

УДК 621.396.96

## АЛГОРИТМЫ ПОСТРОЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ВИНТОВ В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ И ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТЯХ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В РАДИОЛОКАЦИОННОМ ДАТЧИКЕ С ОБРАЩЕННЫМ СИНТЕЗОМ АПЕРТУРЫ АНТЕННЫ

С.Р. ГЕЙСТЕР<sup>1</sup>, Т.Т. НГУЕН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт Вооруженных Сил Республики Беларусь, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 7 июня 2018

**Аннотация.** Рассматриваются алгоритмы построения радиолокационного изображения (РЛИ) вращающихся элементов летательного аппарата (ЛА) в радиолокационном датчике (РЛД) с обращенным синтезом апертуры антенны (ОСАА) при использовании монохроматического зондирующего сигнала (МХЗС). Разработанные алгоритмы позволяют формировать РЛИ винтов, ориентированных горизонтально (несущий винт (НВ) вертолета) и вертикально (рулевой винт (РВ) вертолета, тянущий винт (ТВ) самолета). Такие РЛИ позволят существенно повысить качество радиолокационного распознавания низколетящих объектов. Представляется оценка работоспособности алгоритмов, полученная путем математического моделирования.

**Ключевые слова:** обращенный синтез апертуры антенны, винт, летательный аппарат, самолет, вертолет.

**Abstract.** The radar image formation algorithms for rotating parts of an aerial vehicle in the radar sensor with inverse synthesis of antenna aperture using the monochromatic probing signal are considered. The developed algorithms allow forming radar images of screws oriented horizontally (helicopter main rotor) and vertically (helicopter tail rotor, aircraft propeller). Such radar images will significantly improve the quality of radar recognition of low-flying objects. The estimation of efficiency of algorithms obtained by mathematical modeling is presented.

**Keywords:** inverse synthetic aperture radar, screw, aerial vehicle, aircraft, helicopter.

**Doklady BGUIR. 2018, Vol. 115, No. 5, pp. 92-98**

**The radar image formation algorithms for screws of an aerial vehicle  
in horizontal and vertical planes in the radar sensor with inverse synthesis of antenna aperture  
S.R. Heister, T.T. Nguyen**

### Введение

Условие сверхразрешения по угловым координатам может обеспечиваться при использовании физической антенны с большой апертурой [1], однако такое решение не является идеальным. Одним из компромиссных решений задачи сверхразрешения движущихся объектов в малогабаритных РЛД является использование ОСАА. В [2] представлен пример такого решения в приложении к разрешению наземных объектов. Аналогичное решение может быть использовано для распознавания класса маловысотных ЛА в РЛД с ОСАА [3]. Основными задачами такого РЛД являются обнаружение, измерение координат и параметров движения объекта, а также его распознавание на основе сформированных изображений корпуса и винтов ЛА (при наличии). По наличию (отсутствию) и ориентации винтов в полете ЛА, использующие предельно малые высоты, могут делиться на следующие классы:

- реактивные ЛА (крылатые ракеты, реактивные самолеты);
- вертолеты и вертолетные беспилотные ЛА (БПЛА) с горизонтальной ориентацией несущих винтов;
- винтовые самолеты и БПЛА, построенные по самолетной схеме с вертикальной ориентацией тянущих (толкающих) винтов.

В данной работе рассматриваются алгоритмы ОСАА, предназначенные для реализации в РЛД с МХЗС и обеспечивающие построение РЛИ винтов ЛА.

### Алгоритм обращенного синтеза апертуры антенны для построения радиолокационного изображения винта, вращающегося в горизонтальной плоскости

Полагаем, что на коротком интервале времени локации ЛА движется прямолинейно со скоростью  $V_t$  по линии, параллельной оси  $OX$ , на фиксированной высоте  $z_0$  относительно РЛД (см. рис. 1). К моменту начала ОСАА определены координаты центра винта  $C$  ( $x_0, y_0, z_0$ ), вектор скорости ЛА и частота вращения  $F_{V\_H}$  горизонтального (несущего) винта (ГВ), которая определяется по спектру или автокорреляционной функции сигнала, отраженного от винта [4]. Считаем, что в принятом сигнале есть только сигнал, отраженный от ГВ, вращающегося параллельно плоскости  $XOY$  (см. рис. 1).

