

УДК 621.396.96

## ДВУХТОЧЕЧНАЯ МОДЕЛЬ ВРАЩАЮЩИХСЯ ЛОПАСТЕЙ

**С.В. Житник, М.А. Степанов**

*Новосибирский государственный технический университет*

В данной работе рассмотрены угловые шумы вращающихся лопастей радиолокационного объекта. Рассмотрена многоточечная геометрическая модель вращающихся лопастей одного винта. На ее основе получены аналитические выражения, позволяющие рассчитать угловые координаты кажущегося центра излучения винта с вращающимися лопастями. Также на основе многоточечной геометрической модели получены соотношения, позволяющие синтезировать двухточечную геометрическую модель вращающихся лопастей винта. Теоретические результаты подтверждены математическим моделированием для двух конфигураций одновинтового малогабаритного летательного объекта: с одной вращающейся лопастью и с двумя вращающимися лопастями.

*Ключевые слова:* угловой шум, многоточечная модель, двухточечная модель, лопасть, эхосигнал, кажущийся центр излучения.

DOI: 10.17212/1727-2769-2022-3-31-41

### 1. Введение

На сегодняшний день радиолокационные станции (РЛС) являются комплексными системами для определения дальности до объекта, углового положения объекта, скорости сближения, размера и формы объекта.

Для разработки таких станций широко используется моделирование. Достоверность моделирования определяется проработанностью математических моделей радиолокационных объектов [1]. Следовательно, задача разработки новых моделей и уточнения и применения существующих моделей радиолокационных объектов является актуальной.

Одним из радиолокационных объектов, моделирование отражений от которого представляет интерес, является летательный аппарат с вращающимися лопастями, например, вертолет, квадрокоптер и т. д. Известно, что отраженный сигнал от таких объектов является нестационарным из-за вращающихся деталей – лопастей и втулки винта. В настоящее время в литературе достаточно подробно рассмотрено моделирование эхосигнала от таких объектов. Формируемые эхосигналы обладают формой доплеровского спектра и временной структурой, соответствующими отражениям от реального радиолокационного объекта. Вместе с тем помимо определенной спектральной и временной структуры эхосигнала реальным радиолокационным объектам присуще такое явление, как угловой шум – флуктуации фазового фронта отраженной электромагнитной волны, вызванные многоточечной структурой радиолокационного объекта [2–4]. Угловой шум является важной характеристикой, позволяющей определить угловое положение и угловые размеры отражающего объекта [5].

Моделирование распределенной геометрической структуры радиолокационных объектов производится с использованием геометрических моделей. При этом объект замещается совокупностью излучающих точек, распределенных в пространстве. Каждая из точек излучает сигнал, соответствующий отражениям от замещаемого фрагмента объекта. Для обеспечения высокой достоверности количество точек геометрической модели должно быть велико. Известно, что для

формирования отражений от вертолета необходимо использовать десятки точек для фюзеляжа, сотни для втулки и каждой из лопастей [6].

Большое количество точек серьезно ограничивает применение многоточечных моделей при имитации в реальном масштабе времени. Для решения подобных проблем формируют малоточечную модель радиолокационного объекта. Например, в [7] показано, что для адекватного замещения отражений от радиолокационных объектов, распределенных по двум угловым координатам, достаточно четырех точек модели, размещенных в вершинах прямоугольника, а для объектов, распределенных по одной угловой координате, – двух точек. Однако до настоящего момента рассмотрено замещение отражений с помощью таких моделей от радиолокационных объектов, не содержащих в своем составе подвижных частей. В частности, моделирование отражений малоточечными моделями от лопастей винта летательного аппарата не рассмотрено.

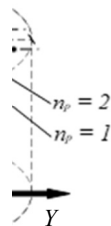
Традиционным подходом к анализу отражений от сложных радиолокационных объектов является декомпозиция этого объекта на составные части, отдельный анализ отражений для каждой из этих частей и последующее обобщение полученных результатов [8, 9]. Для летательных аппаратов с винтами возможна декомпозиция на фюзеляж, втулку винта и лопасти винта. В настоящей работе рассматриваются отражения от лопастей винта.

Таким образом, цель настоящей работы получить выражения, определяющие сигналы, подводимые к излучателям двухточечной геометрической модели, адекватно формирующей отражения от лопастей вращающегося винта.

