

# Обработка больших данных при распознавании объектов по их акустическому сигналу

С. М. Пилипенко, e-mail: [cofiyapilipenko1998-2013@inbox.ru](mailto:cofiyapilipenko1998-2013@inbox.ru)<sup>1</sup>

В. И. Лютин, e-mail: [lyutin\\_v\\_i@mail.ru](mailto:lyutin_v_i@mail.ru)<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Воронежский государственный технический университет

<sup>2</sup> Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия» имени профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина

***Аннотация.** В работе на основе теории различения статистических гипотез синтезирован алгоритм обработки данных при распознавании объектов по спектру их акустического шума. Рассчитаны характеристики распознавания объектов, по которым определены требования к точности измерения мощностей акустического излучения в различных частотных полосах.*

***Ключевые слова:** теория различения гипотез, достаточная статистика, распознавание сигналов, спектр акустического сигнала.*

## Введение

Одним из демаскирующих факторов подвижных объектов является их собственный шум, возникающий при движении. Примером использования шума от движущихся объектов является самонаводящийся боеприпас типа «Bat», разработанный в США [1]. Обнаружение и классификация объектов по их акустическому шуму относится к пассивным способам, не вскрывающим факта наблюдения объекта и допускающим применение независимо от времени суток.

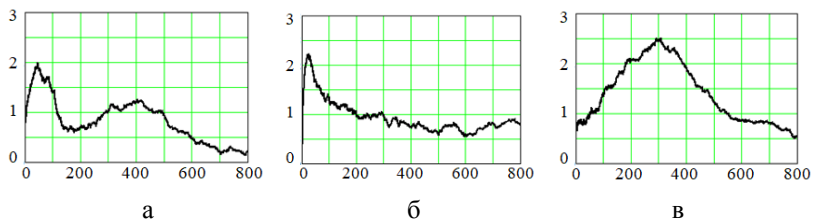
В связи с этим актуальным становится установление принципов распознавания объектов по их акустическому шуму. С учётом недостаточности сведений о принципах действия акустических датчиков решение задачи проводилось с применением принципа «синтеза за противника» [2]. При этом алгоритм и структура устройства ищутся с применением вероятностно-статистических методов, предельно исключая влияние субъективных факторов на технические решения [3].

Цель работы – синтез алгоритма и анализ качества распознавания объектов по результатам анализа их акустических шумов.

## 1. Постановка задачи

В системах обнаружения и различения (распознавания) объектов требуется высокая скорость принятия решений, поэтому должны применяться элементы искусственного интеллекта, осуществляющего сопоставление поступающих данных с образцами ожидаемых. В связи с этим требуется подготовка образцов для сравнения, что приводит к необходимости решения задач предварительной подготовки эталонов для сравнения и синтеза оптимального алгоритма автоматической системы принятия решений о наблюдаемом объекте.

На рис. 1 показаны результаты расчётов спектров акустических сигналов по результатам наблюдения трёх различных шумящих объектов.



*а – трактор, б – грузовой автомобиль, в – мотоцикл*

*Рис. 1. Спектры акустических сигналов*

Как видно на рис. 1,а спектр имеет два выраженных подъёма вблизи частот 50 Гц и 400 Гц, на рис. 1,б – подъём вблизи частоты 25 Гц и спад с увеличением частоты, на рис 3,в – подъём вблизи частоты 300 Гц и спад, как с повышением частоты, так и с её понижением. Для частот свыше 800 Гц частотные спектры акустических шумов представленных объектов практически равномерны, не имеют заметных подъёмов, то есть, практически неразличимы. Каждый из спектров является акустическим портретом отдельного объекта или группы объектов, и отличие акустических спектров указывает на принципиальную возможность различения или распознавания объектов.

Сформированные спектры акустических сигналов от типовых объектов являются эталонными, с ними сравниваются спектры наблюдаемых объектов.

Для формирования эталонных спектров и проведения наблюдения акустических шумов объектов целесообразно определить относительные уровни мощности излучения в заранее выделенных полосах частот, например, выделить три октавных полосы частот 0...200 Гц, 200...400 Гц, 400...800 Гц, в которых определить относительные уровни мощности для выбранных объектов.

