

*В.М. КАРТАШОВ, д-р техн. наук, В.А. ПОСОШЕНКО, канд. техн. наук,
В.И. КОЛЕСНИК, И.С. СЕЛЕЗНЕВ, Р.И. БОБНЕВ, А.И. КАПУСТА*

ОБНАРУЖЕНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ, РАССЕЯННЫХ НА АКУСТИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЯХ, СОЗДАВАЕМЫХ БПЛА

Введение

В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БПЛА) становятся важным фактором народно-хозяйственной и военной деятельности всех технологически развитых государств. Поэтому задача мониторинга окружающего воздушного пространства с целью обнаружения и оценивания характеристик БПЛА, безусловно, является актуальной.

Существующие методы (каналы) наблюдения за БПЛА [1 – 8] достаточно разнообразны и используют различные демаскирующие признаки, делающие его заметным на фоне окружающей обстановки. Среди подобных методов значительный интерес представляет активная радиолокация БПЛА, которую характеризуют всепогодность, значительная дальность обнаружения, пространственное разрешение по дальности и угловым координатам, помехоустойчивость, независимость от времени суток и т.д.

В свою очередь, существующие технологии изготовления БПЛА позволяют минимально задействовать металлические компоненты, широко использовать композитные материалы и специальные покрытия, что резко снижает ЭПР планера как радиолокационной цели. Поэтому при активной радиолокации БПЛА на первый план выходит анализ сигнала, рассеянного не конструкцией планера, а пакетом акустических волн, возникающих в процессе функционирования аппарата.

Экспериментально установлено, что БПЛА излучают акустические волны в диапазоне частот от сотен герц до 15 кГц [8, 9]. Для получения рассеянного радиосигнала от пакета акустических колебаний требуется выполнение условий Брэгга [8]:

$$\lambda_e = 2 \cdot \lambda_s \cdot \sin \theta,$$

где λ_e – длина электромагнитной волны; λ_s – длина волны акустических сигналов; θ – угол между фронтом акустической волны и направлением распространения зондирующих радиоволн.

Соответственно, диапазон рассеянных радиоволн с интенсивностью, достаточной для решения задач их обнаружения и оценивания, простирается от $\lambda_e = 6,8$ м (что соответствует частоте акустического излучения $f_s = 100$ Гц, $\lambda_s = 3,4$ м) до $\lambda_e = 5,4$ см (что соответствует частоте акустического сигнала $f_s = 15$ кГц, $\lambda_s = 2,7$ см).

В работах [7 – 32] показано, что структура и параметры акустических возмущений, созданных БПЛА в атмосфере, зависят от его вида, формы, количества двигателей и режимов их работы, количества и формы несущих винтов и т.д. Кроме того, экспериментальные исследования структуры и параметров звукового поля БПЛА выявили, что спектры его акустического излучения содержат ярко выраженные гармоники, имеющие частоты кратные частотам вращения винтов. Основной тон находится в полосе от 80 до 240 Гц, а количество гармоник может варьироваться от 10 до 40. При этом спектр акустического сигнала простирается до 15 кГц [8, 9].

В режиме полета спектральные линии акустического излучения размываются вследствие различия режимов работы (частоты вращения) двигателей при компенсации дестабилизирующих факторов движения в турбулентной атмосфере. По мере прохождения акустической волной определенного расстояния в атмосфере от источника излучения происходят заметные ослабления ее высокочастотных составляющих, что обусловлено дисперсионными свойствами

ми среды, а также изменчивостью характеристик направленности излучения в полосе частот [9]. Поэтому интенсивность акустических колебаний, зависящая от угла наблюдения, имеет случайный характер с неким законом распределения вероятностей.

Кроме того, анализ литературных источников, приведенных выше, позволяет предположить наличие дополнительного фактора нелинейного взаимодействия зондирующих радиоволн с динамичным звуковым полем, которое создает БПЛА, что приводит к появлению эффектов паразитной амплитудной и угловой модуляции даже в условиях излучения монохроматического и неизменного по интенсивности зондирующего радиосигнала. Эта гипотеза еще требует глубокой теоретической и экспериментальной проработки. Но уже сейчас ее необходимо учитывать в практической деятельности.

Таким образом, совокупный радиосигнал, рассеянный областью пространства, возмущенной акустическим излучением БПЛА, будет представлять собой временную последовательность колебаний с различными и случайными текущими амплитудами, частотами и временем запаздывания. Поэтому на входе приемника РЛС будет присутствовать смесь шумовых колебаний, шумовых помех и полезного сигнала с непредсказуемой заранее комплексной огибающей. При этом полагается известной эффективная полоса частот ΔF с определенной центральной частотой f_0 .