Для достижения поставленной цели последовательно решены следующие задачи: синтезирована многоточечная геометрическая модель лопастей вращающегося винта, определено угловое положение кажущегося центра излучения для многоточечной модели, осуществлен переход от многоточечной геометрической модели к двухточечной, произведено сравнение углового положения кажущегося центра излучения, сформированного многоточечной и двухточечной моделями.

## 2. Многоточечная модель лопастей

Для описания координат точек модели введем локальную цилиндрическую систему координат. Ось  $OZ$  системы координат совпадает с осью вращения, начало системы координат лежит в точке пересечения оси вращения и плоскости расположения лопастей (рис. 1). Полярный угол  $\theta$  цилиндрической системы координат отсчитывается от полярной оси. Положительные направления отсчета полярного угла соответствуют движению точки по часовой стрелке при вращении вдоль оси  $OZ$ .



динат, ис-  
лопастей  
ystem used  
s

При моделировании рассматривают геометрию лопастей летательного аппарата в виде совокупности отражателей, расположенных в одной плоскости [10]. Винт представляется как система из  $N_L$  лопастей с угловым интервалом  $\Delta\theta_L = 2 \cdot \pi / N_L$ , вращающихся с частотой  $F$  по часовой стрелке в плоскости  $z = 0$ . Лопасти нумеруются по часовой стрелке:  $n = 1 \dots N_L$ , начиная с лопасти, имеющей минимальный положительный угол относительно

полярной оси системы координат в начальный момент времени (обозначим этот угол как  $\theta_1(0)$ ).

Угловое положение  $n$ -й лопасти  $\theta_n(t)$  в произвольный момент времени можно определить по выражению

$$\theta_n(t) = \theta_1(0) + 2\pi Ft + (n-1)\Delta\theta.$$

Отражатели располагаются на передней и задней кромках лопасти (рис. 2). Так как нормаль к передней и задней кромкам лопасти образует разные углы с направлением визирования, кромки лопасти имеют различный коэффициент отражения. На каждой из кромок отражатели расположены эквидистантно с шагом  $\Delta R$  в диапазоне от  $R_{\text{Hub}}$  (радиус втулки) до  $R_{\text{Blade}}$  (радиус лопасти). В [10] рекомендуют выбирать шаг расположения отражателей не более чем  $\lambda/4$ , где  $\lambda$  – длина волны зондирующего сигнала РЛС. Количество точек, требуемых для моделирования каждой из кромок одной лопасти, определяется выражением

$$N_p = \text{Round}\left(\frac{(R_{\text{Blade}} - R_{\text{Hub}})}{\Delta R}\right),$$

где  $\text{Round}(\ )$  – функция округления дробного числа до ближайшего целого значения.

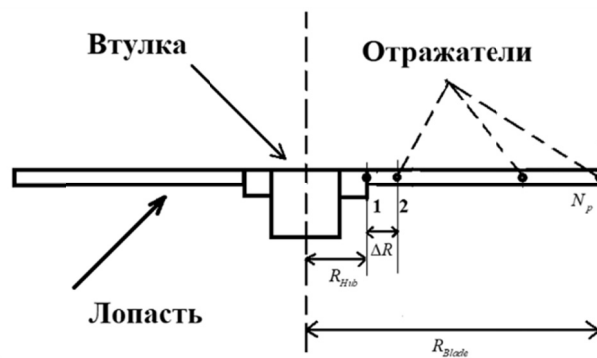


Рис. 2 – Расположение отражающих точек на лопасти

Fig. 2 – Location of reflective points on the blade

Так как ширина лопасти значительно меньше ее длины, положим, что угловое положение наступающей и отступающей лопастей совпадает.

Эхосигнал от каждой из точек имеет доплеровский сдвиг, определяемый проекцией на направление визирования вектора скорости сближения точки и РЛС.

Для учета местоположения точки наблюдения введем декартову систему координат ( $OXYZ$ ) (рис. 3), начало которой совпадает с фазовым центром приемной антенны, ось  $OY$  направлена вверх,  $OX$  – на север, а  $OZ$  дополняет систему до правой.