Один из возможных вариантов структурной схемы устройства измерения относительных уровней мощностей изображён на рис. 2. Сигнал от направленного микрофона  $M$  разделяется в электрических фильтрах на выделенные полосы частот. Для преобразования напряжений с выходов фильтров сигналы подаются на квадратичные детекторы КД (возводятся в квадрат) и затем в фильтрах нижних частот ФНЧ интегрируются. Полоса пропускания ФНЧ выбирается не более  $f_{\min} = 5 \dots 7$  Гц, чтобы охватить инфразвуковые колебания.

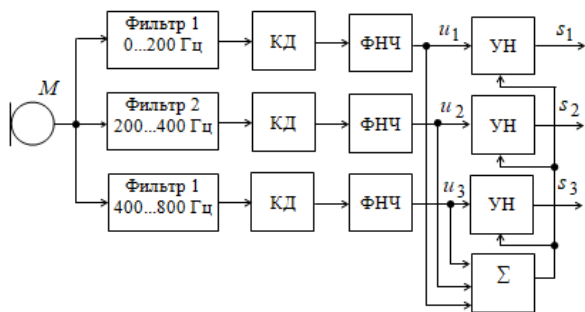


Рис. 2. Устройство измерения относительных мощностей

Результаты интегрирования  $u_1, u_2, u_3$  в устройствах нормировки УН делятся на сумму  $u_1 + u_2 + u_3$ , таким образом, что на выходах получаются сигналы  $s_1, s_2, s_3$ , пропорциональные нормированным или относительным уровням мощности в выбранных полосах частот. Рассмотренное устройство допускает цифровую реализацию.

Для спектров на рис. 1 результаты вычисления относительных мощностей в выше названных полосах частот приведены в табл. 1.

Таблица 1

*Относительные мощности в выделенных полосах частот*

№, полоса № объекта	1	2	3
	0...200 Гц	200...400 Гц	400...800 Гц
1	0,30	0,20	0,50
2	0,40	0,30	0,30
3	0,20	0,50	0,40
0 (фон)	0,25	0,25	0,50

Объект с номером «0» с относительными мощностями, пропорциональными полосе выделенных частот, соответствует наблюдению фона, когда нет интересных объектов.

Таким образом, величины относительных мощностей в выделенных полосах частот являются эталонными значениями для распознавания объектов. Число распознаваемых объектов может быть и больше, если предварительно провести их акустические исследования.

Решаемая задача относится к обработке больших данных, так как необходимо вести непрерывное наблюдение за окружающей обстановкой и осуществлять запись результатов наблюдения [4].

## 2. Синтез алгоритма

Анализ спектров акустических сигналов от  $I$  различных объектов, показывает, что для их распознавания достаточно для нескольких частотных полос  $J$  определить в качестве эталонов уровни  $s_{j_i}$  относительной мощности.

Наблюдение распознаваемого объекта выполняется устройством, структура которого приведена на рис. 1, и представляющим собой анализатор спектра акустического сигнала. При выполнении непрерывного наблюдения за заданной областью пространства, в которой может появиться один из распознаваемых объектов, выходные сигналы анализатора спектра  $y_j, j = \overline{1, J}$  должны быть продискретизированы по времени с интервалом интегрирования  $\Delta t \geq 1/f_{\min}$ , так что на выходах устройства будут действовать последовательности отсчётов  $y_{j_k}, j = \overline{1, J}, k = 1, 2, \dots$ , где  $k$  – номер шага наблюдения. При этом решение о результатах наблюдения будет выноситься на каждом шаге наблюдения.

Для распознавания одного из  $I + 1$  объектов, включая фон, для каждого шага наблюдения построим гипотезы  $H_{i_k}, i = \overline{0, I}, k = 1, 2, \dots$  о том, что очередное наблюдение соответствует одному из  $I + 1$  объектов.

Формируемое наблюдение векторное  $\vec{Y} = \{y_{j_k}, j = \overline{1, J}, k = 1, 2, \dots\}$ .

Каждый компонент вектора при справедливости гипотезы  $H_{i_k}, i = \overline{0, I}, k = 1, 2, \dots$  равен [3]

$$y_{j_k} = s_{j_i} + n_{j_k}, j = \overline{1, J}, i = \overline{0, I}, k = 1, 2, \dots, \quad (1)$$

где  $s_{j_i}$  – значения относительных мощностей в каждой из частотных полос,  $n_{j_k}$  – ошибки измерения, вызванные как собственными, так и внешними шумами.

