

УДК 621.396.96

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ ПОСТРОЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВИНТОВ И СПОСОБА ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ СЛЕДОВАНИЯ ЛОПАСТЕЙ

С.Р. ГЕЙСТЕР¹, Т.Т. НГУЕН²

¹Научно-исследовательский институт Вооруженных Сил Республики Беларусь, Республика Беларусь

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 4 февраля 2019

Аннотация. В [1] предложены алгоритмы построения радиолокационных изображений (РЛИ) винтов летательных аппаратов, принадлежащих к классам «вертолет» и «винтовой самолет». Алгоритмы предназначены для реализации в радиолокационном датчике с обращенным синтезом апертуры антенны. Принципиальным условием качественного построения РЛИ винтов является точное измерение частот их вращения. В [2] предложен способ измерения частоты следования лопастей винта на основе свертки спектра «вторичной» модуляции отраженного сигнала винта. В данной работе рассматриваются результаты экспериментальных исследований способа измерения частоты следования лопастей винта и алгоритмов формирования РЛИ винтов типовых маловысотных летательных аппаратов (вертолетов и винтовых самолетов).

Ключевые слова: частота вращения, частота следования лопастей, несущий винт, рулевой винт, тянущий винт, вертолет, винтовой самолет.

Abstract. The radar image construction algorithms for propellers of aerial vehicles belonging to the classes «helicopter» and «propeller-driven aircraft» were proposed in [1]. The algorithms are designed to be implemented in a radar sensor with inverse synthesis of antenna aperture. The fundamental condition for the qualitative construction of radar images of the propellers is accurate measurement of their rotation frequency. The measurement method for the repetition frequency of the propeller blades on the base of the convolution of the spectrum of the «secondary» modulation of the signal reflected from propeller was proposed in [2]. This paper discusses the results of experimental studies of the measurement method for repetition frequency of the propeller blades and of the radar images construction algorithms of propellers of typical low-altitude aircraft (helicopters and propeller-driven aircrafts).

Keywords: rotational frequency, blade repetition frequency, main rotor, tail rotor, aircraft propeller, helicopter, propeller-driven fixed-wing aircraft.

Doklady BGUIR. 2019, Vol. 122, No. 4, pp. 72-78

**Experimental studies of radar image construction algorithms
for propellers and measurement method for repetition frequencies of the blades**

S.R. Heister, T.T. Nguyen

Введение

В [1] предложены алгоритмы формирования РЛИ горизонтальных и вертикальных винтов маловысотных летательных аппаратов на основе обращенного синтеза апертуры антенны (ОСАА) при монохроматическом зондирующем сигнале (МХЗС). Разработка подобных по назначению алгоритмов проводилась учеными за рубежом [3, 4]. Однако в [3, 4] не рассмотрена задача формирования РЛИ вертикальных винтов (рулевых винтов (РВ) одновинтовых вертолетов и тянущих винтов (ТВ) винтовых самолетов) на фоне отражений

от корпуса. Кроме того, определение частоты следования лопастей винта в [3, 4] основано на автокорреляционной функции отраженного сигнала (ОС) винта, что влечет за собой осложнения, связанные с влиянием сигнала, отраженного от корпуса летательного аппарата (ЛА), который совершает маневрирование или полет с быстрым изменением ракурса относительно радиолокатора. В [1, 2] эти проблемные вопросы решены. Кроме того, использование МХЗС [1] при ОСАА позволяет более эффективно бороться с мешающими отражениями (МО) при работе по маловысотным объектам, уменьшить габариты и снизить стоимость разрабатываемого радиолокационного датчика (РЛД). По полученным РЛИ винтов ЛА можно определить число лопастей и ориентацию винтов. Разработанный способ [2] измерения частоты следования лопастей винта на основе свертки спектра «вторичной» модуляции (ССВМ) ОС наряду с выполнением основной функции устраняет негативное влияние на измерение быстрого изменения радиальной скорости ЛА.

