

ОБЗОР ОТЛИЧИТЕЛЬНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ПРИЗНАКОВ МАЛОРАЗМЕРНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И ПТИЦ

А.С. ХРАМЕНКОВ, В. Г. ЧИГРЯЙ

Учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь»

(г. Минск, Республика Беларусь)

E-mail: Chigriay.valili@yandex.by

Аннотация. В докладе представлен обзор радиолокационных признаков малоразмерных беспилотных летательных аппаратов (БЛА) и птиц. Радиолокационные отличительные признаки были разделены на две основные группы: траекторные и сигнальные. В результате обзора была обобщена и систематизирована информация об особенностях радиолокационных признаков МБЛА и птиц. Результаты обзора могут быть использованы в качестве исходных данных для дальнейших исследований в интересах селекции МБЛА на фоне птиц, а также при разработке алгоритмов распознавания в современных радиолокаторах.

Abstract. This report provides an overview of the radar characteristics of small unmanned aerial vehicles (UAVs) and birds. The distinctive radar features were classified into two main groups: trajectory and signal characteristics. As a result of the review, information regarding the peculiarities of the radar characteristics of UAVs and birds was summarized and systematized. The findings of this review can serve as baseline data for further research aimed at distinguishing UAVs against the background of birds, as well as for the development of recognition algorithms in modern radar systems.

Введение

В настоящее время наблюдается интенсивное развитие класса малогабаритных беспилотных летательных аппаратов (МБЛА). МБЛА находят широкое применение в гражданских, промышленных и военных сферах, однако могут создавать потенциальные угрозы безопасности, проникая в зоны, где полеты несанкционированы или представляют риск для инфраструктуры и населения. Таким образом, с увеличением числа МБЛА растет потребность в надежных методах их обнаружения и распознавания. Одной из основных сложностей при классификации МБЛА является их схожесть с птицами по размерам, скорости и траектории полета [1]. Птицы могут создавать ложные срабатывания в системах обнаружения, затрудняя автоматическую классификацию и увеличивая нагрузку на оператора системы. В условиях ограниченной видимости и на больших расстояниях оптические и акустические системы теряют свою эффективность, что делает радиолокаторы наиболее подходящим инструментом для круглосуточного мониторинга таких объектов в любых погодных условиях [1].

Таким образом, актуальным является решение задачи радиолокационного распознавания МБЛА и птиц, а также обзора их отличительных признаков.

Постановка задачи

При решении задачи радиолокационного распознавания классификационные признаки объектов принято делить на сигнальные и траекторные [2]. На основании анализа как русскоязычных, так и зарубежных публикаций [1–18], можно сделать вывод, что основными отличительными радиолокационными признаками для селекции МБЛА и птиц являются траекторные признаки, а также спектральный и мощностной радиолокационные портреты (РЛП).

Траекторные признаки позволяют анализировать динамику движения объектов [2]. МБЛА, как правило, демонстрируют более прямолинейные и стабильные траектории полета, в то время как траектории птиц характеризуются значительной непредсказуемостью. В спектральном РЛП могут наблюдаться составляющие, обусловленные вращением пропеллеров МБЛА и движением крыльев птиц. Мощностной РЛП, в свою очередь, характеризует значение эффективной площади рассеяния (ЭПР) наблюдаемого объекта.

В интересах решения задачи распознавания МБЛА и птиц, с помощью радиолокатора могут быть выделены следующие сведения о наблюдаемом объекте:

- фильтрованные оценки прямоугольных координат цели: \hat{x} , \hat{y} , \hat{z} ;
- скорости цели по координатам: \hat{V}_x , \hat{V}_y , \hat{V}_z ;
- спектральный радиолокационный портрет: $\hat{\xi}$.

Целью доклада является обзор отличительных радиолокационных признаков МБЛА и птиц, которые могут быть выделены на основании имеющейся сигнальной и траекторной информации о наблюдаемом объекте.