В этой связи значительный интерес представляют задачи обнаружения и оценивания сигналов с минимальной априорной информацией об их комплексной огибающей и времени существования на интервале наблюдения. Такого рода задачи помимо радиолокации распределенных целей (например, пространственно протяженных объектов) характерны для медико-биологических исследований, радиоастрономии, гидролокации и т.д.

Для решения подобных задач уже неприменимы известные процедуры оптимальной или квазиоптимальной фильтрации, а потому требуется поиск наиболее общих алгоритмов обработки, основанных на статистическом различии чистого шума и аддитивной смеси "сигнал плюс шум".

Алгоритм обнаружения

Разработку таких алгоритмов удобно проводить на основе так называемого "энергетического подхода", который базируется на анализе оценок приведенной к шумам энергии регистрируемых колебаний на интервале наблюдения в предположении гауссового характера шумов [33]. Причем это ограничение не является чрезмерным по двум причинам: во-первых, решение задачи для гауссовых шумов открывает путь для совершенствования алгоритмов обработки в условиях воздействия шумов с иными статистическими характеристиками, а во-вторых, в настоящее время получили развитие процедуры нормализации негауссовых процессов.

Рассмотрим следующую модель аддитивной смеси $\dot{Y}(t)$ полезного сигнала $\dot{S}(t)$ и шума $\dot{N}(t)$:

$$\dot{Y}(t) = \dot{S}(t) + \dot{N}(t), \text{ где } \dot{S}(t) = \sum_{i=1}^k \dot{S}_i(t) = \sum_{i=1}^k \dot{b}_i \cdot \dot{X}_i(t), \text{ где}$$

$\dot{S}_i(t) = \dot{b}_i \dot{X}_i(t)$ – i -й относительно начала пакета импульсный сигнал в пачке из K импульсов; \dot{b}_i – подлежащий оцениванию произвольный амплитудный множитель i -го импульса; $\dot{X}_i(t)$ – известный с точностью до фазы φ_i опорный сигнал, соответствующий зондирующему радиоимпульсу

$$x_i(t) = \text{Re}\{\dot{X}_i(t)e^{j\omega_0 t}\}.$$

Корреляционная матрица шумов $\dot{\Phi}(t_1, t_2)$, составленная для одного элемента дальности по различным периодам зондирующих радиоимпульсов, имеет вид

$$\underline{\Phi}(t_1, t_2) = \delta(t_1 - t_2) \underline{\dot{N}},$$

где $\delta(r)$ – дельта-функция.

Поскольку мгновенные значения шума на выходе приемника независимы в моменты, отстоящие на время, равное периоду зондирующих сигналов, матрица $\underline{\Phi}(t_1, t_2)$ размерности $(k \times k)$ – диагональная: $\underline{\Phi}(t_1, t_2) = \text{diag } N_{ii}$, $N_{ii} = \sigma_{ii}^2 \Delta F$, где σ_{ii}^2 – дисперсия шумовых колебаний в i -м периоде зондирующих сигналов; ΔF – эффективная полоса пропускания узкополосного тракта принимаемых колебаний.

В матричном виде модель аддитивной смеси сигнала с шумом будет иметь вид

$$\underline{\dot{Y}}(t) = \underline{\dot{X}}(t, \underline{\dot{b}}) + \underline{\dot{N}}(t),$$

где элементы матриц соответственно равны значениям аддитивной смеси "сигнал плюс шум", полезного радиосигнала с неизвестной амплитудой и начальной фазой, шумовых колебаний на фиксированном элементе дальности в каждом из k периодов (T_3) зондирующих сигналов на интервале наблюдения $(T_2 - T_1) = k \cdot T_3$.

На основе этой модели в силу значительной неопределенности в представлении пакетов отражений требуемый алгоритм их совместного обнаружения и оценивания максимальных значений, регистрируемых полезных сигналов на ограниченном интервале наблюдения можно отыскивать в рамках процедур обработки в соответствии с критерием максимума отношения правдоподобия:

$$l = (p_{cn}(\underline{\dot{Y}}/\underline{\dot{b}}))/(p_n(\underline{\dot{Y}}/\underline{\dot{b}})) = k \exp\left\{(-1/2) \int_{T_1}^{T_2} \int_{T_1}^{T_2} [\underline{\dot{Y}}^{*T}(t_1) - \underline{\dot{X}}^{*T}(t_1, \underline{\dot{b}})] \underline{\Psi}(t_1, t_2) [\underline{\dot{Y}}(t_2) - \underline{\dot{X}}(t_2, \underline{\dot{b}})] dt_1 dt_2\right\} /$$

$$(k \exp\left\{(-1/2) \int_{T_1}^{T_2} \int_{T_1}^{T_2} [\underline{\dot{Y}}^{*T}(t_1) \underline{\Psi}(t_1, t_2) \underline{\dot{Y}}(t_2)] dt_1 dt_2\right\}) = \max$$

при $\underline{\dot{b}} = \underline{\dot{b}}_{opt}$, где p_{cn} и p_n – соответственно функционалы многомерной плотности вероятности гауссовых случайных величин для аддитивной смеси сигнала с шумом и чистого шума. Матрица $\underline{\Psi}(t_1, t_2)$ находится путем решения интегрального уравнения

$$\int_{T_1}^{T_2} \underline{\Phi}(t_1, t_2) \underline{\Psi}(t_2, t_3) dt_2 = \underline{I} \delta(t_1 - t_3),$$

где \underline{I} – единичная диагональная матрица; $T_2 - T_1$ – временной интервал, соответствующий одному элементу дальности.

