



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-2-65-73>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 534.23; 629.7

СИНТЕЗ АЛГОРИТМА ОБНАРУЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПО АКУСТИЧЕСКИМ ШУМАМ

А.Д. ПУЗАНОВ, Д.С. НЕФЁДОВ

Военная академия Республики Беларусь» (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 25 января 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. В статье синтезирован алгоритм обнаружения акустического шума беспилотного летательного аппарата (БЛА) на фоне шумов, обусловленных ветром. Синтез алгоритма выполнен по критерию Неймана – Пирсона. Алгоритм предполагает сочетание этапов когерентной компенсации шума ветра с когерентным накоплением импульсов звукового давления акустического шума БЛА. Время когерентного накопления соответствует удвоенному времени корреляции флуктуаций, полученному в результате проведения экспериментальных исследований акустических шумов различных типов БЛА. Эффективность разработанного алгоритма обнаружения БЛА зависит от скорости полета, ракурса, количества лопастей и оборотов винта (винтов) БЛА, а также погодных условий. Для значения вероятности ложной тревоги 10^{-4} синтезированный алгоритм обнаружения обеспечивает вероятность правильного обнаружения БЛА 0,9 при отношении сигнал/шум 8 дБ, что соответствует дальности обнаружения БЛА 200...300 м. Полученные результаты позволяют говорить о перспективности применения акустических систем обнаружения БЛА.

Ключевые слова: акустическая система обнаружения, акустический шум, беспилотный летательный аппарат, дальность обнаружения.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Пузанов А.Д., Нефёдов Д.С. Синтез алгоритма обнаружения беспилотных летательных аппаратов по акустическим шумам. Доклады БГУИР. 2021; 19(2): 65-73.

SYNTHESIS OF ALGORITHM OF UNMANNED AERIAL VEHICLE DETECTION BY ACOUSTIC NOISE

ALIAKSANDR D. PUZANAU, DENIS S. NEFEDOV

Military Academy of the Republic of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 25 January 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. The algorithm of detection of acoustic noise provided by an unmanned aerial vehicle (UAV) in the noise background due to wind is synthesized in the article. Creation of the algorithm has been carried out using the Neyman – Pearson lemma. The algorithm assumes a combination of the stages of wind noise coherent compensation and coherent accumulation of UAV's acoustic noise sound pressure impulses. The coherent accumulation time matches doubled time of fluctuation correlation resulted by experimental research of acoustic noise of different types of UAVs. Efficiency of the developed algorithm of UAV detection depends on flight velocity, foreshortening, amount of blades and rotor turnovers of UAV as well as weather conditions. For the probability of a false alarm value of 10^{-4} , the probability of correct UAV detection value of 0.9 is provided wherein signal-to-noise ratio has a value of 8 dB. These indicators correspond the detection range of 200 to 300 meters. The obtained results allow discussions about perspective of acoustic UAVs detection systems adaptation.

Keywords: acoustic detection system, acoustic noise, unmanned aerial vehicle, detection range.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Puzanau A.D, Nefedov D.S. Synthesis of algorithm of unmanned aerial vehicle detection by acoustic noise. Doklady BGUIR. 2021; 19(2): 65-73.

Введение

Для обнаружения маловысотных винтовых беспилотных летательных аппаратов (БЛА) наибольшее распространение получили радиолокационные и оптикоэлектронные средства. Влияние подстилающей поверхности, неоднородность фона, малые геометрические размеры и низкая скорость полета БЛА ограничивают эффективность указанных средств обнаружения. Кроме того, существующие радиолокационные средства имеют ограниченную минимальную дальностью обнаружения 200...300 м. Расширить возможности системы разведки БЛА, особенно на предельно малых высотах и малых дальностях, позволяет включение в ее состав акустического устройства обнаружения. Малая дальность обнаружения БЛА акустическими средствами компенсируется пассивным режимом работы, возможностью функционирования в сложной электромагнитной обстановке и плохой видимости.

Целью данной статьи является синтез оптимального (квазиоптимального) алгоритма обнаружения маловысотных БЛА по акустическим шумам (АШ). Для достижения поставленной цели использована математическая модель АШ БЛА, разработанная авторами в [1, 2]. Предложенная модель учитывает корреляционные свойства АШ БЛА, ориентацию БЛА в пространстве, характеристики и параметры приемной аппаратуры (акустических микрофонов (АМ)). Учет данных параметров позволил определить время когерентного накопления принятых АШ и количество каналов обработки.