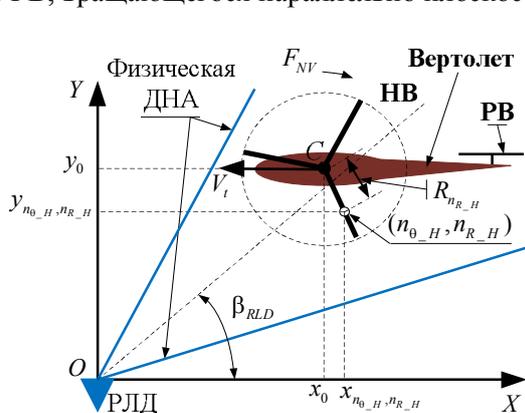


Рис. 1. Ориентация несущего винта вертолета в полете (вид сверху)

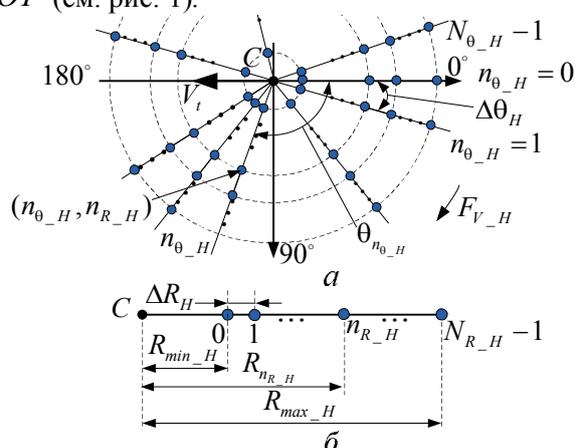


Рис. 2. Параметры каналов многоканальной системы обработки

Каналы ОСАА для ГВ с номерами  $n_{\theta\_H} = \overline{0, N_{\theta\_H} - 1}$  располагаются равномерно в пределах плоскости вращения винта по ходу вращения и связаны с  $N_{\theta\_H}$  радиальными линиями, привязанными к центру  $C$  и расставленными через интервал  $\Delta\theta_H$  (рис. 2, а). На каждой радиальной линии обозначим  $N_{R\_H}$  точек (рис. 2, б), расположенных через интервал  $\Delta R_H$  в пределах длины лопасти  $R_{V\_H}$  от  $R_{min\_H}$  до  $R_{max\_H}$ . Произвольную точку отражения в приложении к ОСАА обозначим как  $(n_{\theta\_H}, n_{R\_H})$ -ю точку, где  $n_{\theta\_H} = \overline{0, N_{\theta\_H} - 1}$  – номер углового канала ОСАА,  $n_{R\_H} = \overline{0, N_{R\_H} - 1}$  – номер точки на радиальной линии. Совокупность  $N_{\theta\_H}$  каналов образует многоканальную систему ОСАА, обеспечивающую формирование РЛИ ГВ с произвольным количеством лопастей  $N_{L\_H}$ .

Максимальная доплеровская частота сигнала, отраженного от винта зависшего вертолета, определяется в соответствии с длиной волны МХЗС  $\lambda$  [5, 6] выражением

$$F_{dopV\_max} = \frac{4\pi R_{V\_H} F_{V\_H}}{\lambda}. \quad (1)$$

Для получения РЛИ винта с удовлетворительным качеством необходимо выбрать время ОСАА в соответствии с требованием  $T_{osa} \geq T_{V\_max}$ , где  $T_{V\_max}$  – максимальный возможный период вращения винта ЛА данного класса.

В каждом  $n_{\theta\_H}$ -м канале ОСАА должна обеспечиваться компенсация доплеровских сдвигов фаз сигналов, отраженных от точечных отражателей  $(n_{\theta\_H}, n_{R\_H})$ ,  $n_{\theta\_H} = \overline{0, N_{\theta\_H} - 1}$ ,  $n_{R\_H} = \overline{0, N_{R\_H} - 1}$ , лежащих на поверхности плоскости вращения ГВ. В основе этого лежит знание законов изменения радиальной дальности до каждого отражателя относительно фазового центра физической антенны РЛД. Дальность до  $(n_{\theta\_H}, n_{R\_H})$ -го отражателя (см. рис. 1, 2) определяется через законы изменения координат  $x_{n_{\theta\_H}, n_{R\_H}}(t)$ ,  $y_{n_{\theta\_H}, n_{R\_H}}(t)$ ,  $z_{n_{\theta\_H}, n_{R\_H}}(t)$ :

$$r_{n_{\theta\_H}, n_{R\_H}}(t) = \sqrt{x_{n_{\theta\_H}, n_{R\_H}}^2(t) + y_{n_{\theta\_H}, n_{R\_H}}^2(t) + z_{n_{\theta\_H}, n_{R\_H}}^2(t)}. \quad (2)$$