Оценки $\underline{\dot{b}}^1$ энергетических параметров $\underline{\dot{b}}$ получены в виде $\underline{\dot{b}}^1 = \underline{Q}^{-1} \underline{\dot{Z}}$, где $\underline{\dot{Z}} = \{\dot{Z}_i, i = 1, k\}$ – вектор приведенных к шумам результатов обработки входного колебания $\underline{\dot{Y}}(t)$ в фильтре, согласованном с опорным сигналом $\underline{\dot{X}}(t)$ в каждом i -м периоде зондов на произвольном элементе дальности на интервале наблюдения $(T_2 - T_1)$:

$$\dot{Z}_i = (1/N_{ii}) \int_{T_1}^{T_2} \dot{Y}_i(t) \dot{X}_i(t) dt = \dot{Z}_{0i} / N_{ii}, \underline{Q} - \text{диагональная матрица с элементами } q_{11}, q_{22}, \dots, q_{kk},$$

где $q_{ii} = 2\mathcal{E}_i / N_{ii}$, $2\mathcal{E} = \int_{T_1}^{T_2} \dot{X}_i^2 dt$ – энергия опорного сигнала $x_i(t)$ на интервале наблюдения $(T_2 - T_1)$.

Подставив полученные оценки \hat{b}^1 в выражение для $\ln(l)$, получим искомый алгоритм функционирования устройства накопления энергии нешумового сигнала $\dot{S}(t)$, представляющего собой пакет радиоотражений с флуктуирующими амплитудами импульсов, оптимальный в смысле максимума отношения правдоподобия:

$$\ln(l) = (1/2) \sum_{i=1}^k / \dot{Z}_i / ^2 (1/q_{ii}) = (1/2) \sum_i / \dot{Z}_{ni} / ^2, \text{ где } \dot{Z}_{ni} = \dot{Z}_{0i} / (2 \mathcal{E}_i N_{ii})^{1/2}.$$

Следует отметить, что при отсутствии полезного сигнала $\dot{S}(t)$ значения математического ожидания $M[\ln(l)]$ и дисперсия $D[\ln(l)]$ – постоянны. Поэтому синтезированный алгоритм обнаружения оказывается инвариантным к интенсивности помех.

Очевидно, что случайная величина $\xi = \ln(l)$, получаемая как сумма квадратов реализаций нормально распределенной величины \dot{Z} в зависимости от наличия или отсутствия полезного (нешумового) сигнала $\dot{S}(t)$, во входном случайном процессе $\dot{Y}(t)$ имеет либо центральное $P_y(\xi)$, либо нецентральное $p_{ny}(\xi)$ распределение $\chi^2_{N_{ce}}$ с $N_{ce} = 2kr$ степенями свободы и параметром нецентральности $\lambda \geq 0$, где r – количество отсчетов значений $Z^2_i[n]$ на интервале наблюдения $T_2 - T_1$.

Известные плотности вероятности [34]:

$$P_y(\xi) = (1/(2^{n/2} \Gamma(n/2))) \xi^{n/2-1} e^{-\xi/2} \quad (1)$$

для $\xi > 0$, где n – количество степеней свободы; $\Gamma(x)$ – гамма-функция Эйлера; $P_y(\xi) = 0$ для $\xi \leq 0$;

$$p_{ny}(\xi) = (e^{-0.5(\xi+\lambda)} \xi^{(n/2)-1} \sum_{j=0}^{\infty} (\lambda \xi / 4)^j / (j! \Gamma(j + n/2))) / 2^{n/2} \quad (2)$$

для $\xi \geq 0$, где λ – параметр нецентральности, позволяют анализировать качественные показатели синтезированного обнаружителя для различных значений параметров λ , k , а также оценить оптимальное значение интервала наблюдения $\Delta T = kT_s$, (T_s – период следования зондирующих радиоимпульсов) для малых входных соотношений сигнал/шум и определить в соответствии с выбранным критерием обнаружения пороговое значение $\ln(l)_{nop}$, в сравнении с которым величины $\ln(l)$ выносятся решение о наличии нешумового сигнала $\dot{S}(t)$ на интервале наблюдения ΔT .

