

Экспериментальное исследование траекторных признаков для распознавания низколетящих малоскоростных радиолокационных целей в полуактивной РЛС

Дао Ван Лук^{1✉}, А. А. Коновалов², Ле Минь Хоанг¹

¹ Государственный технический институт им. Ле Куй Дона, Ханой, Вьетнам

² НИИ "Прогноз", Санкт-Петербург, Россия

✉ daolucvtl01@gmail.com

Аннотация

Введение. Малые беспилотные воздушные суда (БВС) представляют собой растущую угрозу из-за их возможного неправомерного использования для незаконной деятельности. В настоящее время полуактивные РЛС широко используются для обнаружения, сопровождения и распознавания движущихся целей, в том числе малых БВС, что делает их перспективным средством использования в современных системах радиолокационного мониторинга воздушного пространства. При этом распознавание малых БВС является сложной задачей, так как ввиду сходства характеристик их легко спутать с птицами, особенно в морских районах, где популяции птиц могут быть значительными. Для решения проблемы распознавания малых БВС предлагается использовать траекторные признаки.

Цель работы. Анализ траекторных признаков низколетящих малоскоростных целей и исследование возможности применения для решения задач распознавания этих целей.

Материалы и методы. Используются реальные радиолокационные отметки БВС и птиц, полученные в полуактивной РЛС. Построены характеристики траекторных параметров целей типа "БВС" и "птица" с помощью компьютерного статистического моделирования в среде MatLab; применен метод сравнительного анализа для определения различия траектории целей.

Результаты. Экспериментальные исследования показали существенные различия траекторий полета БВС и птиц. Исследованы особенности траекторий малых воздушных целей каждого типа. Построены графики характерных параметров траектории полета БВС и птиц на основе их радиолокационных отметок. В результате сравнительного анализа данных определены характеристики полета каждого типа целей на каждом участке движения, выделены информативные траекторные признаки, которые можно использовать для разработки алгоритма распознавания в пассивном когерентном локаторе (ПКЛ).

Заключение. Результаты эксперимента подтвердили практическую значимость предлагаемых траекторных признаков и возможность их применения при разработке алгоритма распознавания низколетящих малоскоростных радиолокационных целей в ПКЛ. Использование различий траекторий полета БВС и птиц способно повысить качество решения задачи распознавания БВС.

Ключевые слова: распознавание радиолокационных целей, траекторный признак, пассивный когерентный радиолокатор, малое БВС

Для цитирования: Дао Ван Лук, Коновалов А. А., Ле Минь Хоанг. Экспериментальное исследование траекторных признаков для распознавания низколетящих малоскоростных радиолокационных целей в полуактивной РЛС // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 3. С. 39–50. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-3-39-50

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 15.03.2022; принята к публикации после рецензирования 16.05.2022; опубликована онлайн 28.06.2022



Experimental Study of Trajectory Features for the Recognition of Low-Flying Low-Speed Radar Targets Using Passive Coherent Radar Systems

Dao Van Luc ¹✉, Aleksandr A. Konovalov ², Le Minh Hoang ¹

¹ Le Quy Don Technical University, Ha Noi, Viet Nam

² Research Institute "Prognoz", St Petersburg, Russia

✉ daolucvtl01@gmail.com

Abstract

Introduction. Small unmanned aerial vehicles (UAVs) are a growing threat due to their possible use for illegal activities. Currently, passive coherent radar systems are widely used to detect, track and recognize moving targets, including small UAVs, which makes them a promising tool for use in modern airspace radar monitoring systems. At the same time, recognition of small UAVs becomes a challenging task due to the possibility of confusing them with birds, particularly in maritime areas with large bird populations. In a search for new solutions to the problem of recognizing small UAVs, trajectory features can be used.

Aim. To analyze differences between the trajectory features of low-flying low-speed targets in order to verify the possibility of their use for recognition purposes.

Materials and methods. Real radar measurements of UAVs and birds obtained by a passive coherent radar system were used. Specific characteristics of the trajectory parameters of target classes were built using computer statistical modeling in the MatLab environment. Differences in the movement trajectory of targets were established by comparative analysis.

Results. Significant differences between the flight path of UAVs and birds were found. Specific features of the trajectory of small aerial targets of each type were investigated. On the basis of radar measurement, graphs of the characteristic trajectory parameters of UAVs and birds were plotted. The conducted comparative analysis allowed identification of the characteristics of the flight path of each target type in each movement segment. Trajectory features that can be used for recognition purposes were identified.

Conclusion. The practical significance of the proposed trajectory features and the possibility of their implementation in the development of an algorithm for recognizing low-flying low-speed radar targets using passive coherent radar systems was established. The knowledge of differences between the flight path of UAVs and birds can improve the quality of the UAV recognition problem.

Keywords: radar targets recognition, trajectory feature, passive coherent radar, small UAV

For citation: Dao Van Luc, Konovalov A. A., Le Minh Hoang. Experimental Study of Trajectory Features for the Recognition of Low-Flying Low-Speed Radar Targets Using Passive Coherent Radar Systems. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 3, pp. 39–50. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-3-39-50

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

Submitted 15.03.2022; accepted 16.05.2022; published online 28.06.2022

Введение. В последние десятилетия одной из основных задач, определяющих развитие радиолокационных систем (РЛС), является обеспечение обнаружения воздушных объектов на малых и предельно малых высотах. В связи с широким распространением беспилотных воздушных судов (БВС) возрастает вероятность использования их для совершения незаконных действий. Активное развитие БВС, находящихся в том числе в частном пользовании, ставит перед системой контроля воздушного пространства задачу по устранению новой угрозы

для безопасности воздушного движения над административно-политическими центрами и техническими объектами. Также осуществление контроля за порядком использования воздушного пространства постоянно усложняется в связи с бурным развитием БВС различного класса и назначения. Эта проблема характерна для всех государств, особенно для воздушного пространства в районе крупных административных центров. Малые БВС могут решать разведывательные задачи (на сегодня это основное их предназначение), применяться для

нанесения ударов по наземным и морским целям, перехвата воздушных целей, осуществлять постановку радиопомех, управление огнем и целеуказание, ретрансляцию сообщений и данных, доставку грузов. С целью контроля пространства и противодействия опасностям, исходящим от БВС, в настоящее время создаются различные радиотехнические средства, задачами которых в плане борьбы с БВС являются обнаружение целей, оценка параметров их движения, распознавание цели как БВС и выдача информации о ней сопряженным устройствам, в том числе устройству подавления БВС [1–4].

