \overline{1,90}$ , демонстрирует следующее:

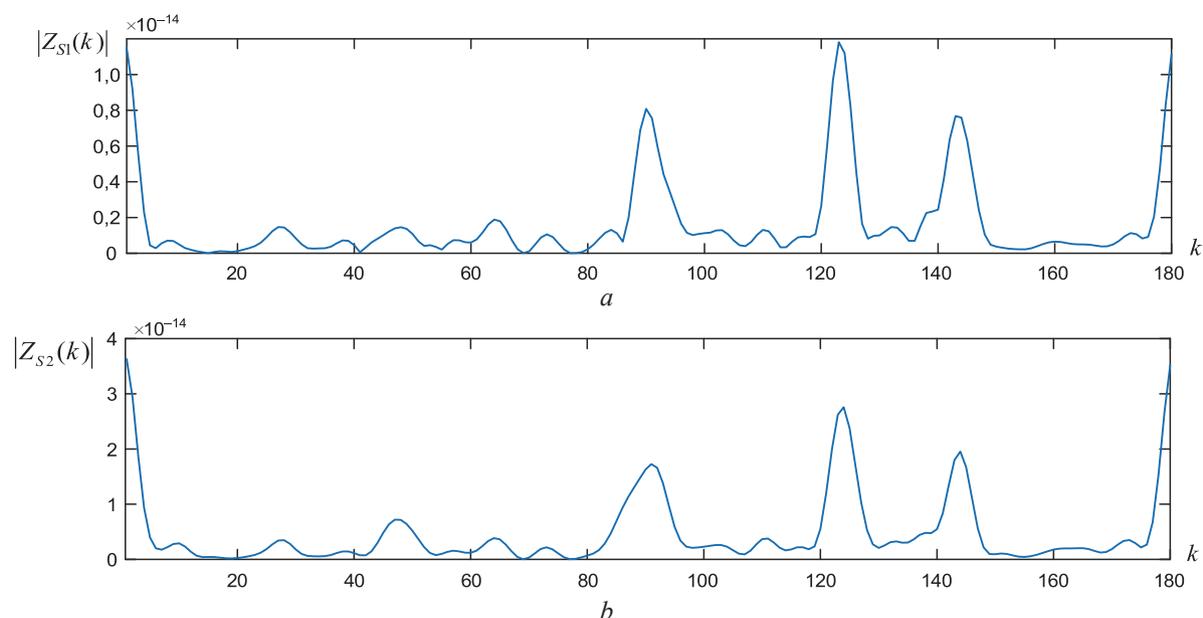
– вариант 1, основанный на произведении, обеспечивает более «контрастное» изображение винтов. Однако при низком уровне изображения одной из кромок лопастей в винте формируется низкий уровень  $Z_{S1}(k)$ ;

– вариант 2, основанный на сумме, обеспечивает более устойчивое формирование изображений винтов при любых соотношениях уровней изображений кромок лопастей.



**Рис. 8.** Изображение винтов для самолета Ан-24 по вариантам 1 (*a*) и 2 (*b*)  
**Fig. 8.** Image of propellers for the An-24 aircraft according to options 1 (*a*) and 2 (*b*)

Анализ изображений винтов для квадрокоптера Z4-10 (рис. 9, *a, b*), выполненный для  $k = \overline{1,180}$ , однозначно указывает на наличие четырех несущих винтов.



**Рис. 9.** Изображение винтов для квадрокоптера Z4-10 по вариантам 1 (*a*) и 2 (*b*)  
**Fig. 9.** Image of propellers for the Z4-10 quadcopter according to options 1 (*a*) and 2 (*b*)

Сопоставление изображений передних кромок лопастей  $|\xi_{SA}(q)|$ ,  $q = \overline{1, N_{K\_SA}}$ , и соответствующих им изображений винтов  $Z_{S1(2)}(k)$ ,  $k = \overline{1, K_L}$ , показывает, что изображение винта формируется на позиции изображения передней кромки лопасти, которая следует первой в текущем РЛИ. В свою очередь, расположение изображений передних кромок лопастей в РЛИ (рис. 4–6) соответствует расположению этих кромок в момент начала построения изображения.

### Заключение

1. Радиолокационное изображение винтов может быть использовано для распознавания класса (типа) наблюдаемого летательного аппарата, а также для селекции отметок летательных аппаратов определенного класса на фоне отметок движущихся наземных объектов. Радиолокационное изображение винтов летательного аппарата характеризует текущее расположение передних кромок лопастей у наблюдаемого летательного аппарата в плоскости вращения винтов. Анализ радиолокационного изображения лопастей винтов существенно усложняется по мере увеличения числа одинаковых винтов в составе летательного аппарата. Это усложнение обусловлено случайным взаимным расположением лопастей разных винтов в момент начала построения изображения, а также значительным увеличением (уменьшением) амплитуды сигнала в изображении при случайном совпадении пространственного положения лопастей, принадлежащих разным винтам.

2. Важной информацией, повышающей возможности распознавания (селекции) летательных аппаратов, является информация о количестве одинаковых винтов в составе аппарата. Она может быть получена на основе обработки радиолокационных изображений передних или задних кромок лопастей. В основе обработки лежит поиск регулярных структур, формируемых каждым винтом отдельно.

3. Способ определения количества винтов в летательном аппарате по радиолокационным изображениям разработан в трех вариантах – на основе: произведения (выражение (2)), суммирования (3), квадрата суммы изображений кромок (4), следующих с рассчитываемым интервалом (1). Все варианты работоспособны в условиях низкого отношения сигнал/шум (около 6 дБ, рис. 2) для спектральных составляющих «вторичной» модуляции, создаваемой винтами. Вариант 3 является наиболее привлекательным, так как объединяет процедуры, используемые в вариантах 1 и 2.