Условия проведения экспериментальных исследований

В состав экспериментального исследовательского комплекса (ЭИК) входили приемопередающий модуль, звуковая карта преобразования сигнала в цифровой вид и ноутбук, выполнивший роль регистратора. Зондирующий сигнал монохроматический с несущей частотой $f_0 = 24$ ГГц. Ширина диаграммы направленности антенны (ДНА) ЭИК 12 град в обеих плоскостях. Высота установки фазового центра антенны относительно уровня земли 1,55 м. Принятый сигнал на входе звуковой карты представлялся двумя квадратурными составляющими на видеочастоте, которые преобразовывались в цифровой вид с частотой дискретизации $f_d = 96$ кГц и числом разрядов 24.

Схема эксперимента для самолета Ан-2МС, имеющего пятилопастной ТВ, представлена на рис. 1. При проведении эксперимента самолет двигался по взлетно-посадочной полосе (ВПП) на приближение к РЛД, причем дальность до самолета изменялась от 600 до 40 м. Схема эксперимента для вертолета Ми-2, имеющего трехлопастной НВ и двухлопастной РВ, представлена на рис. 2. В начальный момент вертолет Ми-2 зависал, затем удалялся от РЛД на высоте примерно 7 м по прямой линии. Начальная дальность до вертолета составляла 40 м.

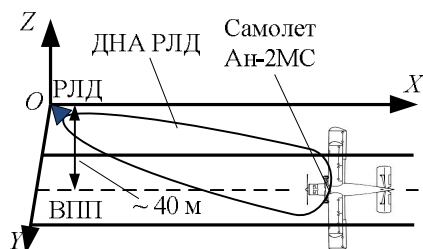


Рис. 1. Схема эксперимента для самолета Ан-2МС (вид сверху)

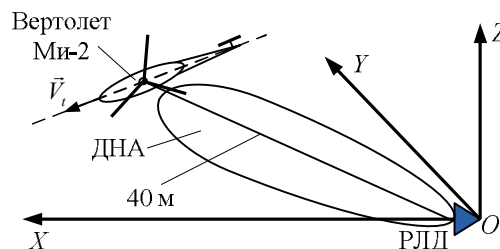


Рис. 2. Схема эксперимента для вертолета Ми-2 (вид сверху)

Результаты экспериментальных исследований способа измерения частоты следования лопастей винта

На рис. 3 представлены квадраты модулей правой (для приближающихся лопастей (ПЛ)) и левой (для удаляющихся лопастей (УЛ)) частей спектра $G_{PL_NV}(f)$ сигнала от НВ зависшего вертолета Ми-2 и спектра $G_{PL_TV}(f)$ сигнала от ТВ медленно движущегося самолета Ан-2МС по ВПП. Время формирования спектров $T_a = 1,365$ с. Результаты определения фаз сверток соседних спектральных составляющих «вторичной модуляции» правой и левой частей спектров сигналов НВ и ТВ представлены в табл. 1–4.

Анализ фаз сверток соседних составляющих в левой и в правой частях спектров ОС НВ вертолета и ТВ самолета при наличии шумов показывает следующее: разности фаз между соседними спектральными составляющими в каждой (правой или левой) части спектра ОС НВ (ОС ТВ) практически одинаковы, а фазы сверток в левой $\xi_{-n} \xi_{-(n+1)}^*$ и в правой $\xi_{n+1} \xi_n^*$ частях

спектра ОС НВ (ОС ТВ), у которых количество лопастей нечетное, отличаются примерно на 180° . Это соответствует результатам моделирования, приведенным в [2].