Если принять, что центр вращения имеет координаты  $(x_{C0}, y_{C0}, z_{C0})$  и перемещается со скоростью  $\vec{v} = (v_x, v_y, v_z)$ , то дальность от РЛС до  $i$ -го отражателя на  $k$ -й кромке лопасти определяется выражением:

$$r_{i,k}(t) = \sqrt{z_{i,k}^2(t) + y_{i,k}^2(t) + x_{i,k}^2(t)},$$

где

$$x_{i,k}(t) = x_{C0} + v_x t + R_i \cos(\theta_k(t));$$

$$y_{i,k}(t) = y_{C0} + v_y t - R_i \sin(\theta_k(t)); \quad z_{i,k}(t) = z_{C0} + v_z t.$$

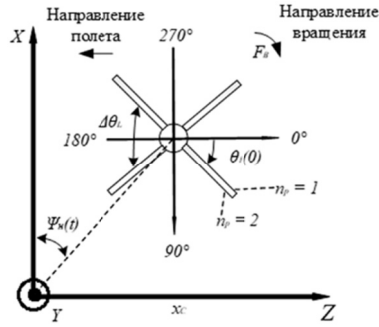


Рис. 3 – Положение объекта в декартовой системе координат

Fig. 3 – The position of the object in the Cartesian coordinate system

В точке наблюдения происходит интерференция электромагнитных волн, отраженных от всех точек лопастей. Тогда комплексная огибающая эхосигнала определяется выражением

$$\dot{u}(t) = \sum_{i=1}^{N_P} \sum_{k=1}^{2N_L} E_{i,k}(t) \exp(j\phi_{i,k}(t)),$$

где  $E_{i,k}(t)$  и  $\phi_{i,k}(t)$  – соответственно амплитуда и фаза в точке наблюдения сигнала, отраженного от  $i$ -й точки  $k$ -й кромки лопасти. Напомним, что каждая лопасть имеет две кромки (наступающую и отступающую), различающиеся величиной коэффициента отражения. Наступающей кромке соответствуют нечетные значения  $k$ , отступающей – четные.

$$E_{i,k}(t) = \begin{cases} \begin{cases} 0, & \text{при } \theta_k(t) \in [0; \pi]; \\ \sqrt{\sigma_2}, & \text{при } \theta_k(t) \in [-\pi; 0], \end{cases} & \text{для четных } k, \\ \begin{cases} \sqrt{\sigma_1}, & \text{при } \theta_k(t) \in [0; \pi]; \\ 0, & \text{при } \theta_k(t) \in [-\pi; 0], \end{cases} & \text{для нечетных } k, \end{cases}$$

где  $\sigma_1, \sigma_2$  – эффективная поверхность рассеяния наступающей и отступающей кромок лопасти соответственно;  $\theta(t)$  – угол визирования  $k$ -й кромки в момент времени  $t$  (см. рис. 2).

Фаза  $\phi_{i,k}(t)$  определяется выражением  $\phi_{i,k}(t) = 2\beta r_{i,k}(t)$ , где  $\beta = 2\pi/\lambda$  – коэффициент фазы.

### 3. Соотношения для расчета положения кажущегося центра излучения

Для многоточечных распределенных объектов с заданной геометрией и определенным положением отражающих точек угловое положение кажущегося центра излучения определяется выражением [11]

$$\alpha(t) = \frac{u_h(t)u_b(t) + v_h(t)v_b(t)}{u_h^2(t) + v_h^2(t)}, \quad (1)$$

где

$$u_h(t) = \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{k=1}^{2N_L} E_{i,k}(t) \cos(\varphi_{i,k}(t)),$$

$$v_h(t) = \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{k=1}^{2N_L} E_{i,k}(t) \sin(\varphi_{i,k}(t)),$$

$$u_b(t) = \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{k=1}^{2N_L} \xi_{i,k}(t) u_h(t),$$

$$v_b(t) = \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{k=1}^{2N_L} \xi_{i,k}(t) v_h(t),$$

$\xi_{i,k}(t)$  – обобщенная координата  $i$ -й точки  $k$ -й кромки лопасти.

Зависимость обобщенной координаты отражающих точек от времени для  $k$ -й кромки лопасти рассчитывается следующим образом [7]:

$$\xi_{i,k}(t) = r_{i,k}(t) \cos(\theta_{\text{Int}(k/2)}(t)),$$

где  $\text{Int}(\ )$  – операция взятия целой части дробного числа.