Таким образом, задача распознавания низколетящих малоскоростных радиолокационных целей вызывает повышенный интерес, особенно у разработчиков РЛС контроля пространства и противодействия БВС, поскольку реализация режимов распознавания обеспечивает повышение адекватности радиолокационной информации, получаемой от РЛС на пунктах управления различной степени иерархии, что позволит оптимизировать принимаемые решения в условиях реально складывающейся обстановки.

В настоящее время основное внимание при распознавании БВС и других типов целей сосредоточено на анализе сигнальных признаков (дальностного портрета, микродоплеровской сигнатуры). Однако эти методы не всегда применимы: для построения дальностного портрета необходимо иметь высокое разрешение по дальности, микродоплеровская сигнатура при обычно используемых пластмассовых винтах различима в основном на малых дальностях [5].

В связи с этим возрастает актуальность извлечения данных, пригодных для распознавания, из анализа других атрибутов цели. Одним из перспективных направлений повышения качества распознавания БВС представляется использование траекторных признаков, под которыми понимаются параметры целей, оцениваемые по результатам анализа их траекторий (т. е. результатов вторичной, или траекторной, обработки радиолокационной информации) [6, 7].

Целью работы, описываемой в настоящей статье, является экспериментальное исследование траекторных признаков низколетящих целей (БВС и птицы) для решения задач их распознавания.

Постановка задачи. По многим признакам класс БВС пересекается с классом птиц, поэтому возникает задача распознавания БВС и птиц. Сосредоточимся при распознавании на анализе траекторных признаков. Траекторные признаки – это параметры траекторий целей, характеризующие ее тактико-технические характеристики. Для движущихся целей такими параметрами являются скорость, ускорение, высота, направление (курс) и др. В настоящее время не так много статей о характеристиках траектории полета птиц и БВС.

Для решения задач фильтрации параметров и построения модели анализа траекторий движения воздушных объектов прежде всего необходимо изучить летные характеристики цели.

Рассмотрим уравнение движения воздушной цели:

$$\mathbf{x}_{k+1} = F_k \mathbf{x}_k + G_k \mathbf{u}_k + \Gamma_k \mathbf{w}_k,$$

где \mathbf{x} – вектор состояния; F – переходная матрица (матрица экстраполяции), отражающая взаимосвязь предыдущего и последующего значений \mathbf{x} ; G – матрица интенсивности управления (входная матрица); \mathbf{u} – вектор детерминированных управляющих воздействий; Γ – матрица, отражающая влияние шума процесса на вектор состояния; \mathbf{w} – вектор случайных воздействий (шум процесса); k – шаг оценивания.

Поскольку птицы способны совершать маневры различной интенсивности с заранее неизвестными характеристиками, необходимо экспериментальное исследование характера их полета.

Краткий обзор характеристик полета птиц и БВС. Для исследования летных характеристик птиц и БВС можно использовать следующие методы:

- визуальное наблюдение за летными характеристиками птиц и БВС (поскольку эти типы целей медленные и низколетящие);
- анализ реальных экспериментальных данных (например, радиолокационных);
- имитационное моделирование. Для построения модели необходимо исследовать летные характеристики двумя перечисленными методами. В настоящее время практически невозможно построить имитационную модель полета птиц.

Краткое изучение летных характеристик

цели достигается посредством анализа литературы о птицах и инструкции БВС, а также визуальным наблюдением. Рассмотрим кратко их летные характеристики.

К объектам класса "птицы" могут относиться одиночные птицы либо стаи. Большинство птиц летает на высоте 100 м от земли, чем выше, тем быстрее уменьшается их количество в пространстве. Только в период миграции крупные и средние птицы летают на высотах от 300 до 2000 м. При отсутствии попутного ветра скорость перемещения птиц не превышает 20 м/с. При наличии попутного ветра скорость перемещения представляет собой сумму векторов собственной скорости перемещения птиц и скорости ветра. В табл. 1 представлены летные характеристики некоторых птиц Ленинградской области [8–11].

Малые БВС разделяются на летательные аппараты (ЛА) вертолетного и самолетного типов, а также мультикоптеры. В данной статье рассмотрены характеристики БВС типа мультикоптер. Их особенности: крейсерская скорость полета типовых ЛА – не более 20 м/с;

Табл. 1. Летные характеристики птиц
 Tab. 1. Flight parameters of various birds

Тип птиц	Характеристики полета птиц		
	Скорость полета, м/с	Высота полета, м	Миграционная активность
Чайка	11...17	100	Дневная, ночная
Вороны	11...14	100	Дневная
Утки	18...21	100	Ночная
Голубь	11...17	100	Дневная, ночная
Гусь	14...17	2000	Дневная, ночная
Лебедь	15...18	2000	Дневная, ночная
Журавль	11...17	1000	Дневная, ночная

Табл. 2. Траекторные параметры БВС по ТХ
 Tab. 2 Flight parameters of various UAVs

БВС	Характеристики полета БВС				
	Максимальная скорость, м/с	Высота полета, м	Радиус управления, м	Максимальное время полета, мин	Спутниковые системы позиционирования
DJI Phantom 3	16	120	< 1000	25	GPS
Syma X30	10	100	< 300	23	GPS
Hubsan H117S Zino	18	120	< 2000	23	GPS / GLONASS

высота полета для типовых ЛА – в интервале от единиц метров до 500 м. В табл. 2 приведены параметры полета малоразмерных популярных БВС [12, 13].