Полученное выражение для $\ln(l)$ синтезированного обнаружителя пакетов радиоотражений, замаскированных шумами, позволяет применить различные способы его практической реализации. В этой связи представляется перспективным путь разделения исходного анализируемого колебания $\dot{Y}(t)$ на квадратурные составляющие $\dot{Y}_c(t)$ и $\dot{Y}_s(t)$. По цифровым отсчетам результата их согласованной фильтрации вычисляются оценки текущих значений дисперсий $\sigma^2_{ci}, \sigma^2_{si}$ в квадратурных каналах в окрестности каждой i -й текущей выборки $Z_0[i]_{c,s}$ на интервале наблюдения, после чего формируется искомая оценка вида

$$\ln(l) = S_{\Sigma} = \sum_{j=1}^{kr} (Z^2_0[j]_c / \sigma^2_{cj} + Z^2_0[j]_s / \sigma^2_{sj}).$$

Такой подход позволил получить оценку $(\ln(l))^1$ без детектирования огибающей узкополосного случайного процесса $\dot{Y}(t)$ (что важно при малых соотношениях сигнал/шум),

формировать фазовременную характеристику (ФВХ) пакета радиоотражений, оценить текущие значения $N_{ic,s}, \sigma^2_{ic,s}$ в квадратурных каналах по нормально распределенным отсчетам $Z_0[i]_{c,s}$, в то время как отсчеты полного вектора $Z_0[i]_{c,s}$ могут быть распределены по любому из следующих законов: Рэлея, Райса, Бэкмана или Хойта [35].

Таким образом, предложенная методика обработки на фоне гауссовых шумов принимаемого колебания $\dot{Y}(t)$ в квадратурах позволяет предложить более общий энергетический подход к задачам обнаружения и оценивания сигналов с априори неизвестной комплексной огибающей, замаскированных нестационарными, негауссовыми шумами, а также нешумовыми помехами. Во многом такой подход основан на разнообразных процедурах нормализации либо квадратурных составляющих $\dot{Y}_c(t)$ и $\dot{Y}_s(t)$ полного вектора, либо результата их согласованной фильтрации $\dot{Z}_0(t)_c, \dot{Z}_0(t)_s$ для непрерывных и для дискретных сигналов.

Известные аналитические выражения [33] для центрального и нецентрального распределения хи-квадрат (1) и (2) позволяют получить численные оценки пороговой величины $\ln(l)_{пор.}$ и вероятностные характеристики обнаружителя для текущих значений числа степеней свободы $N_{св.}$ и параметра нецентральности $\lambda \geq 0$ в зависимости от выбранного критерия обнаружения.

Рассмотрим на рис. 1 схематичное изображение дифференциальных плотностей вероятности вида (1) и (2). Пусть случайная величина $\ln(l)=x$ имеет либо центральное (кривая 1), либо нецентральное (кривая 2) распределение хи-квадрат с $N_{св.}$ степенями свободы.

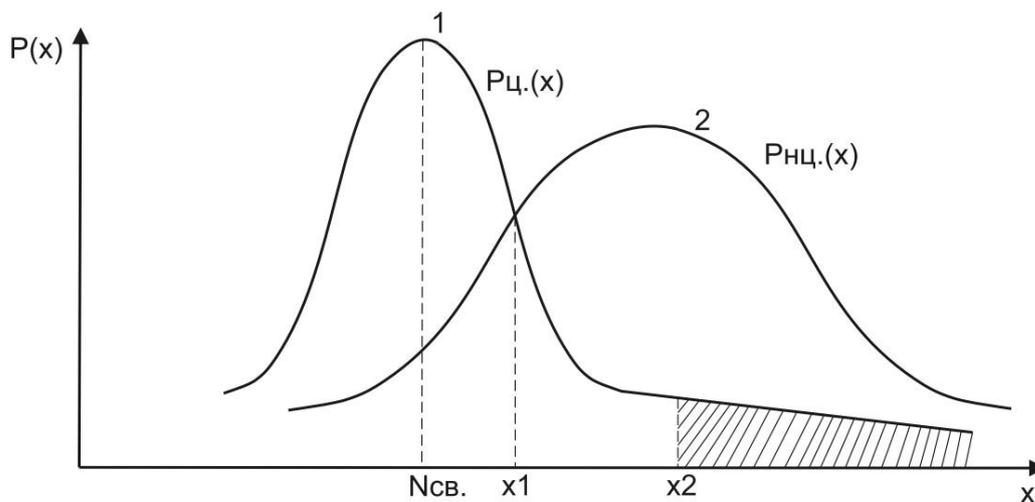


Рис. 1. Дифференциальные плотности центрального $P_{ц.}(x)$ и нецентрального $P_{нц.}(x)$ распределений $\chi^2_{N_{св.}}$ с $N_{св.}$ степенями свободы