Особенности траекторий МБЛА и птиц

По типу конструкции МБЛА могут быть разделены на две группы: МБЛА с вращающимся и фиксированным крылом. МБЛА с фиксированным крылом (МБЛА самолетного типа) в своей конструкции имеют одно или несколько крыльев, зафиксированных на корпусе для создания подъемной силы (рис. 1, а). Такие МБЛА характеризуются высокими аэродинамическими свойствами, высокой скоростью и дальностью полета. Недостатками МБЛА самолетного типа являются невысокие мобильность, маневренность и необходимость использования пусковых устройств. МБЛА с вращающимся крылом делятся на одновинтовые (МБЛА вертолетного типа, рис. 1, б) и многовинтовые (мультикоптеры, рис. 1, в).



Рис. 1. Внешний вид МБЛА (а – с фиксированным крылом, б – одновинтовой, в – мультикоптер)

Следует отметить, что наибольшее распространение получили МБЛА с четырьмя двигателями (квадрокоптеры), что обусловлено простотой и удобством их управления [16].

МБЛА совершают полеты со средней скоростью не более 50 м/с на высотах до 5000 м. Мультикоптеры при этом редко набирают высоту более 100 м, и их средняя скорость составляет порядка 20 м/с [16]. МБЛА осуществляют целенаправленные полеты по заранее заданной программе, поведение МБЛА во время полета мотивировано выполнением поставленных задач. При этом спектр задач, решаемых МБЛА, достаточно широк: ведение наземной и воздушной разведки, оценка результатов и корректировка огневого воздействия, доставка грузов, огневое поражение и т.д. Основными разведывательными задачами МБЛА являются: разведка в исполнительной зоне, барражирование в исполнительной зоне, облет заданной границы, выход в заданную точку и ее облет, поиск в указанном угловом секторе, поиск на заданном маршруте полета [17]. Такое многообразие задач требует от МБЛА совершение различных маневров. Траектории полета МБЛА являются сложными и зачастую хаотичными. Для описания траекторий МБЛА и птиц в любой момент времени необходимо рассматривать несколько моделей движения, например полеты: с постоянной скоростью, с постоянным ускорением, разворот в горизонтальной плоскости и разворот в трех плоскостях [18].

На режим полета МБЛА значительное влияние оказывают действия оператора. Методы управления МБЛА могут быть автономными, полуавтономными или управляемыми. Наличие в МБЛА гироскопов и акселерометров позволяют, при наличии внешних воздействий (порывы ветра, турбулентные потоки), обеспечить плавный полет. Таким образом, при одинаковых условиях полета траектория полета МБЛА будет характеризоваться меньшими флуктуациями, чем у птиц [16].

Основная масса птиц летает на высоте до 100 м. Чем выше, тем меньше птиц находится 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 птиц и скорости ветра. Поскольку птицы – живые существа, их полетное поведение очень сложное, траектория птицы имеет более случайный характер, чем МБЛА как по амплитуде, так и по направлению полета. Кинематика полета птицы в основном зависит от ее крыльев, которые помогают птице двигаться плавно и в определенные моменты создавать большое ускорение и резкое изменение всех параметров движения [16]. В зависимости от характера движения крыльев выделяются следующие виды полета: 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 [16]. При парении крылья не движутся; они вытянуты к телу под прямым углом. Скорость и угол планирования зависит от массы птицы, угла пикирования и формы крыльев.

Траекторные отличительные признаки

На основании имеющейся траекторной информации о наблюдаемом объекте могут быть выделены следующие отличительные радиолокационные признаки МБЛА и птиц:

1. Модуль вектора полной скорости V [7];
2. Среднее значение модуля вектора полной скорости \bar{V} и его среднеквадратическое отклонение σ_v [5];
3. Модуль полного ускорения a , среднее значение ускорения \bar{a} и среднеквадратическое отклонение σ_a [4,5];
4. Рывок j . Характеризует способность цели изменять ускорение за единицу времени [4];
5. Энергетическая высота H_e , скорость изменения энергетической высоты V_{H_e} [5].