Постановка задачи и описание входных воздействий

На входе устройства акустического обнаружения БЛА наблюдается реализация случайного сигнала, зарегистрированного приемным АМ. Принятая реализация сигнала представляет собой совокупность внешних АШ и внутреннего шума приемной аппаратуры

при условии отсутствия или наличия АШ, создаваемого БЛА. Необходимо синтезировать оптимальный алгоритм обработки принятой реализации сигнала, на выходе которого принимается решение о наличии либо отсутствии БЛА в пространстве наблюдения (элементе разрешения).

Совокупность внешних АШ и внутреннего шума приемной аппаратуры при отсутствии АШ, создаваемого БЛА, в дискретном представлении описывается многомерной плотностью вероятности вида [3]

$$p_0(\xi) = \left[(2\pi)^N \text{Det} \|R_{kn}^h\| \right]^{-1} \exp \left(- \sum_{k,n} Q_{kn}^h \xi_k^* \xi_n \right), \quad (1)$$

где N – количество отсчетов принятой реализации случайного сигнала за время наблюдения T_N ; $\|R_{kn}^h\|$ – корреляционная матрица принятой реализации случайного сигнала при условии отсутствия АШ, создаваемого БЛА; $R_{kn}^h = \{\overline{\xi_k \xi_n^*}\}, k, n = \overline{1, N}$; $\|Q_{kn}^h\|$ – матрица, обратная корреляционной матрице $\|R_{kn}^h\|$; ξ_n – n -й дискретный отсчет принятой реализации случайного сигнала, зарегистрированного приемным АМ.

При отсутствии источников посторонних АШ, к которым в случае обнаружения БЛА отнесем разговорную речь, звуки птиц, работу двигательных установок и др., в качестве внешних АШ рассматривается только шум ветра, возникающий в результате удара воздушных потоков порывов ветра о твердые края АМ, создающих завихрения.

Акустический шум ветра является коррелированным и включает быстрые и медленные флуктуации скорости ветра (БФСВ и МФСВ) [3]. Условием разделения на медленные и быстрые флуктуации является $\tau_{кБФСВ} < \tau_{кМФСВ}$ (рис 1, а). Вид автокорреляционной функции и энергетического спектра (ЭС) БФСВ и МФСВ представлены на рис. 1.

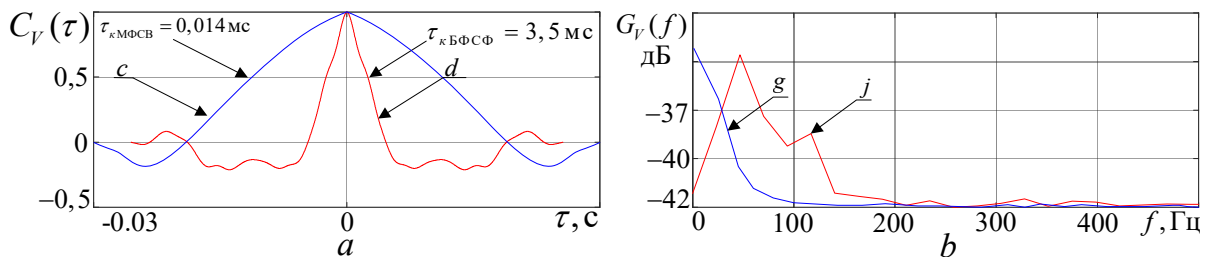


Рис. 1. Спектрально-временные характеристики АШ ветра: *a* – АКФ; *b* – ЭС; *c* – АКФ МФСВ; *d* – АКФ БФСВ; *g* – ЭС МФСВ; *j* – ЭС БФСВ
Fig. 1. Spectral-temporal characteristics of wind acoustic noise: *a* – ACF; *b* – PS; *c* – ACF SFWS; *d* – ACF FFWS; *g* – PS SFWS; *j* – PS FFWS

Анализируя рис. 1, *b*, можно сделать вывод, что основная мощность шума МФСВ сконцентрирована в диапазоне частот 0...50 Гц, а БФСВ – 0...150 Гц. Ширина ЭС обратно пропорциональна удвоенному времени корреляции флуктуаций.