Анализ траекторных характеристик птиц и БВС позволяет построить метод распознавания БВС, задачей которого является оценка вероятности принадлежности рассматриваемой цели к классу "БВС". Задача различения БВС и птиц осложняется тем, что объекты этих двух классов двигаются примерно с одинаковыми скоростями, на одинаковых высотах и зачастую обладают схожими эффективными площадями рассеяния, вследствие чего разделение их алгоритмом классификации по совокупности сигнальных радиолокационных признаков не происходит [14, 15].

Основным отличием движения птицы как живого существа от механического БВС является то, что движение БВС – жесткое, т. е. все части объекта изменяют свое положение в пространстве одновременно, тогда как движение птицы – нежесткое, т. е. некоторые части объекта совершают движение, отличное от других, например, движение тела и крыльев. Выделяют следующие виды полета птиц: машущий (за счет движения крыльев вверх и вниз); трепещущий (машущий с зависанием и при взлете/посадке); планирующий (движение за счет потоков воздуха с редкими взмахами крыльев) и парящий (крылья неподвижны). При этом разным птицам присущи разные виды полета и разное их сочетание. Наименее жестким является машущий полет, наиболее жестким – парящий. Известно, что в настоящее время ведутся работы по созданию БВС, чье перемещение в воздухе будет неотличимо от птиц, однако далее будем полагать, что и БВС, и птицы совершают полет обычным для себя образом.

Второй аспект, в котором движение БВС и

птицы может отличаться, – это реакция на ветер. БВС вносит поправку в управляющее воздействие на двигатели достаточно плавно, тогда как птица будет компенсировать снос более энергичными взмахами крыльев.

Кроме того, если БВС, совершая целенаправленный полет по заранее заданной программе, движется примерно с постоянной скоростью, то птица может чередовать разные виды полета (например, машущий и парящий).

Таким образом, можно заключить, что если БВС и птица совершают полет по прямой в одинаковых условиях, то за счет нежесткого характера движения для траектории птицы будет характерен большой размах отклонений движения от прямолинейного – высота, скорость, курс и скорость поворота у нее могут меняться в большем диапазоне.

Экспериментальные исследования траекторных характеристик птиц и БВС. Для получения экспериментальных данных использовался опытный образец полуактивного локатора (рис. 1, а), разработанный в Санкт-Петербургском электротехническом университете "ЛЭТИ". Экспериментальный локалатор работает на частоте 666 МГц с эффективной полосой 7.61 МГц при использовании сторонних сигналов цифрового эфирного телевидения DVB-T2. Данный локалатор способен обнаруживать малые БВС на расстоянии до 10 км и птиц – 20 км. Радар обеспечивает точность измерения по дальности 50 м, по азимуту 10; период обзора – 3 с. В ходе эксперимента наблюдались отметки от птиц, тестового БВС DJI Phantom 3 (рис. 1, б), анализировались микроплеровские сигнатуры сигналов, отраженных от этих целей [15, 16].

Скорость, ускорение, курс, скорость поворота являются основными траекторными параметрами для анализа. Они непосредственно вычисляются на основе измерения координат [17].

На основании данных вектора координат цели $[x, y]$ можно вычислить текущие (для k -го шага оценивания):

– вектор скорости цели $[v_x, v_y]$:

$$v_x(k) = \frac{x_k - x_{k-1}}{\Delta t_k}; v_y(k) = \frac{y_k - y_{k-1}}{\Delta t_k},$$



а



б

Рис. 1. Экспериментальная аппаратура: а – опытный образец полуактивного локалатора; б – БВС – квадрокоптер DJI Phantom 3

Fig. 1. Experiment apparatus: а – experimental passive coherent radar; б – UAV – DJI Phantom 3 quadcopter

где Δt_k – время между двумя отметками на k -м и $(k-1)$ -м шагах оценивания;

– модуль скорости:

$$v_k = \sqrt{v_x^2 + v_y^2};$$

– курс цели:

$$\varphi_k = \arctg(v_x/v_y);$$

– вектор ускорения цели $[a_x, a_y]$:

$$a_{x(k)} = \frac{v_x(k) - v_x(k-1)}{\Delta t_k}; a_{y(k)} = \frac{v_y(k) - v_y(k-1)}{\Delta t_k};$$

– модуль ускорения:

$$a_k = \sqrt{a_{x(k)}^2 + a_{y(k)}^2};$$

– угловую скорость цели при совершении ею скоординированного поворота:

$$\omega_k = \frac{\varphi_k - \varphi_{k-1}}{\Delta t_k}.$$

К параметрам, характеризующим траекторию в целом или отдельный ее участок, относятся:

- длительность траектории T , выраженная в секундах;
- количество измерений N за время существования траектории;
- минимальная и максимальная скорости цели v_{\min} и v_{\max} ;
- минимальное и максимальное ускорения цели a_{\min} и a_{\max} ;
- минимальный и максимальный курсы цели Φ_{\min} и Φ_{\max} ;
- минимальная и максимальная скорости поворота цели ω_{\min} и ω_{\max} .

Большой интерес для распознавания представляют статистические характеристики указанных параметров, такие, как математическое ожидание (выборочное среднее) и выборочное среднеквадратическое отклонение (СКО).

Траекторные характеристики птиц. В целом траектория полета птицы имеет более случайный характер, чем БВС, как по амплитуде, так и по направлению полета. В ходе исследований был проведен анализ более 120 траекторий полета птиц. На рис. 2 приведен пример траектории птицы с 240 отметками.

На траектории полета птиц можно наблюдать участки кружения. Это связано с их поведенческими и биологическими особенностями. Такие участки траекторий можно считать одним из признаков птицы: птица, в отличие от БВС, зависнуть на одном месте не может, тогда как БВС, наоборот, кружиться, как правило, незачем – оно при необходимости просто зависает на одном месте.