При вращении винта по часовой стрелке (вид сверху, рис. 1) упомянутые координаты точки  $(n_{\theta\_H}, n_{R\_H})$  в канале ОСАА описываются выражениями:

$$\begin{aligned} x_{n_{\theta\_H}, n_{R\_H}}(t) &= x_0 + V_t t + R_{n_{R\_H}} \cos(2\pi F_{V\_H} t + \theta_{n_{\theta\_H}}), \\ y_{n_{\theta\_H}, n_{R\_H}}(t) &= y_0 - R_{n_{R\_H}} \sin(2\pi F_{V\_H} t + \theta_{n_{\theta\_H}}), \quad z_{n_{\theta\_H}, n_{R\_H}}(t) = z_0, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $R_{n_{R\_H}}$  – расстояние от центра вращения  $C$  до  $n_{R\_H}$ -й точки (рис. 2, б);  $\theta_{n_{\theta\_H}}$  – угловое расстояние между  $n_{\theta\_H}$ -м и нулевым каналами. Заметим, что скорость  $V_t$  является отрицательной при приближении ЛА к РЛД и положительной при удалении. При вращении винта против часовой стрелки (вид сверху) изменяется только выражение для  $y_{n_{\theta\_H}, n_{R\_H}}(t)$ :

$$y_{n_{\theta\_H}, n_{R\_H}}(t) = y_0 + R_{n_{R\_H}} \sin(2\pi F_{V\_H} t + \theta_{n_{\theta\_H}}).$$

С учетом выражений (2) и (3) алгоритм многоканального устройства ОСАА в дискретном времени для формирования РЛИ ГВ имеет вид

$$\xi_{n_{\theta\_H}} = \sum_{n_{R\_H}=0}^{N_{R\_H}-1} \sum_{j=0}^{N-1} U_{PL\_H}(jT_d) K_{n_{\theta\_H}, n_{R\_H}}(jT_d), \quad n_{\theta\_H} = \overline{0, N_{\theta\_H} - 1}, \quad (4)$$

где  $K_{n_{\theta\_H}, n_{R\_H}}(jT_d) = \exp(-i2k \cdot r_{n_{\theta\_H}, n_{R\_H}}(jT_d))$  –  $j$ -й отсчет опорной функции, комплексно-сопряженной с законом изменения фазы комплексной огибающей сигнала, отраженного от  $(n_{\theta\_H}, n_{R\_H})$ -го отражателя;  $U_{PL\_H}(jT_d)$  –  $j$ -й отсчет комплексной огибающей ОС для ГВ (ОС после компенсации сигнала, отраженного от корпуса ЛА);  $T_d$  – период дискретизации сигнала;  $N$  – количество отсчетов в интервале  $T_{osa}$ ;  $k = 2\pi / \lambda$  – волновое число.

В итоге в каждом  $n_{\theta\_H}$ -м канале ОСАА, который физически ведет обработку сигнала для предполагаемой лопасти ГВ, выполняются компенсация доплеровского сдвига фазы и когерентное накопление ОС вдоль радиальной линии по  $n_{R\_H}$ . Совокупность квадратов модулей комплексных амплитуд с выходов каналов  $|\xi_{n_{\theta\_H}}|^2$ ,  $n_{\theta\_H} = \overline{0, N_{\theta\_H} - 1}$  для предполагаемого направления вращения винта является радиолокационным изображением ГВ. Если направление вращения винта неизвестно, то ОСАА для построения РЛИ ГВ выполняется в двойном объеме – как для правостороннего, так и для левостороннего вращений.