#### 4. Двухточечная модель вращающихся лопастей беспилотника

Перейдем к двухточечной геометрической модели лопастей винта. Она представляет собой две неподвижные, не разрешаемые в пространстве излучающие точки (рис. 4). Сигналы, подводимые к точкам модели, жестко связаны между собой, их параметры (отношение амплитуд и разность фаз) определяет положение точки, из которой, как кажется, исходит излучение – кажущегося центра излучения.

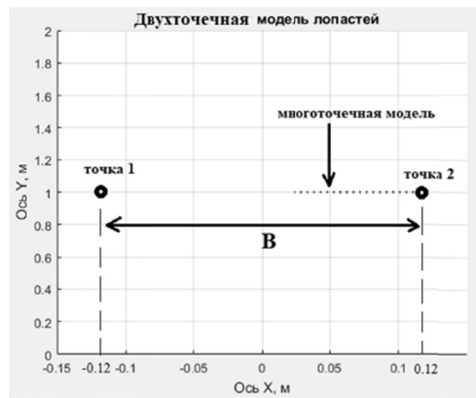


Рис. 4 – Многоточечная и двухточечная модель лопасти

Fig. 4 – Multi-point and two-point model of the blade

При переходе к двухточечной модели лопастей винта каждая из точек многоточечной модели замещается кажущимся центром излучения (рис. 4). Его местоположение соответствует угловой координате замещаемой точки и определяется соотношением

$$L = \frac{B}{2} \frac{E_{m1}^2 - E_{m2}^2}{E_{m2}^2 + 2E_{m1}E_{m2} \cos(\psi) + E_{m1}^2}, \quad (2)$$

где  $B$  – база двухточечной модели (расстояние между точками);  $E_{m1}$ ,  $E_{m2}$  – амплитуды сигналов, излучаемых из точек 1 и 2;  $\psi$  – разность фаз сигналов, излучаемых из точек модели.

В [1] показано, что наибольшую точность обеспечивают модели, излучающие синфазные сигналы ( $\psi = 0$ ).

Каждая кромка винта состоит из множества отражающих точек. Для каждой из них необходимо сформировать кажущийся центр излучения. Таким образом, сигнал, подводимый к точкам двухточечной геометрической модели, будет представлять собой суперпозицию сигналов, определяющих положение каждой из точек многоточечной модели:

$$\begin{cases} \dot{s}_1(t) = \sum_{i=1}^{N_P} \sum_{k=1}^{2N_L} E_{m1i,k} E_{i,k}(t) \exp(j\varphi_{i,k}(t)); \\ \dot{s}_2(t) = \sum_{i=1}^{N_P} \sum_{k=1}^{2N_L} E_{m2i,k} E_{i,k}(t) \exp(j\varphi_{i,k}(t)), \end{cases} \quad (3)$$

где  $E_{m1i,k}$ ,  $E_{m2i,k}$  – амплитуды сигналов двухточечной модели, замещающей  $i$ -ю точку  $k$ -й кромки и рассчитываемые по (2).

В точке наблюдения сигнал представляет собой сумму сигналов, излученных из первой и второй точки:

$$\dot{s}(t) = \dot{s}_1(t) + \dot{s}_2(t).$$

## 5. Апробация полученных соотношений

Для апробации полученных соотношений рассмотрена модель вращающегося винта беспилотного летательного аппарата DJI Phantom 3. Длина лопастей 0,12 м, частота вращения 200 Гц, лопасти расположены эквидистантно по углу с шагом  $\frac{2\pi}{N_L}$ . Рассмотрено две конфигурации указанного беспилотного лета-

тельного аппарата: с одной вращающейся лопастью и двумя вращающимися лопастями. Для обоих случаев моделирования полагалось, что координаты центра вращения в ДСК  $(x, y, z) = (0, 0, 1)$ , а точка наблюдения находится в начале системы координат. Длина волны зондирующего сигнала равна 3,3 см, таким образом, для многоточечной модели одной кромки лопасти потребуется 12 точек.

Для лопастей винта составлена многоточечная геометрическая модель и проведен синтез двухточечной геометрической модели по (3). База (расстояние между излучателями) двухточечной модели составляет 0,24 м и ориентирована по нормали к направлению визирования объекта.