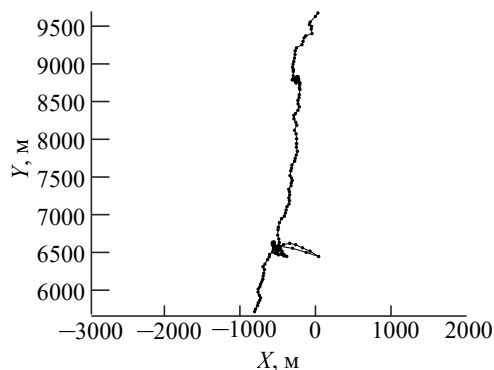


Рис. 2. Траектория полета птицы в двумерной прямоугольной системе координат
Fig. 2. Bird flight path in Cartesian coordinates system

Что касается линейной части траектории, то птица в целом выдерживает направление движения, однако на большей части траектории наблюдаются довольно значительные отклонения. Это могут быть как плавные волнообразные отклонения, так и более резкие, достигающие до 100 м.

Теперь рассмотрим, как указанные явления, характерные для полета птиц, отражаются на параметрах их траекторий. Отметим, что для подобного анализа траектории лучше всего подходят не мгновенные параметры, а усредненные в скользящем окне, имеющие более гладкий характер.

Скорость – параметр траектории, наиболее явно выражающий характер полета. На рис. 3 показаны графики скорости и ее СКО. Очень характерны при этом участки кружения. Если на прямолинейном участке средняя скорость птицы находится в пределах 13...17 м/с, то при кружении она резко снижается до 2...6 м/с. Достаточно характерно ведет себя и СКО скорости при кружении – если в обычных условиях его значение находится в пределах 1 м/с, то в моменты снижения и увеличения скорости возрастает до 5 м/с. В сам момент кружения СКО примерно такое же, как и при ровном полете. Заметим, что среднее и СКО чувствительны к "выбросам" значений скорости, поэтому обнаружение стадии кружения по скорости надежнее.

В свою очередь, ускорение полета птицы (рис. 4) также зависит от вида движения. На стадии ровного полета ускорение, как и должно быть, колеблется около нуля, не превышая в основном значений ± 0.1 м/с², тогда как на участках набора скорости и ее сброса ускорение (замедление) достигает значения ± 0.4 м/с².

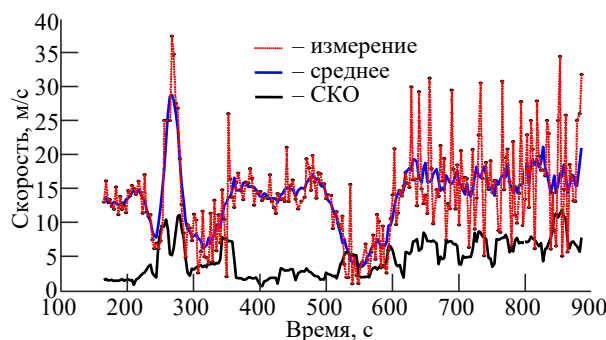


Рис. 3. Траектория полета птицы: скорость и ее СКО
Fig. 3. Bird flight path: velocity and standard deviation

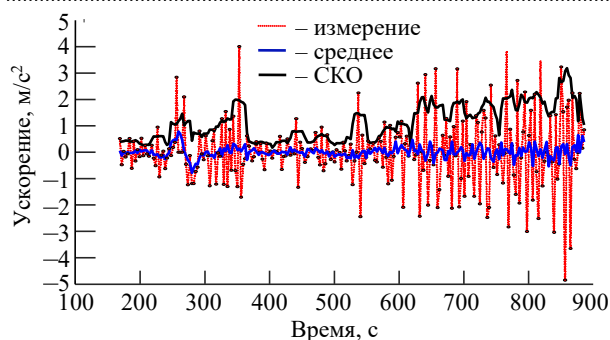


Рис. 4. Траектория полета птицы: ускорение и его СКО
Fig. 4. Bird flight path: acceleration and standard deviation

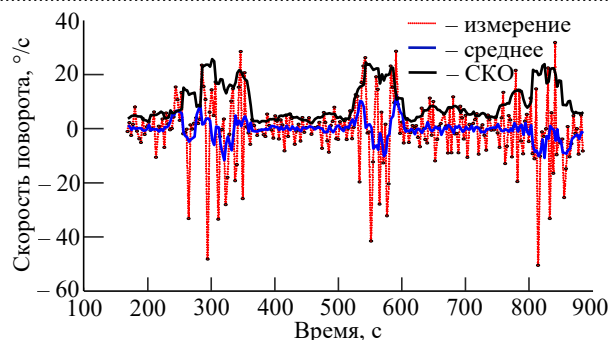


Рис. 6. Траектория полета птицы: скорость поворота и ее СКО
Fig. 6. Bird flight path: turn rate and standard deviation

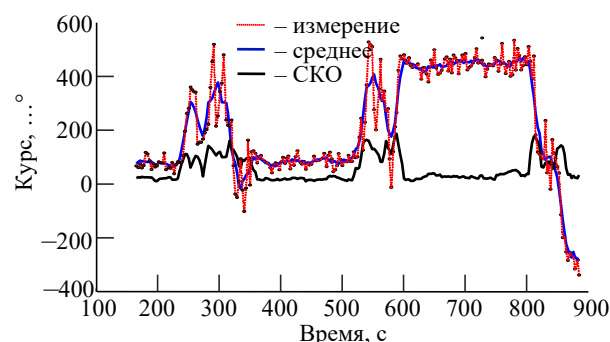


Рис. 5. Траектория полета птицы: курс и его СКО
Fig. 5. Bird flight path: course and standard deviation

Особый интерес представляет анализ курса и его СКО (рис. 5). Движение в режиме кружения характеризуется постоянной сменой курса, в результате чего в эти моменты его значение меняется в больших пределах (изрезанность синей линии) и СКО курса принимает большие значения – в среднем до $50...70^\circ$, возможны выбросы выше 140° . По-видимому, СКО курса является, наряду со скоростью, лучшим индикатором для обнаружения кружения. Если в обычном режиме СКО курса колеблется в пределах $5...10^\circ$, максимум 15° , то при кружении его значение находится на уровне $80...100^\circ$ и $95...120^\circ$.