### Алгоритм обращенного синтеза апертуры антенны для построения радиолокационного изображения винта, вращающегося в вертикальной плоскости

Построение РЛИ винтов в вертикальной плоскости с разной ориентацией (ТВ самолета или РВ вертолета) не имеет принципиальных отличий, поэтому рассмотрим здесь только алгоритм ОСАА для построения РЛИ ТВ самолета. В этом алгоритме учитывается вращение винта в вертикальной плоскости, рис. 3). Параметры каналов ОСАА (см. рис. 4) имеют обозначения:  $n_{\theta\_V} = \overline{0, N_{\theta\_V} - 1}$ ,  $\Delta\theta_V$  – номер углового канала ОСАА и интервал между

соседними каналами для вертикального винта (ВВ),  $n_{R\_V} = \overline{0, N_{R\_V} - 1}$ ,  $\Delta R_V$  – номер точки и интервал между соседними точками на радиальной линии,  $R_{min\_V}$ ,  $R_{max\_V}$  – параметры лопасти ВВ,  $F_{V\_V}$  – частота вращения ВВ.

По аналогии с (3) дальность до  $(n_{\theta\_V}, n_{R\_V})$ -го отражателя (см. рис. 4) определяется через координаты  $x_{n_{\theta\_V}, n_{R\_V}}(t)$ ,  $y_{n_{\theta\_V}, n_{R\_V}}(t)$ ,  $z_{n_{\theta\_V}, n_{R\_V}}(t)$  выражением

$$r_{n_{\theta\_V}, n_{R\_V}}(t) = \sqrt{z_{n_{\theta\_V}, n_{R\_V}}^2(t) + y_{n_{\theta\_V}, n_{R\_V}}^2(t) + x_{n_{\theta\_V}, n_{R\_V}}^2(t)}. \quad (5)$$

Законы изменения этих координат при вращении винта против часовой стрелки (вид спереди) имеют вид:

$$\begin{aligned} x_{n_{\theta\_V}, n_{R\_V}}(t) &= x_0 + V_t t, & y_{n_{\theta\_V}, n_{R\_V}}(t) &= y_0 + R_{n_{R\_V}} \cdot \cos(2\pi F_{V\_V} t + \theta_{n_{\theta\_V}}), \\ z_{n_{\theta\_V}, n_{R\_V}}(t) &= z_0 + R_{n_{R\_V}} \cdot \sin(2\pi F_{V\_V} t + \theta_{n_{\theta\_V}}), \end{aligned} \quad (6)$$

где  $R_{n_{R\_V}}$  – расстояние от центра вращения  $C$  до  $n_{R\_V}$ -й точки (рис. 4, б);  $\theta_{n_{\theta\_V}}$  – угловое расстояние между  $n_{\theta\_V}$ -м и нулевым каналами. При вращении винта по часовой стрелке (вид спереди) выражение для  $z_{n_{\theta\_V}, n_{R\_V}}(t)$  имеет вид

$$z_{n_{\theta\_V}, n_{R\_V}}(t) = z_0 - R_{n_{R\_V}} \cdot \sin(2\pi F_{V\_V} t + \theta_{n_{\theta\_V}}).$$

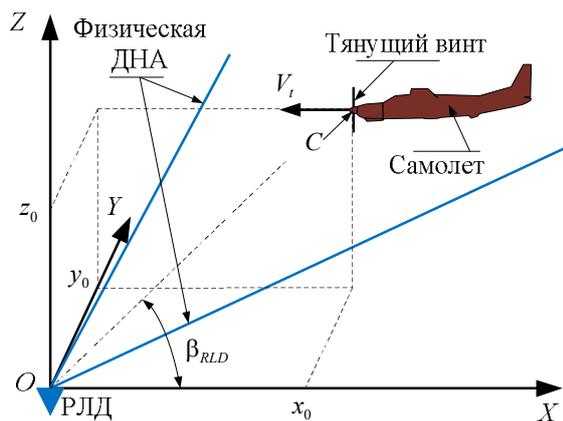


Рис. 3. Ориентация винта самолета

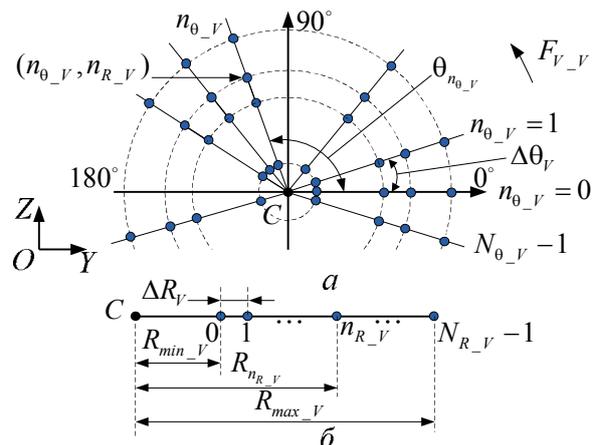


Рис. 4. Параметры каналов ОСАА (вид спереди)