Произведена моноимпульсная пеленгация совокупности отраженных сигналов в плоскости азимута с использованием пеленгационного соотношения [7]:

$$\theta(t) = \operatorname{Re} \frac{\sum_{i=1}^{N_p} F_{\Delta i}(\xi_i) \dot{s}_i(t)}{\sum_{i=1}^{N_p} F_{\Sigma i}(\xi_i) \dot{s}_i(t)},$$

где  $\dot{s}_i(t)$  – комплексная огибающая сигнала, отраженного от  $i$ -й точки;  $F_{\Delta}$  – разностная диаграмма направленности;  $F_{\Sigma}$  – суммарная диаграмма направленности;  $\xi_i$  – обобщенная координата  $i$ -й точки. Суммарная диаграмма направленности полагается изотропной, а разностная – наклонная линия с углом наклона в  $45^\circ$ .

Кроме того, для многоточечной геометрической модели осуществлен теоретический расчет положения кажущегося центра излучения по (1).

По полученным зависимостям пеленга строилась гистограмма. Гистограммы усреднялись по 100 реализациям, отличающимся друг от друга значением начальной случайной фазы сигналов, излучаемых точками геометрических моделей. Для каждой реализации значение начальной фазы для всех точек модели полагалась одинаковым и являлось равномерно распределенной в интервале  $[0; 2\pi]$  случайной величиной.

Модули временной и спектральной реализаций суммарного экосигнала, сформированного многоточечной и двухточечной геометрическими моделями, для случая одной лопасти представлены на рис. 5. Видно, что реализации совпадают и качественно соответствуют реализациям, приведенным в [10, 12, 13].

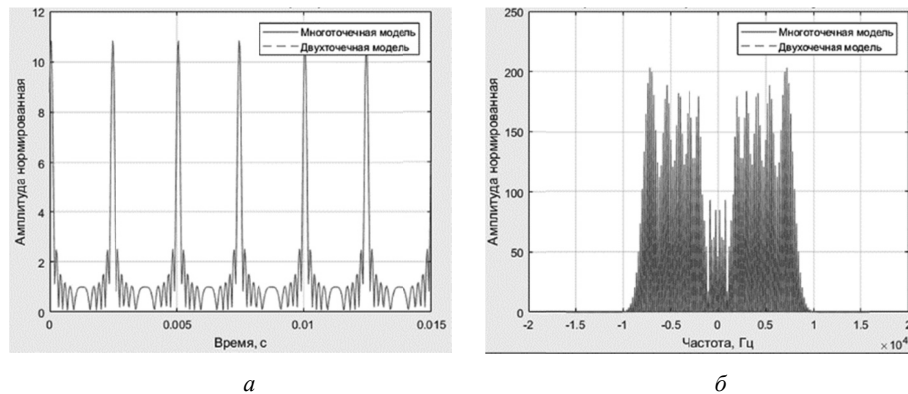


Рис. 5 – Временная (а) и спектральная (б) реализации сигнала в точке наблюдения для многоточечной и двухточечной моделей

Fig. 5 – Temporal (a) and spectral (b) realizations of the signal at the observation point for multipoint and two-point models

Пример временной реализации углового положения КЦИ и его плотность распределения вероятности представлены на рис. 6 для одной лопасти и на рис. 7 для двух лопастей.

Из рис. 6 и 7 видно, что временные реализации углового положения КЦИ, полученные для многоточечной и двухточечной моделей, а также расчетом по вы-

ражению (1) совпадают с высокой точностью. Среднеквадратическое отклонение теоретически рассчитанной временной реализации от реализации для многоточечной модели составило 0,1931, реализации для двухточечной модели от многоточечной составило 0,1930. Во всех случаях временная реализация представляет собой периодический процесс с периодом 5 мс, определяемым частотой вращения лопастей винта. На временной реализации можно выделить медленно меняющуюся составляющую и резкие, так называемые игольчатые выбросы.