Угловая скорость поворота (или просто скорость поворота, рис. 6) вычисляется как производная от измеренного курса. Средняя скорость поворота в режиме прямолинейного полета колеблется около нуля ($\pm 1^\circ/\text{с}$), тогда как в режиме кружения она принимает значения в диапазоне $\pm 8^\circ/\text{с}$. СКО скорости поворота на участках ровного движения имеет значения в пределах $1...3^\circ/\text{с}$, при кружении для него характерны значения в диапазоне $15...60^\circ/\text{с}$.

В 47 из 122 исследованных траекторий птиц зафиксированы участки кружения, ровное движение – у всех. Результаты исследований

Табл. 3. Траекторные признаки птиц на разных участках
Tab. 3. Tracking Characteristics of Birds

Параметр	Значение параметра	
	Кружение	Ровный полет
Скорость, м/с	2...7	5...25
СКО скорости, м/с	7	3...5
Ускорение, м/с ²	0...4	0...0.5
СКО ускорения, м/с ²	0.7...1	0.7...2
СКО курса, ...°	70...170	0...50
Скорость поворота, °/с	0...30	0...20
СКО скорости поворота, °/с	15...25	1...10

траекторных параметров по всем участкам движения приведены в табл. 3.

Таким образом, для птицы, которой принадлежит рассматриваемая траектория, можно выделить 2 способа полета: ровный и кружение, существенно различающиеся значениями траекторных признаков. Режим кружения отличается снижением скорости и возрастанием всех значений СКО.

Траекторные характеристики малых БВС. В ходе экспериментальных исследований траектории БВС использовался квадрокоптер DJI Phantom 3, который относится к популярным малым беспилотным летательным аппаратам. DJI Phantom 3 имеет габаритные размеры $40 \times 40 \times 19$ см, максимальная горизонтальная скорость полета – 16 м/с (режим АТТИ, нет ветра). В данной статье представлены результаты исследований траектории его полета, проведенные с целью уточнения летных характеристик БВС на различных участках полета для решения задачи распознавания.

На рис. 7 приведен пример траектории DJI Phantom 3, содержащей 118 отметок.

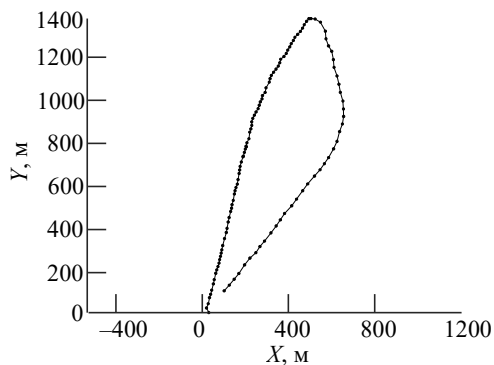


Рис. 7. Траектория полета БВС в ПСК
 Fig. 7. The flight path of UAVs in Cartesian coordinates system

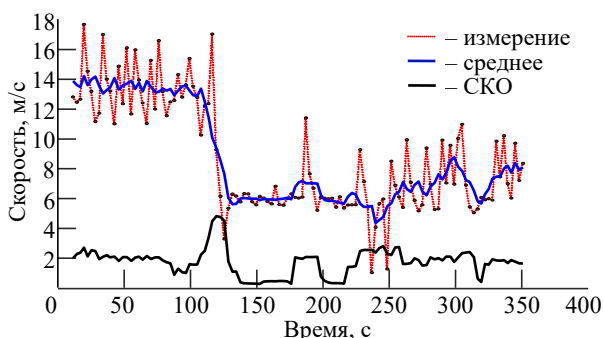


Рис. 8. Траектория полета БВС: скорость и ее СКО
 Fig. 8. The flight path of UAVs: velocity and standard deviation

Анализируемые эксперименты показали, что БВС, которые должны быть идентифицированы, большую часть времени будут двигаться в режиме ровного полета (т. е. по прямой или плавной дуге с постоянной скоростью), поэтому для распознавания БВС целесообразно использовать его траекторные параметры, характерные для этого режима движения. Тем не менее значения траекторных признаков сильно зависят от погодных условий, в первую очередь от скорости и направления ветра. Существенные различия траекторных признаков оказались в режимах при сопротивлении ветра и по ветру.

При движении в режиме ровного полета по ветру скорость БВС меняется в пределах 10...15 м/с с СКО 1.2...1.6 м/с (рис. 8). При сопротивлении ветра БВС летит со сниженной скоростью 6...8 м/с, СКО возрастает до 1.4...2.1 м/с. На участке перехода СКО скорости возрастает до 4 м/с.

Так как БВС летел с постоянной скоростью, его ускорение является случайным процессом с математическим ожиданием, близким к нулю. СКО ускорения меньше на первой части траектории (в пределах 0.3...0.7 м/с²) и больше (до

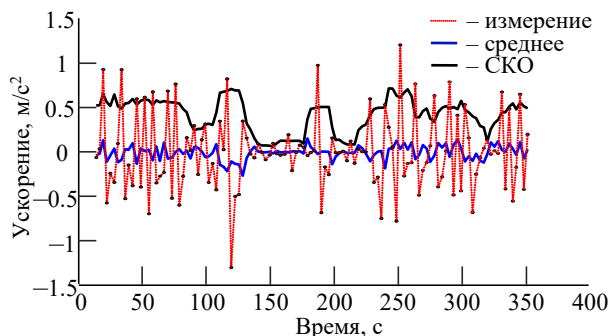


Рис. 9. Траектория полета БВС: ускорение и его СКО

Fig. 9. The flight path of UAVs: acceleration and standard deviation

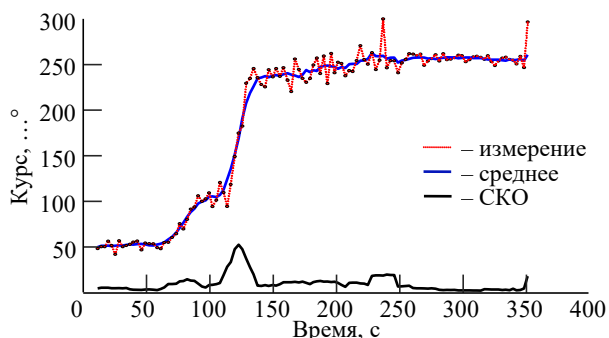


Рис. 10. Траектория полета БВС: курс и его СКО

Fig. 10. The flight path of UAVs: course and standard deviation

0.3...0.8 м/с²) на второй (рис. 9). Хотя в целом при прямолинейном полете с постоянной скоростью ускорение (как среднее, так и СКО), по видимому, не сможет стать надежным идентификационным признаком БВС.