Задача выбора порогового значения $\ln(l)_{пор.}=x_{пор.}$ решается на основе анализа известных аналитических выражений (1) и (2), описывающих данные плотности вероятности. Выбор любой точки на оси X (например x_1) в качестве порогового значения $x_{пор.}$ означает, что при зафиксированных значениях $N_{св.}$ и параметра нецентральности λ возможно вычислить ключевые значения вероятностей правильного обнаружения $P_{прав.}$, пропусков цели $P_{пр.ц.}$, ложной тревоги $P_{л.т.}$ следующим образом:

$$P_{прав.} = \int_{x_1}^{\infty} P_{нц.}(x) \cdot dx; \quad P_{пр.ц.} = \int_0^{x_1} P_{нц.}(x) \cdot dx; \quad P_{л.т.} = \int_{x_1}^{\infty} P_{ц.}(x) \cdot dx.$$

Выбирая то или иное значение x_1 , можно в широких пределах изменять соотношение между численными оценками указанных вероятностей в соответствии с решаемой задачей. Например, если требуется зафиксировать максимально допустимое значение вероятности ложной тревоги (заштрихованная площадь на рис.1), то в качестве порогового значения $x_{пор.}$ следует выбирать точку x_2 .

В любом случае при приеме радиосигналов с минимально регистрируемой энергией полезных сигналов вероятность правильного обнаружения

$$P_{\text{прав.мин.}} = \int_{N_{cd} + \lambda}^{\infty} P_{\text{н.ц.}}(x) \cdot dx \approx 0.5.$$

С ростом энергетики принимаемых колебаний вероятность правильного обнаружения увеличивается.

Практическая реализация алгоритма обнаружения

Структурная схема приемной части регистратора радиосигналов, рассеянных на пакетах акустических колебаний БПЛА, показана на рис.2.

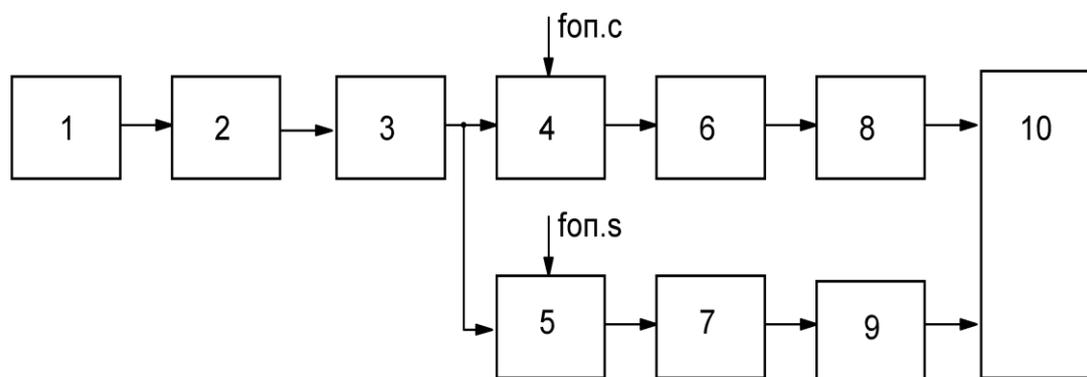


Рис. 2. Структурная схема приемной части регистратора БПЛА

На этой схеме приняты следующие обозначения:

- 1 – антенна;
- 2 – преселектор;
- 3 – малошумящий усилитель радиочастоты (МШУ);
- 4, 5 – смесители;
- 6, 7 – усилители низкой частоты (УНЧ);
- 8, 9 – АЦП;
- 10 – специализированное вычислительное устройство.

$f_{op.c}$, $f_{op.s}$ – "косинусная" и "синусная" опорные частоты, равные несущей частоте зондирующих радиосигналов f_0 и сдвинутые относительно друг друга на $\pi/2$;

Данная схема представляет собой высокочувствительный приемник прямого преобразования с двумя выходными квадратурными каналами в цифровом формате. Отсчеты с этих каналов поступают в специализированное вычислительное устройство или высокопроизводительную ЭВМ и обрабатываются в соответствии с алгоритмом, описанном выше.

В соответствии с этим алгоритмом в окрестности каждой текущей i -й выборки A_i в каждом канале обработки условно "слева" и "справа" от нее (то есть, по выборкам предыстории и постистории) формируются оценки математического ожидания: $m_L = \frac{1}{k} \cdot \sum_{j=1}^k A_{i-j}$ и

$m_R = \frac{1}{k} \cdot \sum_{j=1}^k A_{i+j}$, где величина k характеризует глубину предыстории и постистории. Тогда текущую оценку дисперсии в окрестности выборки A_i получим из следующих соотношений:

$$D_L = \frac{1}{k-1} \cdot \sum_{j=1}^k (A_{i-j} - m_L)^2, \quad D_R = \frac{1}{k-1} \cdot \sum_{j=1}^k (A_{i+j} - m_R)^2, \quad D_i = \frac{D_L + D_R}{2}.$$

Теперь текущая оценка случайной величины ξ для i -й выборки получится такой:

$$\xi_i = \frac{A_i^2}{D_i}.$$

В качестве наглядной иллюстрации на рис. 3 показана диаграмма текущих сумм $X_i = S_{\Sigma_i} = (\ln l)_i$, распределенных на дискретных элементах дальности, где i – условный номер элемента на развертке дальности D .