Акустические шумы, создаваемые БЛА, с высокой степенью достоверности могут быть представлены флуктуирующей последовательностью треугольных импульсов с единичной скважностью, временная структура которой описывается выражением [1, 2]

$$U_{BLA} \left(\begin{matrix} t, N_V, N_L, \\ \theta, \phi, \psi, \varphi, \vartheta \end{matrix} \right) = \begin{cases} F(\theta, \phi) \sum_{i=1}^{N_V} \left\{ P_{vij}(t) \sum_{j=1}^{N_L} U_L \left[(t - t_{zvi}(\psi, \varphi, \vartheta))(j-1) T_{Pvi}(t) \right] \right\}, & 0 \leq t \leq T_N; \\ 0, & t > T_N, \end{cases} \quad (2)$$

где $F(\theta, \phi)$ – значение функции направленности приемного микрофона в направлении θ, ϕ , мВ/Па; θ – азимут БЛА относительно пункта приема, град; ϕ – угол места БЛА относительно пункта приема, град; $i = \overline{1, N_V}$; N_V – количество винтов БЛА; $j = \overline{1, N_L}$; N_L – количество

лопастей винта БЛА; $P_{Vij}(t)$ – случайная амплитуда звукового давления i -го винта БЛА с j -м количеством лопастей, Па; $U_L(t)$ – закон модуляции АШ одного оборота лопасти винта БЛА; $t_{zv_i}(\psi, \varphi, \vartheta)$ – время задержки прихода звука i -го винта БЛА, с; ψ, φ, ϑ – угол рысканья, тангажа и крена БЛА соответственно, град; $T_{PVi}(t)$ – случайный период повторения импульсов звукового давления, создаваемых i -м винтом с N_L количеством лопастей, с; T_N – время наблюдения, с.

В модели входного воздействия (2) учтены только АШ винтов БЛА, которые, согласно [1, 2], должны включать также АШ асинхронных электродвигателей (АЭД). Такое допущение принято для упрощения задачи обнаружения исходя из низкого уровня шумов АЭД, которые на дальностях менее 50 м значительно ниже уровня других источников шума. Вместе с этим АШ АЭД может быть использован в качестве одного из информативных признаков для решения задачи распознавания БЛА по АШ. На рис. 2 представлены АКФ и ЭС АШ БЛА.

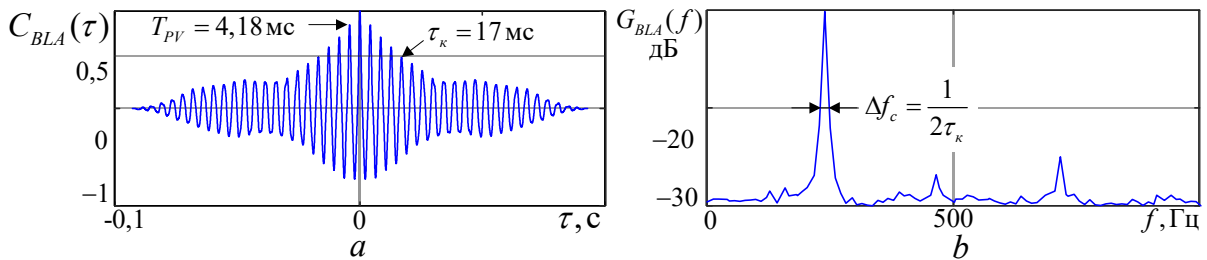


Рис. 2. Спектрально-временные характеристики АШ БЛА DJI Phantom 4 Pro: а – АКФ; б – ЭС
Fig. 2. Spectral-temporal characteristics of AN UAV : a – ACF; b – PS

Многомерную плотность вероятности принятого сигнала при условии наличия АШ, создаваемого БЛА, с высокой долей вероятности ($\sim 0,9$) [2] можно считать нормальной. Выражение для многомерной плотности вероятности принятого сигнала при условии наличия АШ, создаваемого БЛА, имеет вид

$$p_1(\xi) = \left[(2\pi)^N \text{Det} \| R_{kn}^{h+c} \| \right]^{-1} \exp \left(- \sum_{k,n} Q_{kn}^{h+c} \xi_k^* \xi_n \right), \quad (3)$$

где $\| Q_{kn}^{h+c} \|$ – матрица, обратная корреляционной матрице $\| R_{kn}^{h+c} \|$; $\| R_{kn}^{h+c} \|$ – корреляционная матрица принятой реализации случайного полезного сигнала (АШ БЛА) при условии наличия некоррелированного «белого» шума, элементы которой равны [4]:

$$R_{kn}^{h+c}(\theta, \phi, N_V, \psi, \varphi, \vartheta) = F(\theta, \phi) \sum_{i=1}^{N_V} M(P_{Vi})^2 r_{kni}^c U_L \left[(t - t_{zv_i}(\psi, \varphi, \vartheta)) (N_L - 1) T_{PVi} \right], k, n = \overline{1, N}, \quad (4)$$