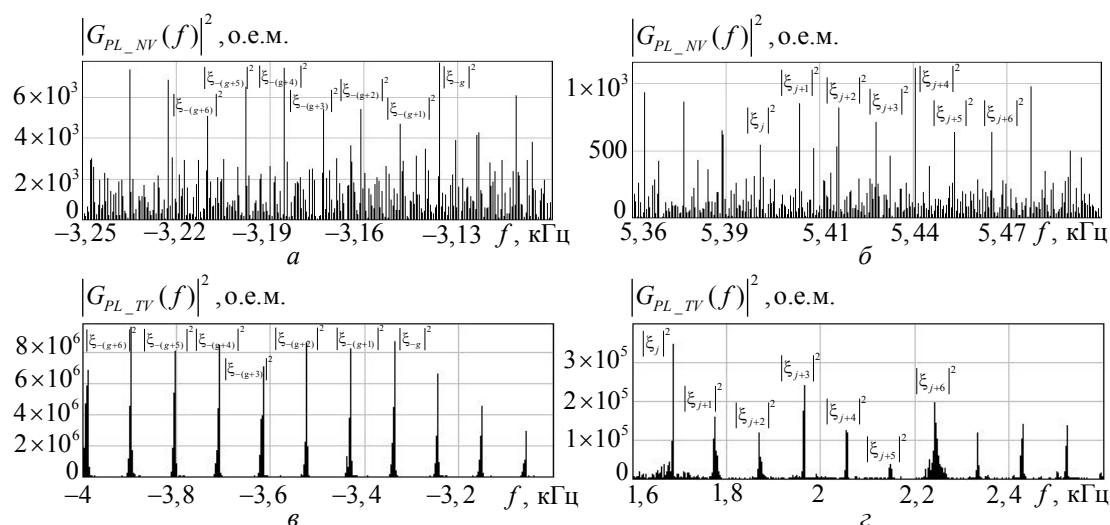


Рис. 3. Спектры сигналов от УЛ (а) и ПЛ (б) несущего винта зависшего вертолета Ми-2, спектры сигналов от УЛ (в) и ПЛ (г) тянущего винта самолета Ан-2МС

Таблица 1. Фазы сверток соседних составляющих в левой части спектра ОС НВ вертолета Ми-2

Свертка	$\xi_{-g} \xi_{-(g+1)}^*$	$\xi_{-(g+1)} \xi_{-(g+2)}^*$	$\xi_{-(g+2)} \xi_{-(g+3)}^*$	$\xi_{-(g+3)} \xi_{-(g+4)}^*$	$\xi_{-(g+4)} \xi_{-(g+5)}^*$	$\xi_{-(g+5)} \xi_{-(g+6)}^*$
Фаза, град	-126,302	-114,524	-127,902	-120,984	-124,002	-122,368

Таблица 2. Фазы сверток соседних составляющих в правой части спектра ОС НВ вертолета Ми-2

Свертка	$\xi_{j+1} \xi_j^*$	$\xi_{j+2} \xi_{j+1}^*$	$\xi_{j+3} \xi_{j+2}^*$	$\xi_{j+4} \xi_{j+3}^*$	$\xi_{j+5} \xi_{j+4}^*$	$\xi_{j+6} \xi_{j+5}^*$
Фаза, град	88,145	75,749	73,343	82,792	89,44	76,411

Таблица 3. Фазы сверток соседних составляющих в левой части спектра ОС ТВ самолета Ан-2МС

Свертка	$\xi_{-g} \xi_{-(g+1)}^*$	$\xi_{-(g+1)} \xi_{-(g+2)}^*$	$\xi_{-(g+2)} \xi_{-(g+3)}^*$	$\xi_{-(g+3)} \xi_{-(g+4)}^*$	$\xi_{-(g+4)} \xi_{-(g+5)}^*$	$\xi_{-(g+5)} \xi_{-(g+6)}^*$
Фаза, град	97,54	113,62	96,35	75,63	100,76	134,39

Таблица 4. Фазы сверток соседних составляющих в правой части спектра ОС ТВ самолета Ан-2МС

Свертка	$\xi_{j+1} \xi_j^*$	$\xi_{j+2} \xi_{j+1}^*$	$\xi_{j+3} \xi_{j+2}^*$	$\xi_{j+4} \xi_{j+3}^*$	$\xi_{j+5} \xi_{j+4}^*$	$\xi_{j+6} \xi_{j+5}^*$
Фаза, град	-85,52	-91,5	-84,23	-104,99	-105,95	-112,65

Результаты измерения частот следования лопастей НВ и РВ для вертолета Ми-2. На рис. 4 представлен квадрат модуля спектра $G_p(f)$ принятого сигнала $U_p(t)$, преобразованного на видеочастоту. Время формирования спектра $T_a = 2,73$ с.