Полет против ветра сказался и на СКО курса, которое составляет в пределах 2.5...5° при полете без ветра и около 7...8° при сопротивлении ветра (рис. 10). Следовательно, значение СКО курса также сильно зависит от условий среды. На участке перехода СКО курса возрастает до 50°.

При прямолинейном движении скорость поворота на подветренных участках находится в пределах 0.3...1 °/с со средним значением около 0.3 °/с, на участках сопротивления ветра разброс гораздо выше: от -0.5 до 2.5 °/с (рис. 11). Это сказывается и на СКО: в первом случае СКО находится в пределах 1.5...3.1 °/с, во втором около 3 °/с и до 7 °/с в моменты выбросов.

В табл. 4 представлены результаты экспериментального анализа траекторных признаков БВС на разных участках.

На основе анализа траекторий реальных БВС и птиц установлено, что каждая из этих целей имеет разные режимы движения. Движение БВС при сопротивлении ветра и ровный

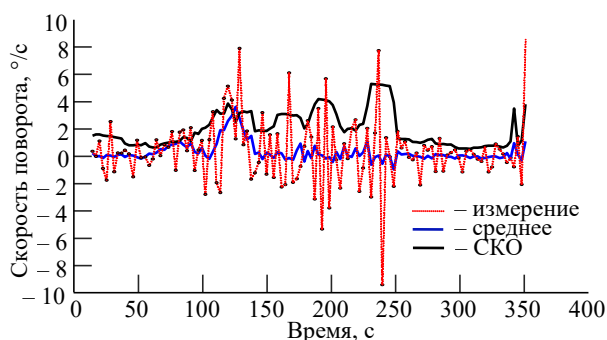


Рис. 11. Траектория полета БВС: скорость поворота и ее СКО

Fig. 11. The flight path of UAVs: turn rate and standard deviation

Табл. 4. Траекторные признаки БВС на разных участках

Tab. 4. Tracking characteristics of UAVs

Параметр	Значение параметра	
	По ветру	Против ветра
Скорость, м/с	10.5...11	7...7.5
СКО скорости, м/с	1.6...2.2	1.2...2.2
Ускорение, м/с ²	0.1	0.1
СКО ускорения, м/с ²	0.4...0.6	0.4...0.6
СКО курса, ...°	2.5...5	7...8
Скорость поворота, °/с	0.5...2	2...5
СКО скорости поворота, °/с	0.2	0.7...1

полет птицы (без его дифференцирования по степени воздействия ветра) имеют практически идентичные траекторные признаки, и поэтому их разделение не представляется возможным, по крайней мере до появления более полного статистического описания. С другой стороны, режим кружения птицы характерен именно для нее, а параметры ровного полета БВС без сопротивления ветра в среднем заметно отличаются от аналогичных параметров ровного полета птицы. Соответственно, распознавание по траекторным признакам имеет 2 этапа: обнаружение режима кружения и оценка параметров траектории в режиме ровного полета.

Участком кружения признается часть траектории со следующими параметрами:

- средняя скорость цели в пределах 1...6 м/с;
- СКО курса более 15°;

- максимум модуля скорости поворота не менее 15°/с;

- СКО скорости поворота более 8 °/с;
- длина участка (в отметках) не менее 10.

Участком ровного движения считается часть траектории, у которой СКО скорости не превышает 2 м/с, а длина участка в отметках не менее 20.

Если при этом на данном участке:

- средняя скорость более 10 м/с;
- СКО курса не более 4°;
- максимум модуля скорости поворота не более 2 °/с ;
- СКО скорости поворота не более 1°/с,

можно заключить, что данная траектория принадлежит БВС, движущемуся без сопротивления ветра.

Дополнительные возможности по распознаванию классов целей и участков траекторий может дать использование метеорологических датчиков, предоставляющих данные о скорости и направлении ветра.

Выводы. В ходе экспериментальных исследований был проведен анализ траекторных признаков низколетящих целей (птицы и БВС). Анализ показал возможность практического использования траекторных признаков для решения задачи распознавания низколетящих целей. Каждый тип целей может иметь как минимум по 2 различающихся режима движения. Для БВС это движение по ветру и против ветра, для птиц – режимы кружения и ровного полета. Участки кружения наблюдаются только в траектории полета птиц, такие участки характеризуются снижением скорости и выбросом СКО всех траекторных параметров. Траекторные параметры БВС сильно зависят от погодных условий. Для построения моделей движения птиц и БВС необходимо учитывать такие особенности. При наблюдении маневра целесообразно использовать значения СКО скорости, курса, скорости поворота.

Список литературы

1. Drone-vs-Bird Detection Challenge at IEEE AVSS2021 / A. Coluccia, A. Fascista, A Schumann, et al. // 17th IEEE Intern. Conf. on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS), Washington, USA, 16–19 Nov. 2021. IEEE, 2021. P. 1–8. doi: 10.1109/AVSS52988.2021.9663844

2. Павлушенко М. И., Евстафьев Г. М., Макаренко И. К. Беспилотные летательные аппараты: история, применение, угроза распространения и перспективы развития // Науч. зап. ПИР-центра: Национальная и глобальная безопасность. 2004. № 2 (26). 612 с.