где $r_{kni}^c = r_{ci} \left[(k - n) \Delta t \right]$ – элементы нормированной корреляционной матрицы флуктуаций АШ БЛА i -го винта; $r_{ci} = e^{-T_{PVi}/\tau_c}$ – коэффициент корреляции соседних значений огибающей АШ БЛА i -го винта; $M(P_V) = f_V N_L / V_{zv} r_{BLA} v(f_V) | -F_V \cos \phi + V_{zv} M_{kr} / 2\pi f_V r_V | J_{N_L} (2\pi f_V r_V N_L \sin \phi / V_{zv})$ – математическое ожидание случайной амплитуды звукового давления i -го винта с N_L количеством лопастей, Па, определяется согласно выражению [1], град; v – коэффициент затухания звука в атмосфере, дБ/м; r_V – эффективный радиус винта, м; r_{BLA} – расстояние между БЛА и пунктом приема, м; F_V – тяга винта, Н; V_{zv} – скорость распространения звука, м/с; M_{kr} – крутящий момент винта, Н·м.

Комплект априорных данных, представленных выражениями (1)–(4), является полным для синтеза устройства обнаружения маловысотных БЛА по АШ.

Разработка алгоритма обнаружения акустического шума маловысотных винтовых БЛА

Для принятия решения о наличии БЛА необходимо сформировать отношение правдоподобия и сравнить его с порогом [4]:

$$\Lambda(\xi) = p_1(\xi)/p_0(\xi) = \text{Det}\|R_{kn}^h\|/\text{Det}\|R_{kn}^{h+c}\| \exp\left[\sum_{k,n=1}^N (Q_{kn}^h - Q_{kn}^{h+c})\xi_k^*\xi_n\right] \geq \Lambda_*(F), \quad (5)$$

где $\Lambda_*(F)$ – порог обнаружения, сформированный по критерию Неймана – Пирсона для фиксированной вероятности ложной тревоги F [4].

Решение об обнаружении можно принимать на основании сравнения с порогом логарифма отношения правдоподобия (5). В этом случае оптимальное правило принятия решения об обнаружения БЛА имеет вид [4]:

$$\text{если } Z = \sum_{k,n=1}^N (Q_{kn}^h - Q_{kn}^{h+c})\xi_k^*\xi_n \geq Z_*, \text{ то } A_1^*, \text{ иначе } A_0^*, \quad (6)$$

где Z_* – порог решения; A_1^* , A_0^* – решения при наличии и отсутствии БЛА.

Обработку принятой реализации сигнала для получения выходной статистики Z можно разделить на этапы декорреляции фона и выделения полезного сигнала [4]. Этап декорреляции фона выполняется устройством, квадрат амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) которого $|K_1(f)|^2$ обратно пропорционален ЭС помехи [4]:

$$|K_1(f)|^2 = 1/G_r(f). \quad (7)$$

Для энергетического спектра АШ, представленного на рисунке 1, б, декорреляция фона может быть выполнена фильтром высоких частот с зоной режекции в области 0...120 Гц. Примечательно, что примерно такой АЧХ обладают современные АМ, предназначенные для работы на открытой местности. Частотной избирательности микрофонов добиваются выбором параметров элементов преобразования звукового давления в напряжение, а также применением специальных ветрозащитных устройств (выполняющих роль своеобразного фильтра), которые тормозят ветер перед АМ, препятствуя ударению воздуха о его прочные стенки, и никак не влияют на частоту и амплитуду полезного сигнала. В качестве примера на рис. 3 представлена АЧХ микрофона Rode NTG-5 (информация взята из технического описания изделия, согласно электронного ресурса <https://www.ode.com/microphones/ntg5>).