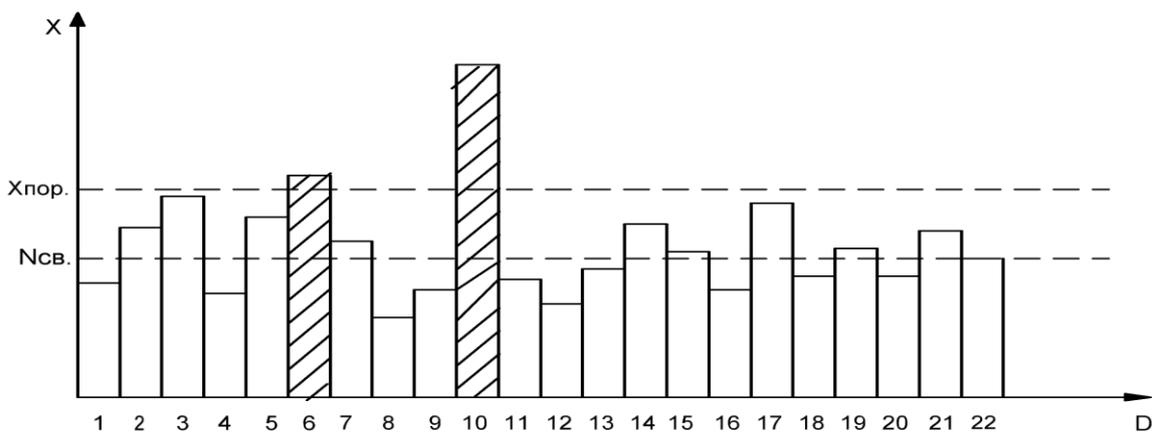


Рис. 3. Диаграмма, иллюстрирующая распределение на элементах дальности накопленной энергии, приведенной к шумам

Например, данная диаграмма показывает, что на элементах дальности с номерами (1...5), (7...9), (11...22) текущие суммы X_i не превышают пороговое значение $X_{пор.}$. Поэтому принимается решение, что на этих дальностях отсутствует полезный сигнал с приемлемой энергетикой.

На элементах дальности с номерами 6 и 10 текущие значения X_6 и X_{10} превышают пороговые значения. Следовательно, принимается решение, что на этих дальностях присутствуют интересующие нас объекты. Причем, с учетом специфики формирования оценок X_i по методу "скользящего окна", когда в каждом периоде зондирующих сигналов из суммы S_{Σ_i} вычитается первый элемент и к ней добавляется новый, ничего определенного о направленности процесса накопления сказать нельзя. Например, малое превышение порога на шестом элементе может означать либо начало полезной регистрации, либо близкое ее завершение. Значительное превышение порога на десятом элементе дальности означает, скорее всего, срединный этап процесса регистрации объекта.

Поэтому окончательный вывод о динамике процесса регистрации можно сделать лишь на этапе оценивания распределения нешумовой энергии на всем интервале наблюдения, который следует сразу за этапом обнаружения начала и окончания пакета радиоотражений на фиксированной дальности.

Выводы

Обнаружение БПЛА радиометодами представляет сложную научно-техническую задачу в силу малой эффективной поверхности рассеяния его планера. Поэтому перспективным представляется радиолокация атмосферных неоднородностей, которые создаются вследствие функционирования летательного аппарата.

В свою очередь, рассеянные на атмосферных возмущениях радиосигналы характеризуются большой априорной неопределенностью формы их комплексной огибающей. Это обстоятельство вынуждает проводить синтез алгоритма обработки принимаемых радиосигналов в рамках самых общих вероятностных подходов, основанных на статистических различиях чистого шума и аддитивной смеси "сигнал плюс шум". В этом смысле привлекательным видится так называемый "энергетический подход", заключающийся в получении текущих оценок энергии принимаемых колебаний на заданном интервале наблюдения в полосе частот, которая априори известна достаточно точно.

Для узкополосного случайного процесса подобные оценки рассматриваются как реализации случайной величины, имеющей распределение "хи-квадрат" с неким параметром нецентральности. В результате сравнения текущего значения параметра нецентральности с пороговым значением выносится решение о наличии или отсутствии нешумовой энергии на интервале наблюдения.

Синтезированный алгоритм является оптимальным в смысле максимума отношения правдоподобия, а также инвариантным к уровню шумовых колебаний. Его реализация возможна как на программном, так и преимущественно аппаратном уровнях.