По аналогии с (4), с учетом (5) и (6) алгоритм ОСАА для формирования РЛИ ВВ в дискретном времени имеет вид

$$\xi_{n_{\theta\_V}} = \sum_{n_{R\_V}=0}^{N_{R\_V}-1} \sum_{j=0}^{N-1} U_{PL\_V}(jT_d) K_{n_{\theta\_V}, n_{R\_V}}(jT_d), \quad n_{\theta\_V} = \overline{0, N_{\theta\_V} - 1}, \quad (7)$$

где  $K_{n_{\theta\_V}, n_{R\_V}}(jT_d) = \exp(-i2kr_{n_{\theta\_V}, n_{R\_V}}(jT_d))$  –  $j$ -й отсчет опорной функции;  $U_{PL\_V}(jT_d)$  –  $j$ -й отсчет комплексной огибающей ОС для ВВ.

### Условия и результаты моделирования

Рассмотрим результаты проверки качества функционирования разработанных алгоритмов для формирования РЛИ ТВ самолета Ан-2, а также НВ и РВ вертолета Ми-2 путем моделирования. Для моделирования сигналов, отраженных от винтов, использованы модели, описанные в [7]. Условия моделирования:

– вертолет (самолет) движется на приближение к РЛД на высоте 50 м со скоростью 7 м/с, начальная дальность 300 м, угол установки антенны РЛД по азимуту  $\beta_{RLD} = 45^\circ$ , длина волны МХЗС  $\lambda = 0,0125$  м, период дискретизации  $T_d = 10,416$  мкс ;

– параметры НВ: частота вращения  $F_{NV} = 4,119$  Гц, количество лопастей  $N_{L_{NV}} = 3$ , параметры лопасти  $R_{max_{NV}} = 7,25$  м,  $R_{min_{NV}} = 0,9$  м, ширина  $H_{L_{NV}} = 0,3$  м, координаты центра вращения НВ в начальном моменте синтеза  $C_{NV}$  ( $x_{NV_0} = 206,8$  м;  $y_{NV_0} = 209,2$  м;  $z_{NV_0} = 52,8$  м);

– параметры РВ: частота вращения  $F_{RV} = 24,097$  Гц, количество лопастей  $N_{L_{RV}} = 2$ , параметры лопасти  $R_{max_{RV}} = 1,35$  м,  $R_{min_{RV}} = 0,2$  м, ширина  $H_{L_{RV}} = 0,15$  м, координаты центра вращения РВ в начальном моменте синтеза  $C_{RV}$  ( $x_{RV_0} = x_{NV_0} + 8,7$  м;  $y_{RV_0} = y_{NV_0} + 0,1$  м;  $z_{RV_0} = z_{NV_0} - 1,1$  м);

– параметры ТВ: частота вращения  $F_{TV} = 16,404$  Гц, количество лопастей  $N_{L_{TV}} = 4$ , параметры лопасти  $R_{max_{TV}} = 1,8$  м,  $R_{min_{TV}} = 0,1$  м, ширина  $H_{TV} = 0,3$  м, координаты центра вращения ТВ в начальном моменте синтеза  $C_{TV}$  ( $x_{TV_0} = 202,8$  м;  $y_{TV_0} = 209,2$  м;  $z_{TV_0} = 50$  м), плоскость вращения ТВ параллельна плоскости  $OYZ$ ;

– лопасти винтов аппроксимируются двумя вариантами: вариант (а) – лопасть представляется совокупностью изотропных отражателей, лежащих на прямой линии, длина которой соответствует длине лопасти; вариант (б) – лопасть представляется совокупностью отражателей, лежащих на прямых линиях передней и задней кромок лопасти (отражает только одна кромка, которая обращена к РЛД);

– количество отражателей на передней и задней кромках было одинаковым, а эффективные отражающие поверхности (ЭОП) отражателей на передней  $\sigma_{pk}$  и задней  $\sigma_{zk}$  кромках имели соотношение вида  $\sigma_{zk} = 0,8\sigma_{pk}$ .