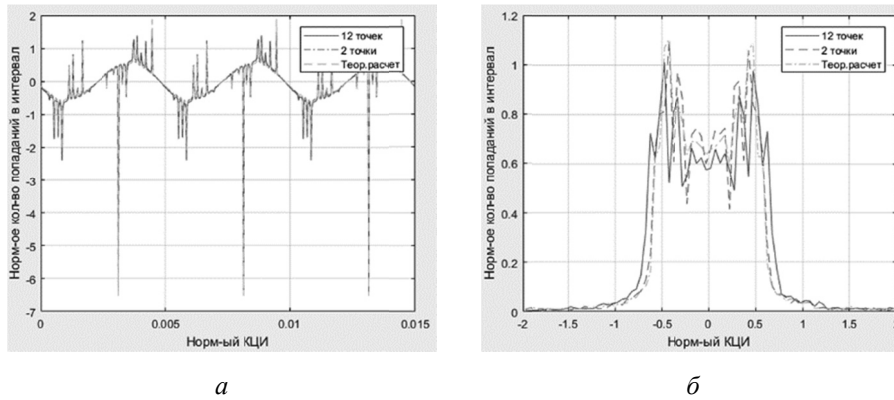


Рис. 6 – Временная реализация углового положения КЦИ для одной лопасти (а) и ее ПРВ (б)

Fig. 6 – Temporary implementation of the angular position of the ARC for 1 blade (a) and its PDV (б)

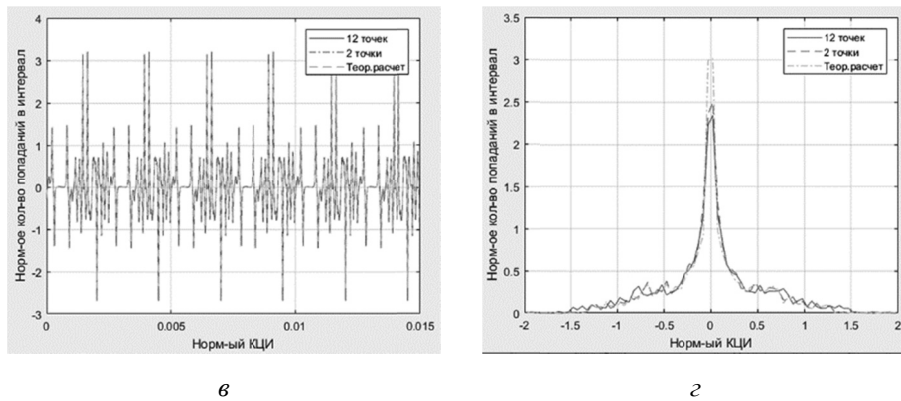


Рис. 7 – Временная реализация углового положения КЦИ для двух лопастей (а) и ее ПРВ (б)

Fig. 7 – Temporary implementation of the angular position of the ARC for 2 blades (a) and its PDV (б)

Медленно меняющаяся компонента, фактически, определяется наблюдаемым угловым размером лопасти. Положение центра излучения при этом соответствует центру наблюдаемого углового размера лопасти с учетом его углового положения. Это хорошо видно на рис. 6, а, где приведена временная реализация пеленга для винта с одной лопастью. За счет вращения угловой размер изменяется, что влечет за собой перемещение КЦИ. На рис. 7, где приведена временная реализа-



ция углового положения КЦИ для двухлопастного винта, видно, что медленно меняющаяся компонента всегда равна нулю. Это объясняется тем, что при любом угловом размере вращающихся лопастей угловое положение их центра остается неизменно равным нулю.

Игольчатые выбросы соответствуют случаю, когда сигналы, излученные из точек модели, приходят в точку наблюдения с разностью фаз, близкой к  $180^\circ$ . Это явление легко наблюдать для двухточечной геометрической модели. Как видно из (2) для случая двухточечной модели, при такой фазировке сигналов наблюдается стремительное перемещение КЦИ даже в случае, когда амплитуды сигналов близки [14]. Аналогичное явление наблюдается и для многоточечной геометрической модели. Изменение фазы сигнала от каждой из точек происходит в силу вращения лопасти. Важно отметить, что различия во временных реализациях, полученных с использованием разных моделей вращающихся лопастей, наиболее сильно проявляются непосредственно в окрестности игольчатых выбросов. Объясняется это очень высокой чувствительностью положения КЦИ к параметрам противофазных сигналов, излучаемых точками модели [14].