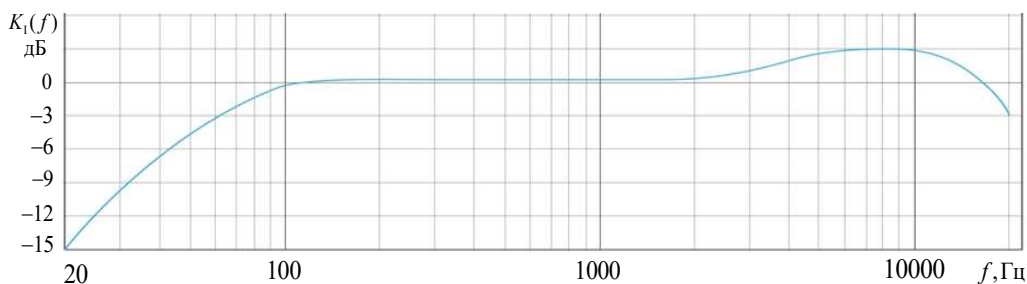


Рис. 3. Частотная характеристика акустического микрофона типа Rode NTG 5

Fig. 3. Frequency response of acoustic microphone type Rode NTG 5

Этап выделения полезного сигнала на декоррелированном фоне реализуется фильтром, импульсная характеристика которого согласована с ожидаемым полезным сигналом. Алгоритм обработки выходного сигнала устройства декорреляции фона с импульсными характеристиками (ИХ) устройства выделения полезного сигнала (УВПС) на выходе УВПС описывается выражением [4]

$$Z_m = \left| \sum_{n=1}^N \xi_n h_{m-n} \right|^2, \quad (8)$$

где $h_n, n = \overline{1, N}$ – дискретные отсчеты ИХ фильтра УВПС.

Фильтровая обработка в УВПС есть не что иное как когерентное накопление импульсов АШ, создаваемого БЛА на интервале T_{kn} . Интервал (время) когерентного накопления T_{kn} определяется шириной зубца АЧС флуктуаций Δf_c (рис 2, b) [2].

Проведенные авторами статьи экспериментальные исследования показали, что ширина зубца ЭС АШ для различных типов БЛА составляет 10...40 Гц. Ширина зубца ЭС зависит от времени корреляции флуктуаций АШ и количества винтов БЛА. Ширина гармоник ЭС АШ четырехвинтового БЛА примерно в два раза превосходит ширину гармоник ЭС АШ одновинтового БЛА, что обусловлено влиянием флуктуаций параметров акустического шума пары винтов [2].

Поскольку значение периода повторения импульсов T_{pv} АШ БЛА априорно неизвестно, от оптимального алгоритма выделения полезного сигнала можно перейти к квазиоптимальному многоканальному алгоритму вида

$$Z_{1m}^i = \left| \sum_{n=0}^{N-1} \xi_n h_{m-n}^{T_{pv i}} \right|^2, \quad (9)$$

где i – номер канала обработки; $h_{m-n}^{T_{pv i}}$ – дискретные отсчеты ИХ фильтра УВПС, настроенного на ожидаемый априорно неизвестный период повторения $T_{pv i}$, в i -м канале обработки.

В частотной области это эквивалентно использованию набора фильтров УВПС, АЧХ которых рассогласованы между собой на частоту ΔF_{II} и перекрывают возможный диапазон частот гармоник ЭС АШ БЛА. Количество каналов УВПС определяется рассогласованием ΔF_{II} и диапазоном значений частот гармоник ЭС АШ БЛА, который зависит от количества оборотов винта (винтов) и скорости полета БЛА. Для современных БЛА указанный диапазон частот составляет 150...500 Гц [2].

Потенциальная эффективность УВПС v_{kn} может быть рассчитана по выражению [4]

$$v_{kn} = (N_{ob} N_L) (V_{zv} \pm 2V_{BLA}) / \Delta F_{II} V_{zv}, \quad (10)$$

где V_{zv} – скорость распространения звуковой волны; V_{BLA} – скорость полета БЛА; N_{ob} – количество оборотов винта БЛА; $\Delta F_{II} = \Delta f_c$ – ширина зубца АЧХ фильтра.

Как видно из выражения (10) эффективность УВПС зависит от скорости полета, скорости звука, количества оборотов и числа лопастей винта (винтов) БЛА, ширины зубца ЭС флуктуаций и за время полета может изменяться. Структурная схема устройства обнаружения БЛА по АШ, реализующая алгоритмы (6), (7), (9), представлена на рис. 4.