Параметры каналов ОСАА для построения РЛИ винтов ЛА:

– общие параметры:  $\Delta\theta_H = \Delta\theta_V = 1^\circ$  (360 каналов ОСАА),  $\Delta R_H = \Delta R_V = \lambda / 4$ ;

– время синтеза для НВ и РВ вертолета 0,4 с, а для ТВ самолета 0,061 с.

Результаты построения РЛИ винтов приведены на рис. 5–7. Так как мощность ОС для НВ на порядок больше мощности ОС для РВ, то при построении РЛИ винтов вертолета вначале формировалось РЛИ НВ, а затем проводилось построение РЛИ РВ с предварительной компенсацией ОС для НВ [8, 9].

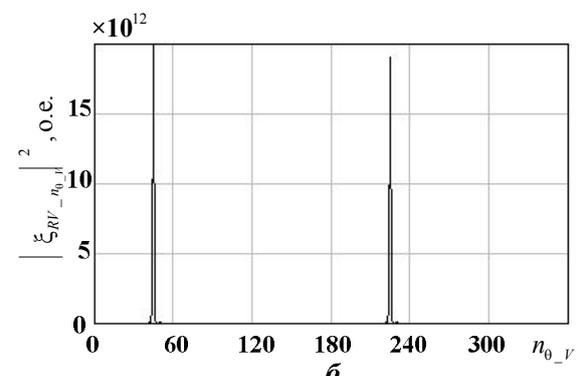
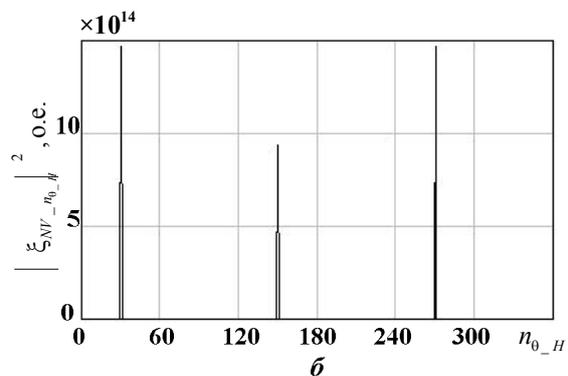
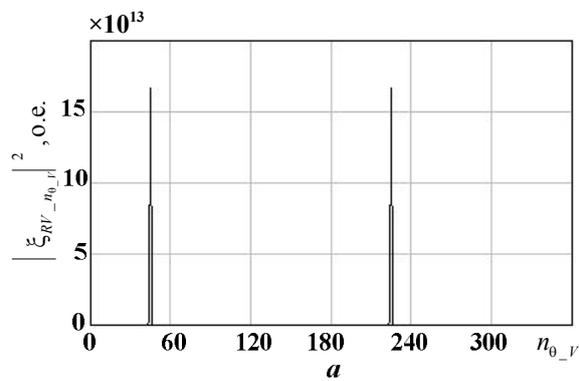
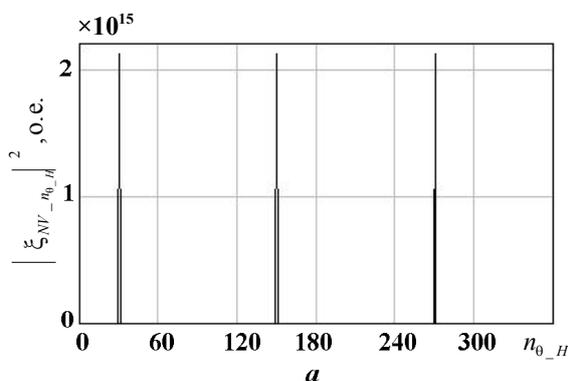