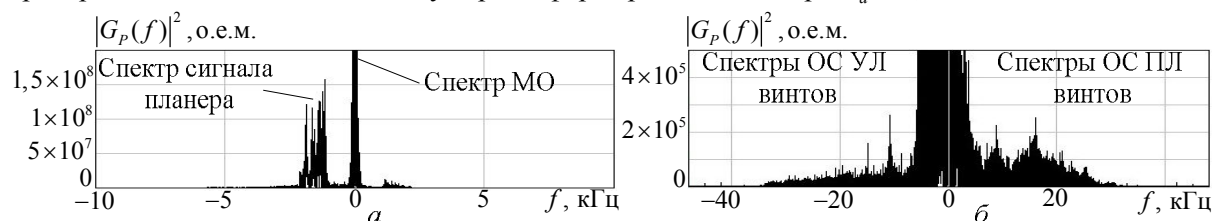


Рис. 4. Спектр принятого сигнала

Спектр принятого сигнала (рис. 4) содержит локализованный по частоте спектр мощных МО, а также размывающиеся из-за быстрого изменения частоты Доплера, обусловленного изменением ракурса наблюдения, спектры сигналов планера (рис. 4, а), УЛ и ПЛ несущего и рулевого винтов (рис. 4, б). Далее при исследовании способа, изложенного в [2], обработке подвергался преобразованный принятый сигнал, из которого были удалены ОС корпуса и МО. Время когерентного накопления $T_a = 2,73$ с. Границы анализируемого диапазона частот следования лопастей для НВ приняты равными

$F_{L_NV_min} = 9\text{ Гц}$ и $F_{L_NV_max} = 20\text{ Гц}$, а для РВ – $F_{L_RV_min} = 40\text{ Гц}$ и $F_{L_RV_max} = 80\text{ Гц}$. Шаг изменения частоты в каналах обработки [2] принят равным $\Delta F = 0,01\text{ Гц}$.

На рис. 5 представлены зависимости квадратов модулей комплексных амплитуд выходных сигналов $|Z_{II_PL_NV}(F_{L_NV_izm})|^2$ и $|Z_{II_UL_NV}(F_{L_NV_izm})|^2$ многоканальных устройств [2] свертки спектра «вторичной модуляции» (МКУ ССВМ) для НВ от анализируемой частоты. На рис. 6 представлены зависимости $|Z_{II_PL_RV}(F_{L_RV_izm})|^2$ и $|Z_{II_UL_RV}(F_{L_RV_izm})|^2$ МКУ ССВМ для РВ от анализируемой частоты, причем обработке подвергался сигнал, из которого дополнительно был удален сигнал от НВ. Для уменьшения уровней боковых лепестков каналов МКУ ССВМ было использовано весовое окно Хеммига.

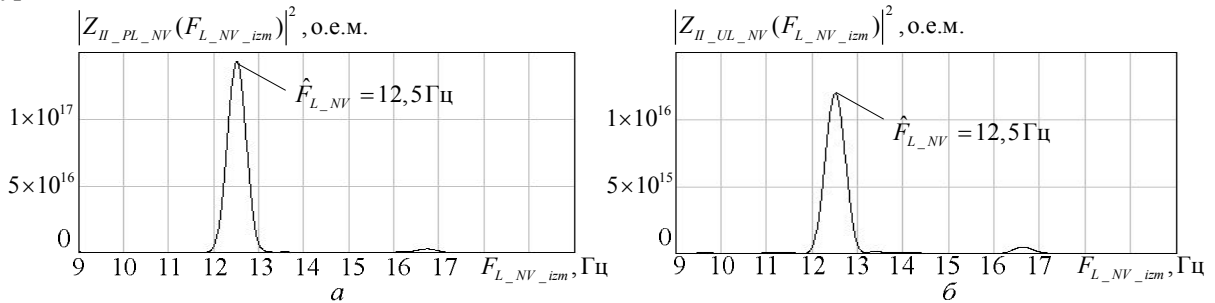


Рис. 5. Зависимости квадратов модулей выходных свертки МКУ ССВМ от измеряемой частоты: а – для ОС ПЛ НВ, б – для ОС УЛ НВ