3. Методы радиолокационного распознавания и их

моделирование / Я. Д. Ширман, С. А. Горшков, С. П. Лещенко, Г. Д. Братченко, В. М. Орленко // Науч.-техн. сер. Радиолокация и радиометрия. № 2. Радиолокационное распознавание и методы математического моделирования. 2000. Вып. 3. С. 5–65.

4. Бондарев А. Н., Киричек Р. В. Обзор беспилотных летательных аппаратов общего пользования и регулирования воздушного движения БВС в разных странах // Информационные технологии и телекоммуникации. 2016. Т. 4, № 4. С. 13–23.

5. Воробьев Е. Н. Исследование сигнальных признаков распознавания малых БПЛА в полуактивной РЛС // Вестн. Новг. гос. ун-та. Сер. Техн. науки. 2019. № 4 (116). С. 72–77. doi: 10.34680/2076-8052.2019.4(116).72-77

6. Купряшкин И. Ф., Соколик Н. В. Алгоритм обработки сигналов в радиолокационной системе с непрерывным частотно-модулированным излучением в интересах обнаружения малозаметных воздушных объектов, оценки их дальности и скорости движения // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 1. С. 39–47. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-1-39-47

7. Coluccia A., Parisi G., Fascista A. Detection and Classification of Multirotor Drones in Radar Sensor Networks: A Review // Sensors. 2020. Vol. 20, iss. 15. P. 4172. doi: 10.3390/s20154172

8. Мацюра А. В. Миграция птиц и метеорологические параметры: краткий обзор. Ч. 1 // Acta Biologica Sibirica. 2015. Т. 1, № 1–2. С. 117–131. doi: 10.14258/abs.v1i1-2.854

9. Osadchyi V. V., Yermeev V. S., Matsyura A. V. Cluster Analysis, Fuzzy Sets, and Fuzzy Logic Models in Bird Identification // Ukrainian J. of Ecology. 2017. Vol. 7, № 2. P. 96–103. doi: 10.15421/2017_25

10. Malsev K., Yaroslavsky L., Leshem Y. Processing of Weather Radar Images for Bird Detection and Tracking //

The Seventh IASTED Intern. Conf. on Visualization, Imaging and Image Processing, Palma de Mallorca, Spain, 29–31 Aug. 2007. С. 106–111.

11. Скорость полета птиц. Таблица. URL: <https://cyberlesson.ru/skorost-poleta-ptic-tablica/> (дата обращения 11.10.2021)

12. UAV Target Detection Algorithm Using GNSS-Based Bistatic Radar / H. Zeng, H. Zhang, J. Chen, W. Yang // IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. 2019 (IGARSS 2019), Yokohama, Japan, 28 July – 2 Aug. 2019. IEEE, 2019. P. 2167–2170. doi: 10.1109/IGARSS.2019.8898935

13. An X-Band FMCW Radar for Detection and Tracking of Miniaturized UAVs / J. Lee, M. Park, I. Eo, B. Koo // Intern. Conf. on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI), Las Vegas, USA, 14–16 Dec. 2017. IEEE, 2017. P. 1844–1845. doi: 10.1109/CSCI.2017.342

14. Patel J. S., Fioranelli F., Anderson D. Review of Radar Classification and RCS Characterisation Techniques for Small UAVs or Drones // IET Radar, Sonar & Navigation. 2018. Vol. 12, iss. 9. P. 911–919. doi: 10.1049/iet-rsn.2018.0020

15. DVB-T2 passive radar developed at Saint Petersburg Electrotechnical University / E. Vorobev, A. Barkhatov, V. Veremyev, V. Kutuzov // 22nd Intern. Microwave and Radar Conf. (MIKON), Poznan, Poland, 14–17 May 2018. IEEE, 2018. P. 204–207. doi: 10.23919/MIKON.2018.8405178

16. Пассивная когерентная радиолокация / А. В. Бархатов, В. И. Веремьев, Е. Н. Воробьев, А. А. Коновалов, Д. А. Ковалев, В. М. Кутузов, В. Н. Михайлов. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2016. 163 с.

17. Коновалов А. А. Основы траекторной обработки радиолокационной информации. Ч. 2. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2014. 180 с.

Информация об авторах

Дао Ван Лук – специалист по направлению "Радиоэлектронные системы и комплексы" (2016), аспирант Государственного технического института им. Ле Куй Дона (Ханой, Вьетнам). Автор двух научных публикаций. Сфера научных интересов – радиолокация; вторичная и третичная обработка радиолокационной информации.

Адрес: Государственный технический институт им. Ле Куй Дона, ул. Хоанг Куок Вьет, д. 236, район Бак Ты Лиам, Ханой, Вьетнам

E-mail: daolucvtl01@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-8006-3076>

Коновалов Александр Анатольевич – кандидат технических наук (2015), старший научный сотрудник НИИ "Прогноз". Автор 52 научных работ. Сфера научных интересов – вторичная и третичная обработка радиолокационной информации; объединение данных, многопозиционная радиолокация; бистатистические радиотехнические системы.

Адрес: НИИ "Прогноз", ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: al_an_kon@mail.ru

Ле Минь Хоанг – специалист по направлению "Радиоэлектронные системы и комплексы" (2017), аспирант Государственного технического института им. Ле Куй Дона (Ханой, Вьетнам). Автор двух научных публикаций. Сфера научных интересов – радиолокация; вторичная и третичная обработка радиолокационной информации.