Рис. 5. РЛИ несущего винта Ми-2

Рис. 6. РЛИ рулевого винта Ми-2

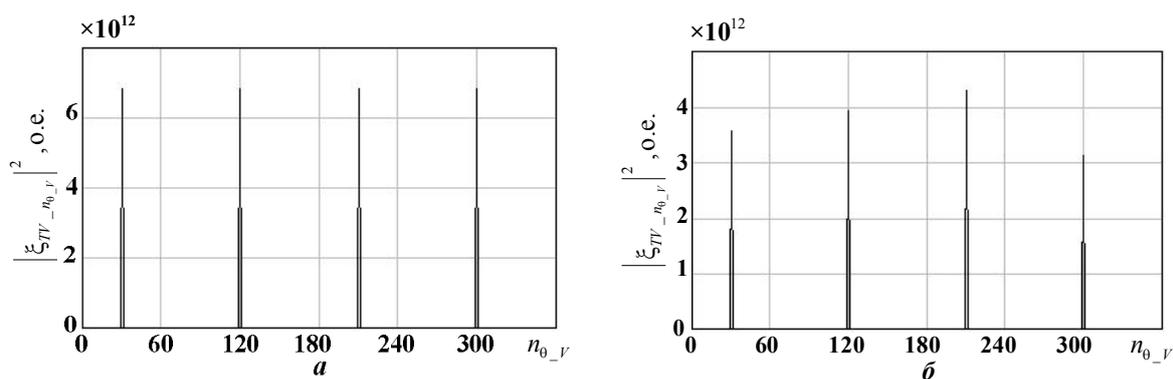


Рис. 7. РЛИ тянущего винта Ан-2

Анализ результатов моделирования показывает, что в РЛИ винтов имеются четко выраженные пики, соответствующие угловым положениям лопастей винтов в соответствующих плоскостях вращения с уровнями, определяемыми отражательными характеристиками лопастей. Уровни пиков на РЛИ винтов при представлении лопастей двумя линиями отражателей (кромками) меньше, чем при представлении одной линией из-за различий в ЭОП отражателей передней и задней кромок. Различия в уровнях пиков при одинаковых отражательных характеристиках лопастей возникают из-за различий в ориентации лопастей (и, соответственно, в их отражательных характеристиках) на момент начала ОСАА при ограниченном времени синтеза.

### Заключение

По полученным РЛИ винтов можно определить количество, ориентацию винтов в пространстве, число лопастей и направления вращения каждого винта и, следовательно, класс наблюдаемого ЛА. Разработанные алгоритмы ОСАА в РЛД с МХЗС позволяют формировать РЛИ винтов ЛА, ориентированных в горизонтальной и вертикальной плоскостях, и обеспечить повышение качества распознавания благодаря выделению дополнительной информации о двигательной установке ЛА.

Предварительная проверка, проведенная путем математического моделирования, подтвердила работоспособность разработанных алгоритмов при двух наиболее близких к практике аппроксимациях лопастей. Для снижения вычислительных затрат на формирование РЛИ винтов целесообразно выполнять адаптацию к априорно неизвестным параметрам движения ЛА и параметрам винтов (двигательных установок) ЛА.

Структура РЛИ винтов является такой же дискретной, как и структура спектра «вторичной модуляции» [10] отраженных от ЛА сигналов, но имеет принципиальное отличие – РЛИ винта однозначно показывает количество лопастей для соответствующего винта.

### Список литературы

1. Марков Л.Н. Антенные системы радиоэлектронной техники. М.: Воениздат, 1993. 368 с.
2. Гейстер С.Р., Виноградов А.Е., Жарылгапов Е.К. Радиолокационные датчики с обращенным синтезом апертуры антенны и варианты их применения для обнаружения и классификации движущихся наземных (надводных) объектов // Наука и воен. безопасность. 2009. № 4(24). С. 11–16.
3. Гейстер С.Р., Нгуен Т.Т. Облик радиолокационного датчика обнаружения и распознавания низколетящих целей, использующего обращенный синтез апертуры антенны // Наука и воен. безопасность. 2017. № 1 (51). С. 22–27.
4. Нгуен Т.Т. Метод определения частоты вращения винта при разработке алгоритма построения изображения винта // Матер. 53-й конф. аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, секция «Информационные радиотехнологии», Минск, 2–6 мая 2017. С. 62.
5. Rotander С.Е., Von Sydow Н. Classification of helicopters by the L/N-quotient // Proc. of the Radar 97 (Conference Publication 449). Oct. 1997. P. 629–633.
6. Sang-Ho Y., Byungwook K., Young-Soo K. Helicopter classification using time-frequency analysis // Electronics Letters. 2000. Vol. 36, № 22. P. 1871–1872.