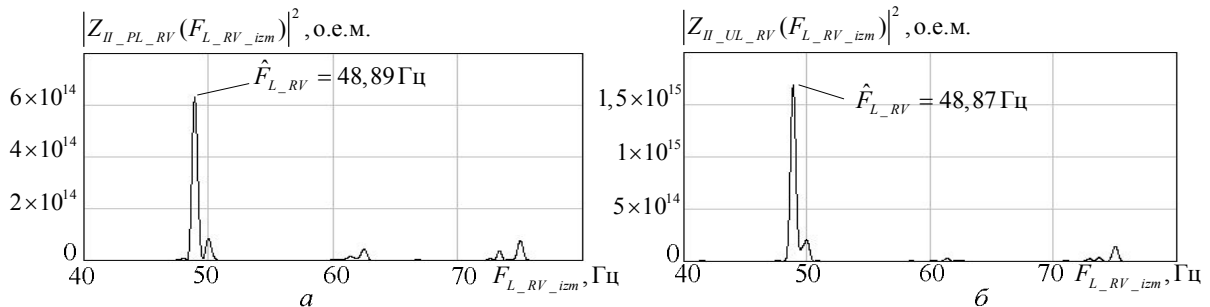


Рис. 6. Зависимости квадратов модулей выходных свертки МКУ ССВМ от измеряемой частоты: а – для ОС ПЛ РВ, б – для ОС УЛ РВ

Исходя из рис. 5, 6, оценка частоты следования лепестков НВ составляет $\hat{F}_{L_NV} = 12,5\text{ Гц}$, а оценка частоты следования лепестков РВ – $\hat{F}_{L_RV} = 48,87\text{ Гц}$. Модуль разности фаз между свертками $Z_{II_PL_NV}(\hat{F}_{L_NV})$ и $Z_{II_UL_NV}(\hat{F}_{L_NV})$ составляет $|\Delta\varphi_{Z_NV}| = 217,95^\circ$ и, следовательно, НВ имеет нечетное число лепестков. Число лепестков РВ является четным, так как модуль разности фаз между свертками $Z_{II_PL_RV}(\hat{F}_{L_RV})$ и $Z_{II_UL_RV}(\hat{F}_{L_RV})$ составляет $|\Delta\varphi_{Z_RV}| = 0,837^\circ$.

Результаты измерения частот следования лепестков ТВ для самолета Ан2-МС. На рис. 7 представлены спектр принятого сигнала с момента $t_0 = 50\text{ с}$ и временная реализация сигнала ТВ $U_{PL_TV}(t)$, полученная после удаления из принятого сигнала составляющих ОС планера и МО. На рис. 8 представлены зависимости $|Z_{II_PL_TV}(F_{L_TV_izm})|^2$ и $|Z_{II_UL_TV}(F_{L_TV_izm})|^2$ МКУ ССВМ для ТВ от анализируемой частоты. Границы анализируемого диапазона частот следования лепестков для ТВ приняты равными $F_{L_TV_min} = 40\text{ Гц}$ и $F_{L_TV_max} = 150\text{ Гц}$. Шаг изменения частоты $\Delta F = 0,01\text{ Гц}$.

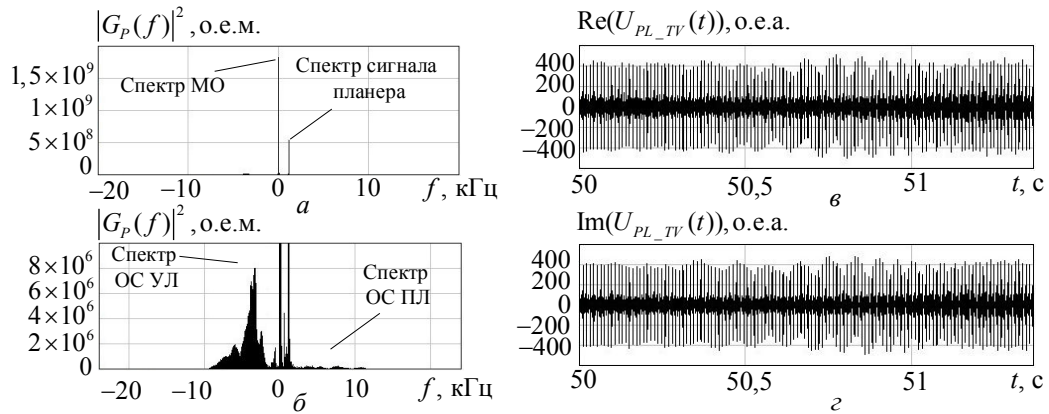


Рис. 7. Спектр принятого сигнала (а, б) и временная реализация сигнала ТВ (в, г)