Несовпадение наблюдаемых уровней сигналов с заданными в памяти обусловлено многими причинами, поэтому ошибки измерения  $n_{j_k}$  являются помехой и считаются нормальными с нулевым математическим ожиданием и с дисперсией  $\sigma^2$

$$w(n_{j_k}) = (\sigma \sqrt{2\pi})^{-1} \exp \left\{ - (n_{j_k})^2 / (2\sigma^2) \right\}. \quad (2)$$

Требуется определить, какой из гипотез соответствуют наблюдаемые данные.

Критерий принятия решения о наблюдении объекта, соответствующего гипотезе  $H_{i_k}, i = 0, I, k = 1, 2, \dots$ , – максимум апостериорной вероятности проверяемой гипотезы.

Условные (обратные) вероятности гипотез при получении векторного наблюдения  $\vec{Y}$  определяются по формуле Байеса [5]

$$P(H_{i_k} | \vec{Y}) = P_i \cdot P(\vec{Y} | H_{i_k}) / \sum_{r=0}^I P_r \cdot P(\vec{Y} | H_{r_k}), \quad (3)$$

где  $P_i$  – априорные вероятности гипотез,  $P(H_{i_k} | \vec{Y})$  – апостериорные вероятности наблюдений  $\vec{Y}$  при гипотезе  $H_{i_k}, i = 0, I$  на  $k$ -ом шаге наблюдения.

Так как знаменатель для всех гипотез в (3) одинаков, то при равенстве априорных вероятностей гипотез  $P(H_i) = 1/I$ , переходе к плотностям распределения вероятностей  $dP(\vec{Y} | H_{i_k}) = w(\vec{Y} | H_{i_k}) \cdot d\vec{Y}$  и введении

постоянной нормировки  $C_k^{-1} = \sum_{r=0}^I w(\vec{Y} | H_{r_k})$ , получим:

$$P(H_{i_k} | \vec{Y}) = C_k \cdot w(\vec{Y} | H_{i_k}). \quad (4)$$

Для применения критерия максимума апостериорной вероятности необходимо определить условную плотность распределения вероятностей векторного наблюдения для каждой из гипотез.

Определим из (1) ошибку измерения мощности шумов  $n_{j_k} = y_{j_i} - s_{j_k}$ ,  $j = 1, J$ ,  $i = 0, I$ ,  $k = 1, 2, \dots$  и подставим в (3):

$$w(y_{j_i} | s_{j_k}) = (\sigma \sqrt{2\pi})^{-1} \exp \left\{ - (y_{j_i} - s_{j_k})^2 / (2\sigma^2) \right\}. \quad (5)$$

При ортогональных и статистически независимых эталонах, а также для независимых шумовых выборок (ошибок измерения мощности излучения)  $n_{j_k}$   $j = 1, J$  плотность распределения вероятностей равна [5]

$$w(\bar{Y} | H_{i_k}) = \prod_{j=1}^J w(y_{j_i} | s_{j_k}) = \frac{1}{(\sigma \sqrt{2\pi})^J} \exp \left\{ - \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{j=1}^J (y_{j_k} - s_{j_i})^2 \right\}. \quad (6)$$

Сумма квадратов разностей поступивших данных с ожидаемыми эталонными значениями представляет собой случайное число и в теории различения гипотез называется достаточной статистикой, так как оно содержит все сведения о поступивших данных [3]:

$$\xi_{i_k} = \sum_{j=1}^J (y_{j_k} - s_{j_i})^2, i = \overline{0, I}. \quad (7)$$

Максимизация апостериорной вероятности гипотезы соответствует минимизации достаточной статистики [3]. Это даёт основание записать алгоритм принятия решения о наблюдаемом объекте в виде

$$H_{i_k} : i = \min_i \sum_{j=1}^J (y_{j_k} - s_{j_i})^2, i = \overline{0, I}. \quad (8)$$

Достаточная статистика в рассматриваемом случае есть дисперсия отклонения поступивших данных от ожидаемых значений по различным гипотезам. Решение принимается в пользу того объекта, для которого среднеквадратическое отклонение наблюдения от эталона имеет минимальное значение.

На рис. 3 показаны структурные схемы устройств принятия решений (а) и вычисления достаточной статистики (б).

Для вычисления достаточной статистики (рис. 3,а) поступившие на очередном шаге наблюдения данные поступают в вычитающие устройства (ВУ), где из них вычитаются эталонные значения относительных мощностей по проверяемой гипотезе, разности в квадратах (КВ) возводятся в квадрат, в сумматоре квадраты складываются.