7. Гейстер С.Р., Нгуен Т.Т. Математические модели радиолокационного сигнала, отраженного от винта вертолета, в приложении к обращенному синтезу апертуры // Наука и воен. безопасность. 2018. № 3 (57). С. 30–38.
8. Гейстер А.С. Способ адаптивной когерентной компенсации сигнала, отраженного от корпуса автомобиля при обращенном синтезе апертуры антенны // Докл. БГУИР. 2013. № 4 (74). С. 56–60.
9. Гейстер А.С. Исследование способа адаптивной когерентной компенсации сигнала, отраженного от корпуса автомобиля при построении радиолокационного портрета колеса // Докл. БГУИР. 2013. № 8 (78). С. 71–75.
10. Гейстер С.Р., Курлович В.И., Шаляпин С.В. Экспериментальные исследования спектральных портретов винтовых и турбореактивных самолетов в радиолокаторе обзора с непрерывным зондирующим сигналом // Радиолокация и радиометрия. 2000. Вып. 3. С. 90–96.

### References

1. Markov L.N. Antennye sistemy radioelektronnoj tehniki. M.: Voenizdat, 1993. 368 s. (in Russ.)
2. Gejster S.R., Vinogradov A.E., Zharylgapov E.K. Radiolokacionnye datchiki s obrashhennym sintezom apertury anteny i varyanty ih primeneniya dlja obnaruzheniya i klassifikacii dvizhushhihsja nazemnyh (nadvodnyh) ob'ektov // Nauka i voen. bezopasnost'. 2009. № 4(24). S. 11–16. (in Russ.)
3. Gejster S.R., Nguen T.T. Oblik radiolokacionnogo datchika obnaruzheniya i raspoznavaniya nizkoletjashhih celej, ispol'zujushhego obrashhennyj sintez apertury anteny // Nauka i voen. bezopasnost'. 2017. № 1 (51). S. 22–27. (in Russ.)
4. Nguen T.T. Metod opredeleniya chastoty vrashheniya vinta pri razrabotke algoritma postroeniya izobrazheniya vinta // Mater. 53-j konf. aspirantov, magistrantov i studentov BGUIR, sekcija «Informacionnye radiotehnologii», Minsk, 2–6 maja 2017. S. 62. (in Russ.)
5. Rotander C.E., Von Sydow H. Classification of helicopters by the L/N-quotient // Proc. of the Radar 97 (Conference Publication 449). Oct. 1997. P. 629–633.
6. Sang-Ho Y., Byungwook K., Young-Soo K. Helicopter classification using time-frequency analysis // Electronics Letters. 2000. Vol. 36, № 22. P. 1871–1872.
7. Gejster S.R., Nguen T.T. Matematicheskie modeli radiolokacionnogo signala, otrazhennogo ot vinta vertolet, v prilozhenii k obrashhennomu sintezu apertury // Nauka i voen. bezopasnost'. 2018. № 3 (57). S. 30–38. (in Russ.)
8. Gejster A.S. Sposob adaptivnoj kogerentnoj kompensacii signala, otrazhennogo ot korpusa avtomobilja pri obrashhennom sinteze apertury anteny // Dokl. BGUIR. 2013. № 4 (74). S. 56–60. (in Russ.)
9. Gejster A.S. Issledovanie sposoba adaptivnoj kogerentnoj kompensacii signala, otrazhennogo ot korpusa avtomobilja pri postroenii radiolokacionnogo portreta kolesa // Dokl. BGUIR. 2013. № 8 (78). S. 71–75. (in Russ.)
10. Gejster S.R., Kurlovich V.I., Shaljapin S.V. Jeksperimental'nye issledovaniya spektral'nyh portretov vintovyh i turboreaktivnyh samoletov v radiolokatore obzora s nepreryvnyim zondirujushhim signalom // Radiolokacija i radiometrija. 2000. Vyp. 3. S. 90–96. (in Russ.)

### 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 Belarusian Armed Forces.

Nguyen T.T., graduate 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: thairti@gmail.com  
Нгуен Тьен Тхай

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovka st., 6,  
Belarusian state university  
of informatics and radioelectronics  
e-mail: thairti@gmail.com  
Nguyen Tien Thai