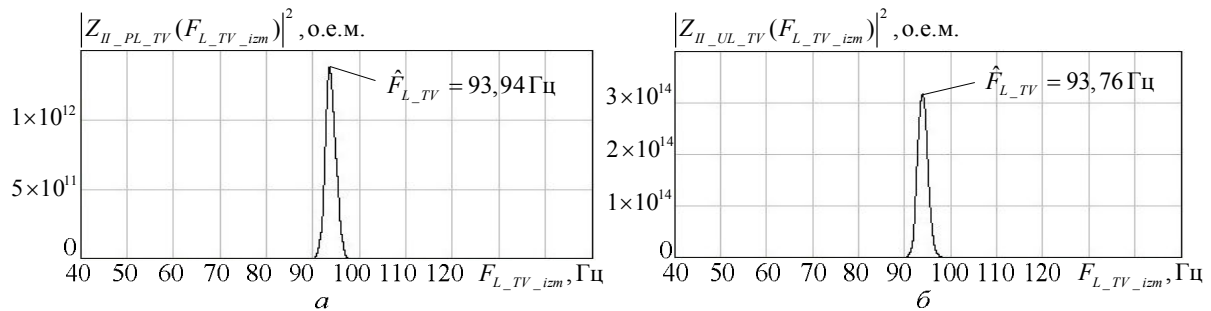


Рис. 8. Зависимости квадратов модулей выходных сверток МКУ ССВМ от измеряемой частоты, а – для ОС ПЛ ТВ, б – для ОС УЛ ТВ

Исходя из рис. 8, оценка частоты следования лопастей ТВ составляет $\hat{F}_{L_TV} = 93,76 \text{ Гц}$. Модуль разности фаз между свертками $Z_{II_PL_TV}(\hat{F}_{L_TV})$ и $Z_{II_UL_TV}(\hat{F}_{L_TV})$ составляет $|\Delta\varphi_{Z_TV}| = 220,53^\circ$ и, следовательно, ТВ имеет нечетное число лопастей.

Результаты экспериментальных исследований алгоритмов построения радиолокационных изображений винтов

Исходя из полученных признаков четности числа лопастей для НВ и РВ вертолета и ТВ самолета, можно предполагать, что число лопастей НВ может принимать значения $N_{L_NV} = 3, 5, 7$, число лопастей РВ – $N_{L_RV} = 2, 4$, число лопастей ТВ – $N_{L_TV} = 3, 5$. Отсюда можно получить оценки возможных частот вращения винтов путем деления измеренной частоты следования лопастей каждого винта на соответствующее число его лопастей. Оценки возможных частот вращения НВ F_{NV} , РВ F_{RV} и ТВ F_{TV} представлены в таблице 5.

Таблица 5. Оценки частот вращения винтов

Число лопастей	2	3	4	5	6	7	8
F_{NV} , Гц		4,167		2,5		1,786	
F_{RV} , Гц	24,435		12,218				
F_{TV} , Гц		31,253		18,752			

Известно, что частота вращения НВ должна лежать в пределах $F_{NV} = 2, 1 \dots 5 \text{ Гц}$. Из таблицы сочетание (N_{L_NV}, F_{NV}) для НВ при $N_{L_NV} = 7$ не удовлетворяет данному условию.

В полете без учета скорости движения ЛА линейная скорость $V_{KL} = 2\pi R_L F_V$ концевой точки лопасти воздушного винта, находящейся на расстоянии R_L от центра вращения, лежит в пределах $V_{KL} = 200 \dots 230 \text{ м/с}$ [5, 6]. В приведенном выражении F_V является частотой вращения

винта. Если частота вращения ТВ $F_V = F_{TV} = 31,253 \text{ Гц}$, то линейная скорость концевой точки при типовом значении $R_L = 1,8 \text{ м}$ равна $V_{KL} = 353,46 \text{ м/с}$. Следовательно, значение частоты $F_{TV} = 31,253 \text{ Гц}$, приведенное в табл. 5, не удовлетворяет условию «линейная скорость концевой точки в диапазоне (200...230) м/с» и должна быть исключена из анализа.

Рассмотрим результаты построения РЛИ НВ, РВ и ТВ с измеренными возможными значениями частот вращения по алгоритмам ОСАА, описанным в [1].