## 6. Заключение

Показано, что в плоскости азимута флуктуации кажущегося центра отражения от вращающихся лопастей представляют собой нестационарный случайный процесс. Получены аналитические выражения, определяющие сигналы, подводимые к излучателям двухточечной геометрической модели, адекватно формирующей отражения от вращающегося винта, содержащего произвольное количество лопастей. Теоретические результаты подтверждены математическим моделированием. Для этого составлены многоточечная и двухточечная геометрические модели вращающихся лопастей реального БПЛА DJI Phantom 3. Моделирование показало совпадение временной реализации углового положения КЦИ, формируемого обеими моделями.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Sayama H.** Introduction to the modeling and analysis of complex systems. – Open SUNY Textbooks, 2015. – 496 p.
2. **Dunn J.H., Howard D.D.** Phenomena of scintillation noise in radar tracking systems // Proceedings of IRE. – 1959. – Vol. 47. – P. 855–863.
3. **Gubonin N.S.** Fluctuations of the phase front of a wave reflected from a complex target // Radio Engineering and Electronic Physics. – 1965. – Vol. 10 (5). – P. 718–725.
4. **Delano R.H.** A theory of target glint or angular scintillation in radar tracking // Proceedings of IRE. – 1953. – Vol. 41. – P. 1778–1784.
5. **Dunn J.H., Howard D.D.** Radar target amplitude, angle, and Doppler scintillation from analysis of the echo signal propagating in space // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 1968. – Vol. 16 (9). – P. 715–728. – DOI: 10.1109/TMTT.1968.1126776.
6. Modelling the radar signature of rotorcraft / G. Point, J.-F. Degurse, L. Savy, M. Montécot, J.-L. Milin // *IET Radar, Sonar & Navigation*. – 2021. – Vol. 15 (8). – P. 867–883. – DOI: 10.1049/rsn2.12062.
7. **Степанов М., Киселев А.** Моделирование угловых шумов радиолокационных объектов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2020. – 246 с. – (Монографии НГТУ). – ISBN 978-5-7782-4265-4.
8. **Huang P., Yin H., Xu X.** Characteristics of radar targets. – Beijing: Press of Electronic Industry, 2005. – P. 157–162. – In Chinese.
9. **Knott E., Schaeffer J.** Radar cross section. – New York: Artech House, 1985. – 510 p.
10. **Гейстер С.Р., Нгуен Т.Т.** Математические модели радиолокационного сигнала, отраженного от несущего винта вертолета, в приложении к обращенному синтезу

- апертуры // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2019. – Т. 22, № 3. – С. 74–87. – DOI: 10.32603/1993-8985-2019-22-3-74-87.
11. **Островитянов Р., Басалов Ф.** Статистическая теория радиолокации протяженных целей. – М.: Радио и связь, 1982. – 229 с.
  12. **Плотницкая Е.** Модель рассеянного винтами вертолета радиолокационного сигнала // Наука настоящего и будущего: VIII Научно-практическая конференция с международным участием для студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб., 2020. – Т. 2. – С. 29–32.
  13. **Колтышев Е.Е., Соловьев А.Н., Янковский В.Т.** Алгоритм измерения дальности до вертолета в когерентно-импульсных бортовых РЛС // Радиотехника. – 2012. – № 1. – С. 91–94.
  14. **Степанов М.** Точность позиционирования кажущегося центра излучения в когерентном трехточечном матричном имитаторе // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Общетехническая. – 2015. – № 5. – С. 57–67.

## TWO-POINT MODEL OF ROTATING BLADES

**Zhitnik S.V., Stepanov M.A.**

*Novosibirsk State Technical University*

In this paper, the angular noises of the rotating blades of a radar object are considered. A multipoint geometric model of rotating blades of a single propeller is considered. On its basis, analytical expressions are obtained that make it possible to calculate the angular coordinates of the apparent center of radiation of a propeller with rotating blades. Also, on the basis of a multipoint geometric model, relations were obtained that make it possible to synthesize a two-point geometric model of rotating propeller blades. Theoretical results are confirmed by mathematical modeling for two configurations of a single-rotor small-sized aircraft: with one rotating blade and with two rotating blades.