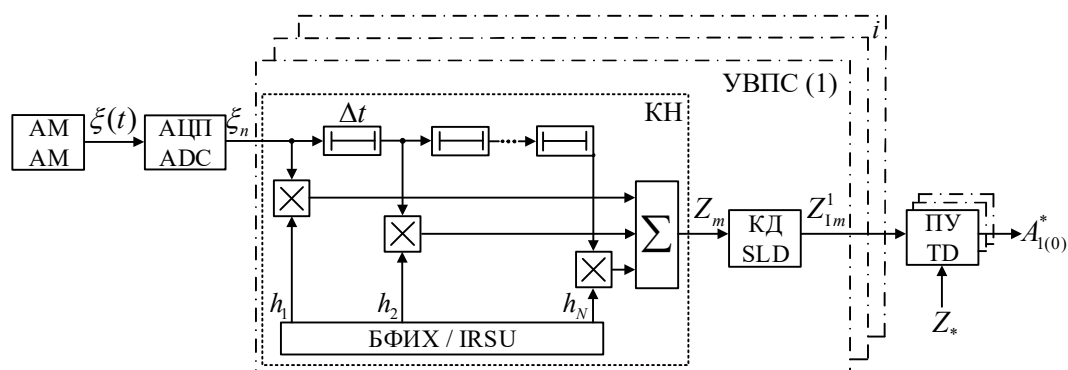


Рис. 4. Структурная схема разработанного устройства: АМ – акустический микрофон; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; КД – квадратичный детектор; ПУ – пороговое устройство; БФИХ – блок формирования импульсной характеристики

Fig. 4. Block diagram of the developed device: AM – acoustic microphone; ADC – analog to digital converter; SLD – square-law detector; TD – threshold device; IRSU – impulse response shaping unit

Акустический микрофон осуществляет преобразование АШ в напряжение и его декорреляцию. После этапа декорреляции и преобразования в цифровые отсчеты с помощью АЦП принятая реализация сигнала поступает на многоканальное УВПС. В каждом канале УВПС производится свертка отсчетов принятой реализации с отсчетами ИХ фильтра, настроенного на конкретное значение периода повторения АШ БЛА. Результат свертки после квадратичного детектирования сравнивается с порогом обнаружения. В случае превышения порога хотя бы в одном ПУ формируется решение об обнаружении БЛА.

Оценка эффективности разработанного алгоритма обнаружения БЛА

Эффективность разработанного алгоритма обнаружения можно охарактеризовать зависимостью вероятности правильного обнаружения от отношения сигнал/шум на выходе КД [4] (характеристика обнаружения), а также реализуемой дальностью обнаружения БЛА.

Характеристика обнаружения определяется законом распределения случайной величины на выходе УВПС. Для разработанного УВПС с учетом нормального распределения входной реализации выходная статистика имеет экспоненциальный закон распределения [4]. Для экспоненциального закона распределения характеристика обнаружения определяется по выражению

$$D = F^{1/1+\mu\nu_{kn}}, \quad (11)$$

где $F = \exp(-Z_*/\bar{Z}_0)$; \bar{Z}_0 – среднее значение мощности шума на выходе устройства обработки; μ – отношение сигнал/шум на выходе устройства декорреляции фона.

На рис. 5 представлены характеристики обнаружения, полученные теоретически с использованием выражения (11) и методом математического моделирования для следующих исходных данных: $\nu_{kn}=1$; $N_{ob}=105,55$ об/с; $N_L=2$; $V_{BLA}=20$ м/с; $V_{zv}=330$ м/с; $\Delta f_c=21$ Гц, при этом считается, что БЛА приближается по прямолинейной траектории к АМ.

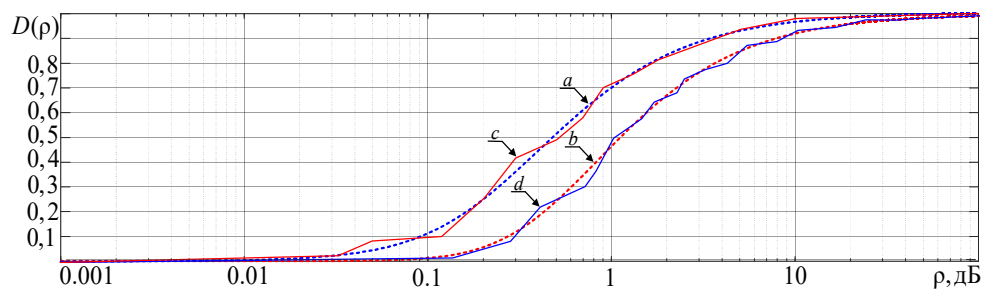


Рис. 5. Характеристики обнаружения разработанного устройства:

a, b – теоретическая кривая для $F_a=10^{-2}$, $F_b=10^{-4}$ соответственно;

c, d – результат математического моделирования для $F_c=10^{-2}$, $F_d=10^{-4}$ соответственно

Fig. 5. Detection characteristics of the developed device:

a, b – theoretical line for $F_a=10^{-2}$, $F_b=10^{-4}$ respectively;

c, d – the result of mathematical modeling for $F_c=10^{-2}$, $F_d=10^{-4}$ respectively

Как видно из рис. 5 для значений вероятности ложной тревоги 10^{-2} и 10^{-4} вероятность правильного обнаружения 0,9 достигается при значениях отношения сигнал/шум 4 и 8 дБ соответственно.