Параметры каналов ОСАА для построения РЛИ винтов ЛА: угловой интервал между каналами ОСАА 1 град (360 каналов ОСАА); время синтеза для НВ и РВ вертолета 0,24 с, а для ТВ самолета 0,107 с.

На рис. 9–11 представлены результаты построения РЛИ винтов для возможных частот вращения в виде зависимости квадратов модулей выходных сигналов каналов ОСАА от номера канала $n_0 = \overline{1,360}$.

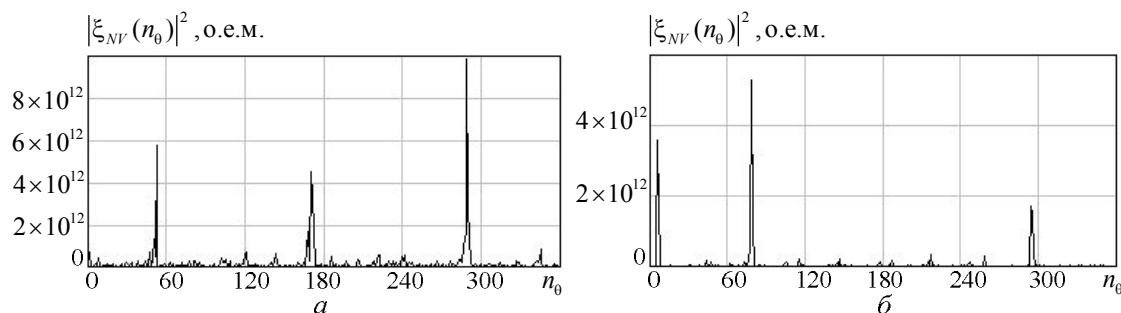


Рис. 9. РЛИ несущего винта при $F_{NV} = 4,167 \text{ Гц}$ (а) и $F_{NV} = 2,5 \text{ Гц}$ (б)

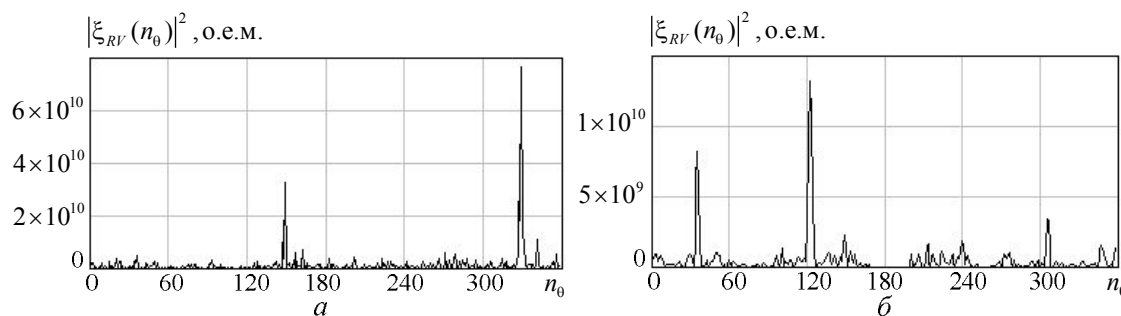


Рис. 10. РЛИ рулевого винта при $F_{RV} = 24,435 \text{ Гц}$ (а) и $F_{RV} = 12,218 \text{ Гц}$ (б)

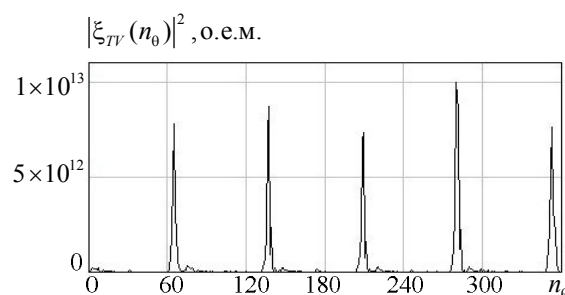


Рис. 11. РЛИ тянущего винта при $F_{TV} = 18,752 \text{ Гц}$

Анализ результатов построения РЛИ винтов показывает, что при правильном сочетании «число лопастей – частота вращения» на РЛИ винта появляются высокие пики, следующие по угловому положению с одинаковыми интервалами и соответствующие положениям лопастей в начале синтеза (см. рис. 9, а, 10, а, 11). При неправильном сочетании «число лопастей – частота вращения» получаются РЛИ с нерегулярным расположением и более низким уровнем пиков (см. рис. 9, б, 10, б). По полученным РЛИ определено количество лопастей в винтах – в НВ $N_{L_NV} = 3$, в РВ $N_{L_RV} = 2$ и в ТВ $N_{L_TV} = 5$, что соответствует винтам объектов исследований.