Известные аналитические выражения для дифференциальной плотности вероятности распределения "хи-квадрат" позволяют получать качественные характеристики алгоритма обнаружения.

К его недостаткам следует отнести "неразборчивость" к нешумовым сигналам, попадающим в полосу пропускания узкополосного тракта радиоприемника, что является платой за наиболее общий подход к синтезу процедур обработки принимаемых радиосигналов.

Разделение обнаруженных сигналов на относящиеся к БПЛА или к сосредоточенным по спектру нешумовым помехам проводится на этапе оценивания и распознавания, который представляет отдельную задачу.

Список литературы:

1. Карташов В.М., Олейников В.Н., Шейко С.А., Бабкин С.И., Коритцев И.В., Зубков О.В. Особенности обнаружения и распознавания малых беспилотных летательных аппаратов // Радиотехника. 2018. Вып. 195. С.235-243.
2. Карташов В.М., Олейников В.Н., Воронин В.В., Рябуха В.П., Капуста А.И., Рыбников Н.В., Селезнев И.С. Методы комплексной обработки и интерпретации радиолокационных, акустических, оптических и инфракрасных сигналов беспилотных летательных аппаратов // Радиотехника. 2020. Вып. 202. С. 173-182.
3. Карташов В.М., Олейников В.Н., Леонидов В.И., Воронин В.В., Капуста А.И., Селезнев И.С., Першин Е.В. Комплексная обработка сигналов интегрированной системы наблюдения беспилотных летательных аппаратов с использованием целеуказания // Радиотехника. 2020. Вып. 203. С. 148-161.
4. Карташов В.М., Олейников В.Н., Шейко С.А., Бабкин С.И., Корытцев И.В., Зубков О.В. Особенности обнаружения и распознавания малых беспилотных летательных аппаратов // Радиотехника. 2018. Вып. 195. С. 235-243.
5. Макаренко С. И., Тимошенко А. В., Васильченко А. С. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Ч. 1. Беспилотный летательный аппарат как объект обнаружения и поражения // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 109-146.
6. Molchanov P., Harmanny R.I., de Wit J.J., Egiazarian K., Astola J. Classification of small UAVs and birdsby micro-Doppler signatures // J. Microw. Wirel. Technol. 2014. 6:435-444.
7. Карташов В.М., Олейников В.Н., Шейко С.А., Бабкин С.И., Корытцев И.В., Зубков О.В., Анохин М.А. Информационные характеристики звукового излучения малых беспилотных летательных аппаратов // Радиотехника. 2017. Вып. 191. С. 181-187.
8. Красненко М.П. Акустическое зондирование атмосферы. Новосибирск : Наука СО, 1986. 167с.
9. В.М. Карташов, О.И. Харченко, В.А. Посошенко, В.И. Колесник, А.И. Капуста, А.Б. Егоров, Л.П. Тимошенко Обнаружение беспилотных летательных аппаратов с использованием рассеяния радиоволн на акустических возмущениях среды, создаваемых летательным аппаратом // Радиотехника. 2021. Вып. 206.