Оценка дальности обнаружения является обратной задачей к задаче определения отношения сигнал / шум, требуемого для обеспечения заданной вероятности правильного обнаружения при фиксированной вероятности ложной тревоги. Выражение для дальности обнаружения БЛА по АШ в зависимости от отношения сигнал/шум на выходе УВПС имеет вид [5]

$$R_{obn} = \sqrt{P_s G \nu_{kn} k_m / 10^{\frac{L_m}{20}} P_0 \alpha \mu(D, F)}, \quad (12)$$

где P_s – звуковое давление акустического шума, создаваемого винтами вращения БЛА, на расстоянии 1 м от акустического микрофона, Па; G – коэффициент направленного действия АМ; k_m – чувствительность АМ, мВ/Па; L_m – эквивалентный уровень собственных шумов АМ, дБ; P_0 – пороговый уровень слышимости, Па; a – коэффициент затухания звуковой волны в атмосфере, дБ/км.

На рис. 6 представлены зависимости дальности обнаружения, от интенсивности звукового давления P_s , создаваемого БЛА, для различных значений вероятности правильного обнаружения при вероятности ложной тревоги $F = 10^{-4}$. Кривые на рис. 6 получены для БЛА типа DJI Phantom 4 Pro и исходных данных, представленных в табл. 1.

Как видно из рис. 6, при уровне звукового давления АШ БЛА 70...75 дБ, характерного для малоразмерных БЛА коммерческого использования (типа DJI Phantom 4 Pro, Mavic и т. п.), дальность обнаружения составляет порядка 250...350 м.

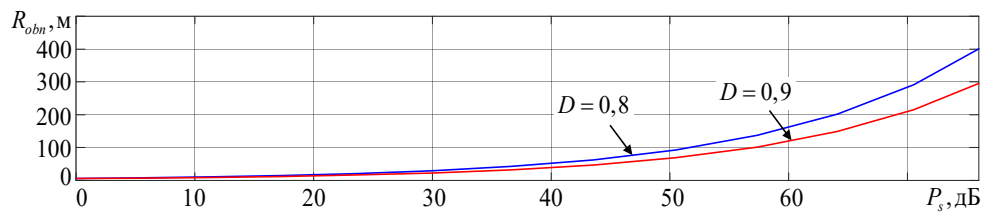


Рис. 6. Зависимости дальности обнаружения БЛА от интенсивности звукового давления
Fig. 6. Dependences of the detection range of an unmanned aerial vehicle on the intensity of sound pressure

Таблица 1. Исходные данные для расчета дальности обнаружения
Table 1. Initial data for calculating the detection range

Параметр	N_V	N_L	k_m , мВ/Па	L_m , дБ	G	$\nu_{кш}$	P_s , дБ	μ	P_0 , Па	a , дБ/км
Значение	4	2	66	10	1,25	11	0...75	0,4, 0,8	$2 \cdot 10^{-5}$	1,22

Заключение

Разработан алгоритм обнаружения БЛА по АШ, в соответствии с которым обработка принятой реализации сигнала включает этап декорреляции фона и выделения полезного сигнала. Декорреляция фона осуществляется АМ с АЧХ, обратной к ЭС АШ ветра. Полезный сигнал выделяется УВПС, реализующим свертку и квадратичное детектирование дискретных отсчетов, принятых АШ с отсчетами ИХ фильтра. Форма ИХ фильтра согласована с формой ожидаемого полезного сигнала.

Ввиду отсутствия априорных сведений о скорости полета БЛА $V_{БЛА}$, периода повторения импульсов T_{PV} (количества оборотов винта (винтов), лопастей) в пачке принятого АШ за время T_N , УВПС является многоканальным. Отличие времени корреляции флуктуаций АШ τ_c различных типов БЛА приводит к необходимости выбора квазиоптимального времени когерентного накопления T_m импульсов пачки АШ БЛА. Обоснованию выбора указанных параметров будет посвящена отдельная статья.