Скорость, ускорение и рывок могут быть как положительными, так и отрицательными, что соответствует ускорению и замедлению объекта. На практике, как правило, используются их абсолютные значения;

6. Курсовой угол ψ указывает на то, как объект изменяет свое направление на радиолокатор в процессе полета. В процессе полета объект может совершать различные повороты, поэтому в качестве признаков распознавания целесообразно использовать среднее значение углов поворота $\bar{\psi}$ и среднеквадратическое отклонение σ_ψ [4].
7. Величины изменения угла курса $\Delta\psi$ и скорость поворота V_ψ ;
8. Кривизна траектории cur . Кривизна характеризует степень отклонения траектории от прямой линии. Кривизна прямой линии равна нулю. Кривизна рассчитывается с использованием трех последовательных точек траектории [4]. Решение о кривизне траектории, как правило, принимается на основании среднего значения cur [4];
9. Коэффициент маневренности M . Разные типы объектов демонстрируют различные изменения курса на различных скоростях. Объект обладает высокой маневренностью, если способен значительно изменять курс на высокой скорости [5]. Коэффициент маневренности описывает скорость движения цели при единичном отклонении курсового угла;
10. Коэффициент колебания, ζ . Коэффициент колебания дополняет коэффициент маневренности, поскольку учитывает не только абсолютное значение изменения угла курса, но и его направление [5];
11. Периодичность (частота) f . Данный параметр характеризует повторяемость значений параметров на участке траектории. Поскольку птицы в полете периодически машут крыльями для создания подъемной силы, совершают однообразные маневры, то будет наблюдаться однотипное изменение параметров (таких как колебание высоты, рывки скорости и т.д.), что является отличительным признаком птиц. Периодичность траектории может быть оценена с помощью быстрого преобразования Фурье за время наблюдения. Однако, для выделения периодичности необходимо точное измерение всех параметров движения [4].

Сигнальные отличительные признаки

Мощностной РЛП представляет собой мощность отраженного сигнала, которая является величиной пропорциональной ЭПР объекта σ_c [3]. В интересах повышения достоверности распознавания МБЛА и птиц могут использоваться средние значения ЭПР, полученные на согласованной и кросс-поляризациях [9].

Использование оценки ЭПР в качестве классификационного признака ограничено из-за наличия ряда негативных факторов, таких как флуктуации ЭПР в процессе наблюдения цели; необходимость достаточного времени наблюдения для достоверной оценки среднего значения ЭПР и др.

ЭПР характеризует лишь среднюю отражательную способность наблюдаемого объекта, в то время как более информативным при решении задачи радиолокационного распознавания МБЛА и птиц является спектральный (доплеровский) РЛП ξ . Спектральный РЛП представляет собой упорядоченную совокупность мощностей отраженного сигнала, относящихся к различным элементам разрешения по частоте [3].

Подъемная сила в МБЛА создается винтами, которые приводятся в движение двигателями (в большинстве случаев электрическими). Для примера у квадрокоптера два винта вращаются по часовой стрелке, а два других – против часовой. В режиме зависания, при отсутствии ветра, скорость вращения всех пропеллеров одинакова, что позволяет аппарату удерживаться в одной точке. Для вертикального движения квадрокоптера скорость вращения всех пропеллеров увеличивается или уменьшается одновременно, что приводит к изменению

высоты полета. Горизонтальное перемещение достигается за счет разницы скоростей между противоположными парами пропеллеров, что создает наклон и позволяет квадрокоптеру двигаться в заданном направлении [13].

При отражении непрерывного сигнала от МБЛА в спектральном РЛП наблюдаются планерная составляющая, обусловленная отражениями от корпуса, и составляющие, обусловленные отражениями от вращающихся винтов (эффект вторичной модуляции). При отражении сигнала от птиц возникает модуляция, обусловленная отражением от машущих крыльев. Частота взмахов крыльев для больших птиц (например, аист) составляет 1-3 Гц, а для средних – 5-10 Гц. При постоянном машущем полете одиночной птицы в структуре отраженного сигнала заметна периодическая последовательность модуляционных составляющих. В случае больших птиц частота взмахов крыльями составляет 7,2 Гц, для средних – 10,3 Гц. Размах амплитуды сигнала во время взмахов крыльями может изменяться в пределах 20 дБ. Разное сочетание видов полета приводит к сильным флуктуациям структуры отраженного сигнала.

На основании анализа спектрального РЛП могут быть выделены следующие признаки: ширина спектра планерной составляющей $\Delta f_{пл}$; ширина спектра вторичной модуляции (ВМ) $\Delta f_{вм}$; частота повторения спектральных составляющих, обусловленных наличием ВМ $F_{вм}$; число модуляционных составляющих $N_{вм}$ [6].