### Список литературы

1. Tait, P. Introduction to Radar Target Recognition / P. Tait. USA: Institution of Electrical Engineers, New York, 2005.
2. Shirman, Y. D. Computer Simulation of Aerial Target Radar Scattering: Detection, Recognition and Tracking / Y. D. Shirman. Boston-London: Artech House, Inc., 2002.
3. Jacobs, S. P. Automatic Target Recognition Using Sequences of High Resolution Radar Range-Profiles / S. P. Jacobs, J. A. O'Sullivan // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2000. Vol. 36, No 2. P. 364–381. DOI: 10.1109/7.845214.
4. Гейстер, С. Р. Адаптивное обнаружение-распознавание с селекцией помех по спектральным портретам / С. Р. Гейстер. Минск: Воен. акад. Респ. Беларусь, 2000.
5. Гейстер, С. Р. Спектрально-временная структура сигналов, отраженных от движущихся наземных объектов, в приложении к обращенному синтезу апертуры антенны / С. Р. Гейстер, Н. Г. Пархоменко, А. С. Гейстер // Электромагнитные волны и электронные системы. 2011. Т. 16, № 12. С. 27–33.
6. Гейстер, С. Р. Распознавание и измерение длины движущихся объектов в радиолокаторе с обращенным синтезом апертуры антенны / С. Р. Гейстер, Н. Г. Пархоменко, А. С. Гейстер // Электромагнитные волны и электронные системы. 2011. Т. 16, № 11. С. 66–70.
7. Гейстер, С. Р. Алгоритмы построения радиолокационного изображения винтов в горизонтальной и вертикальной плоскостях летательного аппарата в радиолокационном датчике с обращенным синтезом апертуры антенны / С. Р. Гейстер, Т. Т. Нгуен // Доклады БГУИР. 2018. № 5. С. 92–98.
8. Гейстер, С. Р. Способ измерения частот следования лопастей винтов летательного аппарата на основе свертки спектра «вторичной» модуляции / С. Р. Гейстер, Т. Т. Нгуен // Доклады БГУИР. 2019. № 1. С. 68–74.
9. Гейстер, С. Р. Экспериментальные исследования алгоритмов построения радиолокационных изображений винтов и способа измерения частоты следования лопастей / С. Р. Гейстер, Т. Т. Нгуен // Доклады БГУИР. 2019. № 4. С. 72–78.

## References

1. Tait P. (2005) *Introduction to Radar Target Recognition*. USA, New York, Institution of Electrical Engineers.
2. Shirman Y. D. (2002) *Computer Simulation of Aerial Target Radar Scattering: Detection, Recognition and Tracking*. Boston-London, Artech House, Inc.
3. Jacobs S. P., O'Sullivan J. A. (2000) Automatic Target Recognition Using Sequences of High Resolution Radar Range-Profiles. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 36 (2), 364–381. DOI: 10.1109/7.845214.
4. Heister S. R. (2000) *Adaptive Detection-Recognition with Noise Selection Based on Spectral Portraits*. Minsk, Military Academy of the Republic of Belarus (in Russian).
5. Heister S. R., Parkhomenko N. G., Heister A. S. (2011) Spectral-Temporal Structure of Signals Reflected from Moving Ground Objects, in Application to Inverse Synthesis of the Antenna Aperture. *Electromagnetic Waves and Electronic Systems*. 16 (12), 27–33 (in Russian).
6. Heister S. R., Parkhomenko N. G., Heister A. S. (2011) Recognition and Measurement of the Length of Moving Objects in an Inverted Aperture Synthesis Radar. *Electromagnetic Waves and Electronic Systems*. 16 (11), 66–70 (in Russian).
7. Heister S. R., Nguyen T. T. (2018) Algorithms for Constructing a Radar Image of Propellers in the Horizontal and Vertical Planes of an Aircraft in a Radar Sensor with Inverted Antenna Aperture Synthesis. *Doklady BGUIR*. (5), 92–98 (in Russian).
8. Heister S. R., Nguyen T. T. (2019) A Method for Measuring the Repetition Rates of Aircraft Rotor Blades Based on Convolution of the “Secondary” Modulation Spectrum. *Doklady BGUIR*. (1), 68–74 (in Russian).
9. Heister S. R., Nguyen T. T. (2019) Experimental Studies of Algorithms for Constructing Radar Images of Propellers and a Method for Measuring Blade Repetition Rate. *Doklady BGUIR*. (4), 72–78 (in Russian).

## Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

## Сведения об авторах

**Гейстер С. Р.**, д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр. ОАО «АЛЕВКУРП»

**Кириченко В. В.**, ст. науч. сотр. ОАО «АЛЕВКУРП»

## Адрес для корреспонденции

223050, Республика Беларусь,  
Минская обл., Минский р-н, Боровлянский с/с,  
д. Королев Стан, ул. Московская, 1а, ком. 17  
ОАО «АЛЕВКУРП»  
Тел.: +375 29 760-86-71  
E-mail: hsr\_aero1960@mail.ru  
Гейстер Сергей Романович

## Information about the authors

**Heister S. R.**, Dr. of. Sci. (Tech.), Professor, Chief Researcher at JSC “ALEVKURP”

**Kirychenka V. V.**, Senior Researcher at JSC “ALEVKURP”

## Address for correspondence

223050, Republic of Belarus,  
Minsk Region, Minsk District, Borovlyansky S/S,  
Korolev Stan Village, Moscow St., 1a, room 17  
JSC “ALEVKURP”  
Tel.: +375 29 760-86-71  
E-mail: hsr\_aero1960@mail.ru  
Heister Sergey Romanovich