Разработанный алгоритм обнаружения позволяет обнаруживать маловысотные винтовые БЛА на дальностях до 250...400 м. Дальность обнаружения зависит от скорости полета, ракурса, количества винтов БЛА, линейных размеров лопастей, погодных условий, чувствительности АМ и характеристики его диаграммы направленности. Учет корреляционных характеристик АШ БЛА различных типов, позволяет определить структуру оптимального (квазиоптимального) фильтра (фильтров) когерентного накопления, вследствие чего повысить дальность автоматического обнаружения.

Список литературы

1. Пузанов А.Д., Нефёдов Д.С. Математическая модель временной структуры акустического шума беспилотного летательного аппарата. *Наука и военная безопасность*. 2020;1(63):32-36.

2. Пузанов А.Д., Нефёдов Д.С. Результаты экспериментальных исследований спектрально-временных характеристик акустических шумов беспилотных летательных аппаратов. *Наука и военная безопасность*. 2020;4(66):19-24.
3. Быков Р.В. *Статистический синтез акустических корреляционно-базовых устройств обнаружения – селекции для артиллерийского звукометрического вооружения*: дис. ...канд. техн. наук. Минск; 2008.
4. Охрименко А.Е. *Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба*. Минск: Воениздат; 1983.
5. Пузанов А.Д., Нефёдов Д.С. Оценка дальности обнаружения беспилотных летательных аппаратов акустической системой пассивной локации. *Milex Innovations*. 2019;133:63-66.

References

1. Puzanau A.D., Nefedov D.S. [Mathematic model of the temporal structure of the acoustic noise of an unmanned aerial vehicle]. *Nauka i voennaya bezopasnost'*. 2020;1(63):32-36. (In Russ.)
2. Puzanau A.D., Nefedov D.S. [Result of experimental studies of the spectral-temporal characteristics of acoustic noise from unmanned aerial vehicles]. *Nauka i voennaya bezopasnost'*. 2020;4(66):19-24. (In Russ.)
3. Bykov R.V. [*Statistical synthesis of acoustic correlation-basic detection devices – selection for artillery sound-metric weapons: dis. ...kand. tekhn. nauk*]. Minsk; 2008. (In Russ.)
4. Ohrimenko A.E. [*Radar basics and electronic warfare*]. Minsk: Voenizdat; 1983. (In Russ.)
5. Puzanau A.D., Nefedov D.S. [Assessment of the detection range of unmanned aerial vehicles by the acoustic passive location system]. *Milex Innovations*. 2019;133:63-66. (In Russ.)

Вклад авторов

Пузанов А.Д. произвел синтез алгоритма обнаружения БЛА по АШ и оценку эффективности его функционирования, разработал структурную схему устройства обнаружения БЛА по АШ.

Нефёдов Д.С. осуществил постановку задач и общее руководство исследованиями, предложил идею учета корреляционных характеристик акустического шума (АШ) БЛА при синтезе математической модели и алгоритма обнаружения маловысотных БЛА по АШ.

Authors' contribution

Puzanau A.D. fulfilled the synthesis of an algorithm for detecting UAVs by AN and an assessment of the effectiveness of its functioning, developed a block diagram of the device for detecting a UAVs by AN.

Nefedov D.S. carried out the formulation of tasks and the general management of the research, proposed the idea of taking into account the correlation characteristics of acoustic noise (AN) from unmanned aerial vehicles (UAVs) when synthesizing a mathematical model and an algorithm for detecting low-altitude UAVs by AN.

Сведения об авторах

Пузанов А.Д., адъюнкт научно-исследовательской части Военной академии Республики Беларусь.

Нефёдов Д.С., к.т.н., доцент, заместитель начальника научно-исследовательской части – начальник научно-исследовательской лаборатории роботизированных систем Военной академии Республики Беларусь.

Information about the authors

Puzanau A.D., Adjunct of the Research Department of Military Academy of the Republic of Belarus.

Nefedov D.S., PhD, Associate Professor, Deputy Head of the Scientific-Research Department of Military Academy of the Republic of Belarus.

Адрес для корреспонденции

220057, Республика Беларусь,
г. Минск, пр-т Независимости, 220
Военная академия Республики Беларусь;
тел. +375-44-516-10-83;
e-mail: alexandr.puzanov@my.com
Пузанов Александр Денисович

Address for correspondence

220057, Republic of Belarus,
Minsk, Nezavisimosty ave., 220,
Military Academy of the Republic of Belarus;
tel. +375-44-516-10-83;
e-mail: alexandr.puzanov@my.com
Puzanau Aliaksandr Denisovich