Ширина спектра планерной составляющей $\Delta f_{пл}$ зависит от конфигурации и размеров объекта. Ширина спектра ВМ $\Delta f_{вм}$ позволяет оценить наличие вращающихся элементов. Частота повторения модуляционных составляющих спектра ВМ одного двухлопастного винта, вращающегося с частотой f_v , определяется как: $F_{вм} = 2f_v$ [13]. Модуляционные составляющие, обусловленные отражениями от всех вращающихся винтов, могут перекрываться и оказывать взаимное влияние друг на друга, т.к. во время полета, скорости вращения этих винтов меняются в одинаковом диапазоне, а при определенных режимах полета могут и вовсе совпадать. Кроме того, в качестве классификационных признаков может использоваться информация о количестве модуляционных составляющих спектра $N_{вм}$.

В качестве классификационного признака может использоваться коэффициент энергии цели R_σ [8]:

$$R_\sigma = \frac{\hat{\sigma}_{пл}^2}{\hat{\sigma}_{вм}^2}, \quad (1)$$

где $\hat{\sigma}_{пл}^2$ – оценка мощности планерной составляющей в спектральном РЛП;

$\hat{\sigma}_{вм}^2$ – оценка мощности спектральных составляющих, обусловленных наличием вторичной модуляции.

Коэффициент энергии цели характеризует вклад модуляционных составляющих в численное значение средней ЭПР цели. При решении задачи классификации используются его среднее значение и дисперсия.

В процессе полета флуктуации спектрального радиолокационного портрета МБЛА значительно ниже, по сравнению с птицами. Оценка количественной меры флуктуаций может производиться на основании анализа совокупности спектральных РЛП, полученных последовательно во времени (спектрограмм) [7]. В исследованиях [14, 15] было отмечено, что анализ спектрального РЛП МБЛА с пластиковыми пропеллерами затруднен на дальностях более 500 метров. Это связано с низкой отражательной способностью пластиковых материалов: на спектрограммах удается выделить лишь отражение от корпуса, тогда как компоненты, связанные с движением пропеллеров, становятся практически невидимыми. В результате выделение характерных сигнальных признаков, отличающих МБЛА от птиц, в таких условиях оказывается невозможным.

Заключение

В докладе проведен обзор радиолокационных признаков распознавания МБЛА и птиц. Обзор радиолокационных признаков (траекторных и сигнальных), показал, что МБЛА и птицы обладают как схожими, так и уникальными особенностями, позволяющими использовать радиолокационные методы для их классификации. Траектории движения МБЛА, как правило, более предсказуемы и стабильны по сравнению с траекториями птиц, что связано с управляемостью и устойчивостью дронов к внешним воздействиям. Напротив, движения птиц более хаотичны и подвержены природным факторам, таким как ветер и течение воздуха, что вносит уникальные вариации в их радиолокационные профили.

Анализ спектрального РЛП подтвердил важность использования микродоплеровских характеристик. Эти признаки дают более глубокое понимание особенностей объектов за счет отражений от движущихся элементов, например, пропеллеров дронов или крыльев птиц. Важно отметить, что спектральный РЛП МБЛА с пластиковыми пропеллерами становится трудно интерпретировать на дальностях более 500 метров из-за слабой отражательной способности этих материалов, что делает выделение сигнальных признаков неэффективным.

Таким образом, полученные результаты могут быть полезны для разработки алгоритмов автоматического распознавания МБЛА и птиц в современных радиолокационных системах, способных снизить количество ложных тревог. Эти выводы также могут послужить основой для дальнейших исследований в области совершенствования методов радиолокационного распознавания и улучшения точности классификации в режиме реального времени.