Адрес: Государственный технический институт им. Ле Куй Дона, ул. Хоанг Куок Вьет, д. 236, район Бак Ты Лиен, Ханой, Вьетнам

E-mail: lehoang.navy@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-8913-3296>

References

1. Coluccia A., Fascista A., Schumann A. et al. Drone-vs-Bird Detection Challenge at IEEE AVSS2021. 17th IEEE Intern. Conf. on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS). Washington, USA, 16–19 Nov. 2021. IEEE, 2021, pp. 1–8. doi: 10.1109/AVSS52988.2021.9663844
2. Pavlushenko M. I., Evstafev G. M., Makarenko I. K. Unmanned Aerial Vehicles: History, Application, Threat of Proliferation and Development Prospects. PIR Center Study Papers: Russia and Global Security. 2004, no. 2 (26), 612 p. (In Russ.)
3. Shirman Ia. D., Gorshkov S. A., Leshchenko S. P., Bratchenko G. D., Orlenko V. M. Methods of Radar Recognition and Their Simulation. Science-Technical Series. Radiolocation and Radiometry no. 2. Radar Recognition and Methods for Mathematical Simulation. 2000, iss. 3, pp. 5–65. (In Russ.)
4. Bondarev A. N., Kirichek R. V. Overview of Unmanned Aerial Apparatus for General use and Regulation of Air UAV Movement in Different Countries. Telecom IT. 2016, vol. 4, iss. 4, pp. 13–23. (In Russ.)
5. Vorobyov E. N. Investigation of Distinctive Features for Recognition of Small UAVs in Passive Radar. Vestnik NovSU. Iss.: Engineering Sciences. 2019, no. 4 (116), pp. 72–77. doi: 10.34680/2076-8052.2019.4(116).72-77 (In Russ.)
6. Kupryashkin I. F., Sokolik N. V. Algorithm of Signal Processing in the Radar System with Continuous Frequency Modulated Radiation for Detection of Small-Sized Aerial Objects, Estimation of their Range and Velocity. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 1, pp. 39–47. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-1-39-47
7. Coluccia A., Parisi G., Fascista A. Detection and Classification of Multirotor Drones in Radar Sensor Networks: A Review. Sensors. 2020, vol. 20, iss. 15, p. 4172. doi: 10.3390/s20154172
8. Matsyura A. V. Bird Migration and Meteorological Parameters – A Review (Part I). Acta Biologica Sibirica. 2015, vol. 1, no. 1–2, pp. 117–131. doi: 10.14258/abs.v1i1-2.854
9. Osadchyi V. V., Yermeev V. S., Matsyura A. V. Cluster Analysis, Fuzzy Sets, and Fuzzy Logic Models in Bird Identification. Ukrainian J. of Ecology. 2017, vol. 7, no. 2, pp. 96–103. doi: 10.15421/2017_25
10. Malsev K., Yaroslavsky L., Leshem Y. Processing of Weather Radar Images for Bird Detection and Tracking. The Seventh IASTED Intern. Conf. on Visualization, Imaging and Image Processing. Palma de Mallorca, Spain, 29–31 Aug. 2007, pp. 106–111.
11. Bird flight speed table. Available at: <https://cyberlesson.ru/skorost-poleta-ptic-tablica/> (accessed 11.10.2021)
12. Zeng H., Zhang H., Chen J., Yang W. UAV Target Detection Algorithm Using GNSS-Based Bistatic Radar. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. 2019 (IGARSS 2019), Yokohama, Japan, 28 July – 2 Aug. 2019. IEEE, 2019, pp. 2167–2170. doi: 10.1109/IGARSS.2019.8898935
13. Lee J., Park M., Eo I., Koo B. An X-Band FMCW Radar for Detection and Tracking of Miniaturized UAVs. Intern. Conf. on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI), Las Vegas, USA, 14–16 Dec. 2017. IEEE, 2017, pp. 1844–1845. doi: 10.1109/CSCI.2017.342
14. Patel J. S., Fioranelli F., Anderson D. Review of Radar Classification and RCS Characterisation Techniques for Small UAVs or Drones. IET Radar, Sonar & Navigation. 2018, vol. 12, iss. 9, pp. 911–919. doi: 10.1049/iet-rsn.2018.0020
15. Vorobev E., Barkhatov A., Veremyev V., Kutuzov V. DVB-T2 Passive Radar Developed at Saint Petersburg Electrotechnical University. 22nd Intern. Microwave and Radar Conf. (MIKON). Poznan, Poland, 14–17 May 2018. IEEE, 2018, pp. 204–207. doi: 10.23919/MIKON.2018.8405178
16. Barkhatov A. V., Veremyev V. I., Vorobev E. N., Konovalov A. A., Kovalev D. A., Kutuzov V. M., Mikhailov V. N. *Passivnaya kogerentnaya radiolokaciya* [Passive Coherent Radar]. SPb, *Izd-vo SPbGETU "LETI"*, 2016, 163 p. (In Russ.)
17. Konovalov A. A. *Osnovy traektornoy obrabotki radiolokatsyonnoy informatsii* [Basic of the Radar Target Tracking]. Part II. SPb, *Izd-vo SPbGETU "LETI"*, 2014, 180 p. (In Russ.)

Information about the authors

Dao Van Luc, Specialist in Specialty "Radioelectronic systems and complexes" (2016), postgraduate student of Le Quy Don Technical University (Hanoi, Vietnam). The author of 2 scientific publications. Area of expertise: radiolocation; secondary and tertiary processing of radar information.

Экспериментальное исследование траекторных признаков для распознавания низколетящих малоскоростных радиолокационных целей в полуактивной РЛС
Experimental Study of Trajectory Features for the Recognition of Low-Flying Low-Speed Radar Targets Using Passive Coherent Radar Systems

Address: Le Quy Don Technical University, 236 Hoang Quoc Viet St., Bac Tu Liem, Ha Noi, Viet Nam
E-mail: daolucvtl01@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-8006-3076>

Aleksandr A. Kononov, Cand. Sci. (Eng.) (2015), Senior Researcher, Research Institute "Prognoz" St. Petersburg State Electrotechnical University. The author of 53 scientific publications. Area of expertise: secondary and tertiary processing of radar information; data fusion; multi-position radar; bistatic radio systems.

Address: Research Institute "Prognoz", 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: al_an_kon@mail.ru

Le Minh Hoang, Specialist in Specialty "Radioelectronic systems and complexes" (2017), postgraduate student of Le Quy Don Technical University (Hanoi, Vietnam). Area of expertise: radiolocation; secondary and tertiary processing of radar information.

Address: Le Quy Don Technical University, 236 Hoang Quoc Viet St., Bac Tu Liem, Ha Noi, Viet Nam
E-mail: lehoang.navy@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-8913-3296>