10. Aker C., Kalkan S. Using deep networks for drone detection // Proceedings of the 2017 14th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS); Lecce, Italy. 29 August–1 September 2017. P. 1–6.
11. Теодорович Н.Н., Строганова С.М., Абрамов П.С. Способы обнаружения и борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами // Интернет-журнал “Науковедение”. 2017. Т.9, №1. <http://naukovedenie.ru/PDF/13TVN117.pdf>.
12. Даник Ю.В., Бугайов М.В. Аналіз ефективності виявлення тактичних безпілотних літальних апаратів пасивними та активними засобами спостереження // Зб. наук. праць ЖВІ ДУТ. Інформаційні системи’15. 2015. Вип.10. С.5-20.
13. Marino L. Experimental analysis of UAV-propellers noise // 16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. University «La Sapienza», Rome, Italy. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2010. P. 1-14.
14. Beel J. J. Anti-UAV Defense For Ground Forces and Hypervelocity Rocket Lethality Models. Monterey, California : Naval Postgraduate School, 1992. P. 36–46.
15. Moses A. Radar-based detection and identification for miniature air vehicles / A. Moses, M.J.Rutherford, K.P. Valavanis // IEEE International Conference on Control Applications.
16. Даник Ю.Г., Пулеко І.В., Бугайов М.В. Виявлення безпілотних літальних апаратів на основі аналізу акустичних та радіолокаційних сигналів // Вісник ЖДТУ. 2014. № 4 (71). С.71- 80
17. Самохин В. Ф. Экспериментальное исследование источников шумности беспилотного летательного аппарата с винто-кольцевым движителем в толкающей компоновке / В.Ф. Самохин, С.П. Остроухов, А. Мошков // Электронный журнал «Труды МАИ». 2012. Вып. № 70. С.1–24.
18. Zaslavsky Yu. M., Zaslavsky V. Yu. Acoustic noise of a low flying quadrocopter // NOUSE Theory and Practice. V.5, №3, 2019. P. 21-27.
19. Карташов В.М., Посошенко В.О., Воронин В.В., Колесник В.И., Капуста А.И., Рибников Н.В., Першин Е.В. Методы обнаружения-распознавания радиолокационных, акустических, оптических и инфракрасных сигналов беспилотных летательных аппаратов // Радиотехника. 2021. Вып. 205. С.138 – 153.
20. Sinibaldi G., Marino L. Experimental analysis on the noise of the propellers for small UAV // Applied Acoustics, 74 (2013). P. 79–88.
21. Дистанционные методы и средства исследования процессов в атмосфере Земли ; под ред. Б.Л. Кашеева, Е.Г. Прошкина, М.Ф. Лагутина. Харьков : Бизнес Информ, 2002. 426 с.
22. Saqib M., Khan S.D., Sharma N., Blumenstein M. A study on detecting drones using deep convolutional neural networks // Proceedings of the 2017 14th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS). Lecce, Italy. 29 August–1 September 2017.
23. Park S., Shin S., Kim Y., Matson E.T., Lee K., Kolodzy P.J., Slater J.C., Scherrek M., Sam M., Gallagher J.C., et al. Combination of radar and audio sensors for identification of rotor-type unmanned aerial vehicles (uavs) // Proceedings of the 2015 IEEE SENSORS; Busan, Korea. 1–4 November 2015. P. 1–4.
24. Кошкин Р.П. Беспилотные авиационные системы. Москва : Стратегические приоритеты, 2016. 676 с.
25. Harmanny R., De Wit J., Cabic G.P. Radar micro-Doppler feature extraction using the spectrogram and the ceprogram // Proceedings of the 2014 11th European Radar Conference; Cincinnati, OH, USA. 11–13 October 2014. P. 165–168.
26. De Wit J., Harmanny R., Molchanov P. Radar micro-Doppler feature extraction using the singular value decomposition // Proceedings of the 2014 International Radar Conference. Lille, France. 13–17 October 2014. P. 1–6.
27. Дистанционные методы и средства исследования процессов в атмосфере Земли ; под ред. Б.Л. Кашеева, Е.Г. Прошкина, М.Ф. Лагутина. Харьков : Бизнес Информ, 2002. 426 с.
28. Калистратова М.А., Кон А.И. Радиоакустическое зондирование атмосферы. Москва : Наука, 1985. 200 с.
29. Oh B.S., Guo X., Wan F., Toh K.A., Lin Z. Micro-Doppler mini-UAV classification using empirical mode decomposition features // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. 2017. 15:227–231.
30. Mendis G.J., Randeny T., Wei J., Madanayake A. Deep learning based doppler radar for micro UAS detection and classification // Proceedings of the MILCOM 2016-2016 IEEE Military Communications Conference. Baltimore, MD, USA. 1–3 November 2016. P. 924–929.
31. Simonyan K., Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. arXiv.20141409.1556.
32. Oromolla R., Fasano G., Accardo D. A Vision-Based Approach to UAV Detection and Tracking in Cooperative Applications. Sensors. 2018. 8:3391.
33. Урковиц. Обнаружение неизвестных детерминированных сигналов по энергии // ТИИЭР. 1967. Т.55, №4. С. 50-59.
34. В.С. Королюк, Н.И. Портенко, А.В. Скороход, А.Ф. Турбин. Справочник по теории вероятностей и математической статистике. Москва : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1985. 640 с.
35. Куликов Е.И. Методы измерений случайных процессов. Москва : Радио и связь, 1986. 272с.

Поступила в редколлегию 04.10.2021

Сведения об авторах:

Карташов Владимир Михайлович – д-р техн. наук, профессор, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, заведующий кафедрой медиаинженерии и информационных радиоэлектронных систем, Украина, e-mail: volodymyr.kartashov@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8335-5373>

Посошенко Виталий Александрович – канд. техн. наук, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры медиаинженерии и информационных радиоэлектронных систем, Украина; e-mail: vitalii.pososhenko@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0867-9161>

Колесник Виктория Ивановна – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, ассистент кафедры медиаинженерии и информационных радиоэлектронных систем, Украина; e-mail: viktorija.kolisnyk@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2382-9124>

Селезнёв Иван Сергеевич – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, аспирант кафедры медиаинженерии и информационных радиоэлектронных систем, Украина, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0731-7540>

Бобнев Роман Александрович – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, ст. преподаватель кафедры медиаинженерии и информационных радиоэлектронных систем, Украина; e-mail: roman.bobniev@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9322-9722>

Капуста Анастасия Игоревна – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, аспирант кафедры медиаинженерии и информационных радиоэлектронных систем, Украина; e-mail: anastasiia.kapusta@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2206-1552>