Список использованных источников

1. Пальгуев, Д.А. Распознавание воздушных объектов типа «птицы» по траекторным признакам/ Д.А. Пальгуев, В.В. Пархачев, К.Н. Пиунов и др. // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2022. – №. 4. – С. 39-50
2. Tait, P. Introduction to Radar Target Recognition / P. Tait. London: IET, 2005. – 428 p.
3. Ширман, Я.Д. Методы радиолокационного распознавания и их моделирование / Я.Д. Ширман, С.А. Горшков, С.П. Лещенко, Г.Д. Братченко 113 и др. // Радиолокация и радиометрия, №3, Радиолокационное распознавание и методы математического моделирования. – 2000. – С.5–64.
4. Srigrarom, S., Drone versus Bird Flights: Classification by Trajectories Characterization / S. Srigrarom, K. Hoe Chew, D. Meng Da Lee, P. Ratsamee// in 59th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE), Thailand, Chiang Mai, 23-26 September 2020. – P. 343 – 348.
5. Liu, J Classification of bird and drone targets based on motion characteristics and random forest model using surveillance radardata /J. Liu, Q. Y. Xu, W. S. Chen //IEEE Access. – 2017. – Vol. 20. – P. 1 –18.
6. Leonardi, M. Drones Classification by the Use of a Multifunctional Radar and Micro-Doppler Analysis / M. Leonardi, G. Ligresti, E. Piracci // Drones. – 2022. – Vol. 6, 124. – 19 p. <https://doi.org/10.3390/drones6050124>.
7. Se-Won, Y. Efficient Classification of Birds and Drones Considering Real Observation Scenarios Using FMCW Radar / Y. Se-Won, K. Soo-Bum, J. Joo-Ho // Journal Engineering And Science – Sep. 2021. – Vol. 21. – № 4. – P. 270 –281 Of Electromagnetic.
8. Duan, J., Classification of birds and drones by exploiting periodical motions in Doppler spectrum series /J. Duan, L. Zhang, Y. Wu // Journal of Systems Engineering and Electronics. – Vol. 34. – № 1. – February 2023. – pp.19 – 27.
9. Torvik, B. Classification of birds and UAVs based on radar polarimetry / B.Torvik, K.Olsen, H.Griffiths. // IEEE Geo-science and Remote Sensing Letters. – 2016. – 13(9). – P. 1305–1309.
10. Gong, J. Interference of Radar Detection of Drones by Birds / Jiangkun Gong, Jun Yan, Deren Li, Deyong Kong, Huiping Hu // Progress In Electromagnetics Research. – 2019. – Vol. 81. – P. 1–11.
11. Кузьмин, С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации. Москва: Радио и связь.1986. – 352 с.
12. Chan, J. J. X. Small flying object classifications based on trajectories and support vector machines/ J.J.X. Chan, S. Srigrarom et al //Journal of Robotics and Mechatronics. – 2021. – Т. 33. – №. 2. – С. 329-338.
13. Peto, T. The Radar Cross Section of small propellers on Unmanned Aerial Vehicles / T. Peto, S. Bilicz, L. Szucs, S. Gyimothy et al. // 10th European Conf. on Antennas and Propagation, Davos, Switzerland, 10-15 April 2016. – pp. 1– 4. Doi: 10.1109/EuCAP.2016.7481645.
14. Петров, И.И. Алгоритм распознавания малоразмерных воздушных объектов на основе анализа радиолокационных спектральных портретов/ И.И. Петров и др. //Т-Comm-Телекоммуникации и Транспорт. – 2022. – Т. 16. – №. 3. – С. 4-10.
15. Воробьев, Е. Н. Распознавание воздушных целей в пассивном когерентном локаторе: дис. канд. тех. наук / Е. Н. Воробьев. – СПб ГЭТУ «ЛЭТИ», 2022. – 120с.
16. Лук, Д. В. Распознавание низколетящих малоскоростных радиолокационных целей по траекторным признакам: дис. канд. тех. наук / Д.В. Лук. – СПб ГЭТУ «ЛЭТИ», 2024. – 112с.
17. Донсков, Ю.Е. Способы применения беспилотных летательных аппаратов радиотехнической разведки в ходе ведения боевых действий в тактической зоне / Ю.Е. Донсков, А.В. Богославский, Д.С. Матвеев // Военная мысль, 2021. – №8. – С. 64–70
18. Mehta, V. Tracking and Classification of Drones and Birds at a Far Distance Using Radar Data/ V. Mehta, M. Bolic1, I. Mantegh, C. Vidal // NATO specialists’ meeting on drone detectability: modelling the relevant signature. – 29 April 2021.– pp. 14-1–15-10.