Заключение

Результаты экспериментальных исследований подтвердили справедливость теоретических исследований способа измерения частоты следования лопастей и алгоритмов построения РЛИ горизонтального и вертикального винтов на основе ОСАА. Информация о частоте вращения, ориентации, длине и числе лопастей винтов позволяет выполнить распознавание обнаруженных маловысотных ЛА.

Список литературы

1. Гейстер С.Р., Нгуен Т.Т. Алгоритмы построения радиолокационного изображения винтов в горизонтальной и вертикальной плоскостях летательного аппарата в радиолокационном датчике с обращенным синтезом апертуры антенны // Докл. БГУИР. 2018. № 5 (115). С. 92–98.
2. Гейстер С.Р., Нгуен Т.Т. Способ измерения частот следования лопастей винтов летательного аппарата на основе свертки спектра «вторичной» модуляции // Докл. БГУИР. 2019. № 1 (119). С. 68–74.
3. Microwave radar imaging of rotating blades / H.T. Tran [et al.] // IEEE International Radar Conference (Radar). 2013. P. 202–207.
4. Melino R., Kodituwakku S., Tran H.T. Orthogonal Matching Pursuit and Matched Filter Techniques for the Imaging of Rotating Blades // IEEE Radar Conference. 2015. P. 1–6.
5. Barry D. Bullard, Patrick C. Dowdy. Pulse Doppler signature of a rotary-wing aircraft // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. 1991. Vol. 6, iss. 5. P. 28–30.
6. Tikkinen J.M., Helander E.E., Visa A. Joint utilization of incoherently and coherently integrated radar signal in helicopter categorization // IEEE International Radar Conference. 2005. P. 540–545.

References

1. Gejster S.R., Nguen T.T. Algoritmy postroenija radiolokacionnogo izobrazhenija vintov v gorizontal'noj i vertikal'noj ploskostjah letatel'nogo apparata v radiolokacionnom datchike s obrashhennym sintezom apertury anteny // Dokl. BGUIR. 2018. № 5 (115). S. 92–98. (in Russ.)
2. Gejster S.R., Nguen T.T. Sposob izmerenija chastot sledovaniya lopastej vintov letatel'nogo apparata na osnove svertki spektra «vtorichnoj» moduljacji // Dokl. BGUIR. 2019. № 1 (119). S. 68–74. (in Russ.)
3. Microwave radar imaging of rotating blades / H.T. Tran [et al.] // IEEE International Radar Conference (Radar). 2013. P. 202–207.
4. Melino R., Kodituwakku S., Tran H.T. Orthogonal Matching Pursuit and Matched Filter Techniques for the Imaging of Rotating Blades // IEEE Radar Conference. 2015. P. 1–6.
5. Barry D. Bullard, Patrick C. Dowdy. Pulse Doppler signature of a rotary-wing aircraft // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. 1991. Vol. 6, iss. 5. P. 28–30.
6. Tikkinen J.M., Helander E.E., Visa A. Joint utilization of incoherently and coherently integrated radar signal in helicopter categorization // IEEE International Radar Conference. 2005. P. 540–545.

Сведения об авторах

Гейстер С.Р., д.т.н., профессор, главный научный сотрудник Научно-исследовательского института Вооруженных сил Республики Беларусь.

Нгуен Т.Т., аспирант кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Heister S.R., D.Sci., professor, main researcher of Research Institute of the Armed Forces of the Republic of Belarus

Nguyen T.T., PG student of information radiotechnologies department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

20013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
e-mail: hsr_1960@yahoo.com
Гейстер Сергей Романович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka st., 6
Belarusian state university
of informatics and radioelectronics
e-mail: hsr_1960@yahoo.com
Heister Sergey Romanovich