*Keywords: angular noise, multipoint model, two-point model, blade, echo signal, apparent radiation center.*

DOI: 10.17212/1727-2769-2022-3-31-41

## REFERENCES

1. Sayama H. *Introduction to the modeling and analysis of complex systems*. Open SUNY Textbooks, 2015. 496 p.
2. Dunn J.H., Howard D.D. Phenomena of scintillation noise in radar tracking systems. *Proceedings of IRE*, 1959, vol. 47, pp. 855–863.
3. Gubonin N.S. Fluctuations of the phase front of a wave reflected from a complex target. *Radio Engineering and Electronic Physics*, 1965, vol. 10 (5), pp. 718–725.
4. Delano R.H. A theory of target glint or angular scintillation in radar tracking. *Proceedings of IRE*, 1953, vol. 41, pp. 1778–1784.
5. Dunn J.H., Howard D.D. Radar target amplitude, angle, and Doppler scintillation from analysis of the echo signal propagating in space. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1968, vol. 16 (9), pp. 715–728. DOI: 10.1109/TMTT.1968.1126776.
6. Point G., Degurse J.-F., Savy L., Montécot M., Milin J.-L. Modelling the radar signature of rotorcraft. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2021, vol. 15 (8), pp. 867–883. DOI: 10.1049/rsn2.12062.
7. Stepanov M., Kiselev A. *Modelirovanie uglovykh шумов радиолокационных объектов* [Modeling of angular noise of radar objects]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2020. 246 p.
8. Huang P., Yin H., Xu X. *Characteristics of radar targets*. Beijing, Press of Electronic Industry, 2005, pp. 157–162. (In Chinese).
9. Knott E., Schaeffer J. *Radar cross section*. New York, Artech House, 1985. 510 p.
10. Heister S.R., Nguyen T.T. Mathematical models of the radar signal reflected from a helicopter main rotor in application to inverse synthesis of antenna aperture. *Izvestiya*

- vysshikh uchebnykh zavedenii Rossii. *Radioelektronika = Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*, 2019, vol. 22, no. 3, pp. 74–87. DOI: 10.32603/1993-8985-2019-22-3-74-87.
11. Ostrovityanov R., Basalov F. *Statisticheskaya teoriya radiolokatsii proyatzhennykh tselei* [Statistical theory of extended objectives radar]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1982. 229 p.
  12. Plotnitskaya E. [Model of a radar signal scattered by propellers of a helicopter]. *Nauka nastoyashchego i budushchego*. T. 2 [Science: Present and Future. Vol. 2]. VIII Scientific and Practical Conference with International Participation for Students, Postgraduates and Young Scientists. St. Petersburg, 2020, pp. 29–32. (In Russian).
  13. Koltyshev E.E., Soloviev A.N., Jankovskij V.T. Algoritm izmereniya dal'nosti do vertoleta v kogerentno-impul'snykh bortovykh RLS [Algorithm of measurement of range to the helicopter in the coherently-pulse onboard radar]. *Radiotekhnika = Radioengineering*, 2012, no. 1, pp. 91–94.
  14. Stepanov M. Tochnost' pozitsionirovaniya kazhushchegosya tsentra izlucheniya v kogerentnom trekhtocheynom matrichnom imitatore [Positioning accuracy of the apparent center of radiation in the coherent three-point matrix simulator]. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Obshchetechnicheskaya = Questions of radio electronics. General technical series*, 2015, no. 5, pp. 57–67.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Житник Сергей Владимирович** – аспирант Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: радиотехника. Опубликовано пять научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: serega0207@mail.ru).

**Zhitnik Sergey Vladimirovich** a post-graduate student at the Department of Radio Receiving and Radio Transmitting Devices, Novosibirsk State Technical University. His research interests are focused on radio engineering. He has published 5 research papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: serega0207@mail.ru).



**Степанов Максим Андреевич** – д-р техн. наук, зав. кафедрой РПИРПУ в Новосибирском государственном техническом университете. Область научных интересов: радиотехника. Опубликовано более 80 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: m.stepanov@corp.nstu.ru).

**Stepanov Maksim Andreevich**, D.Sc. (Eng.), associate professor, Department of Radio receiving and Radio transmitting Devices, Novosibirsk State Technical University. Research interests: radio engineering. More than 80 scientific papers published. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail m.stepanov@corp.nstu.ru).

Статья поступила 01 июня 2022 г.  
Received June 01, 2022

## To Reference:

Zhitnik S.V., Stepanov M.A. Dvukhtocheynaya model' vrashchayushchikhsya lopastei [Two-point model of rotating blades]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2022, no. 3 (56), pp. 31–41. DOI: 10.17212/1727-2769-2022-3-31-41.