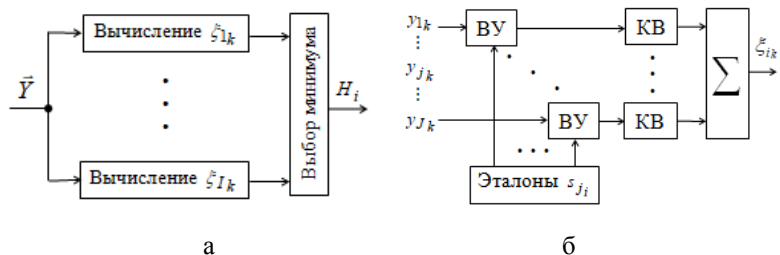


Рис. 3. Структурные схемы устройств принятия решений (а) и вычисления достаточной статистики (б)

### 3. Анализ качества распознавания объектов

Результат наблюдения акустического излучения в различных участках частотного диапазона представляет собой сигнал, который надо сравнить со многими образцами сигналов с целью выяснения, к какому из эталонов он ближе.

При допущении, что эталонные сигналы ортогональны и имеют одинаковую энергию, задача анализа качества распознавания объектов решается как распознавание многих ортогональных равновероятных сигналов, имеющих одинаковую энергию [6]. Тогда вероятность правильного определения гипотезы о типе объекта равна

$$P_{\text{прав}}(i) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{1}{2} + \Phi_0(\sqrt{q(i)} + z) \right]^I \cdot \exp \left\{ -z^2/2 \right\} \cdot dz, \quad (9)$$

где  $\Phi_0(z) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_0^z \exp \left\{ -t^2/2 \right\} \cdot dt$  – нормированная функция

ошибок [4],  $q(i) = \frac{1}{2 \cdot \sigma^2} \sum_{j=1}^J (s_{ji})^2$   $i = \overline{0, I}$  – параметр различения

проверяемой гипотезы.

По формуле (9) для четырёх значений числа распознаваемых объектов  $I=2, 4, 8, 16$  рассчитаны характеристики распознавания объектов, представляющие собой зависимости правильного решения о распознаваемом объекте от параметра различения проверяемой гипотезы. Графики характеристик распознавания объектов приведены на рис. 4.

Реально число распознаваемых объектов не будет более 10-ти. Тогда вероятность правильного распознавания более, чем 0,9, имеет место при параметре различения не меньшем 10-ти.

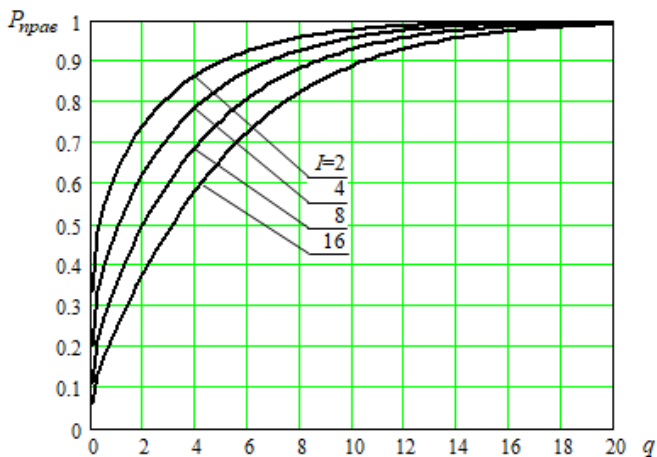


Рис. 4. Характеристики распознавания объектов

Пусть среднеквадратическое значение относительных мощностей в выделенных полосах частот равно обратной величине от числа частотных полос:

$$\sqrt{\sum_{j=1}^J (s_{j_i})^2} = \frac{1}{J} \quad i = \overline{0, J}, \quad (10)$$

Следовательно, предельно допустимое среднеквадратическое отклонение помехи равно

$$\sigma = \frac{1}{J \sqrt{2 \cdot q(i)}} = \frac{1}{J \sqrt{20}} \approx 0.223 \frac{1}{J}. \quad (11)$$

Отсюда следует, что для обеспечения вероятности правильного распознавания объектов не менее 0,9 при числе распознаваемых объектов не более 10 точность измерения относительных мощностей в выделенных полосах частот при 3-х частотных полосах должна быть не хуже  $0.223/3 * 100\% = 7,0\%$ .

#### 4. Заключение

Таким образом, в настоящей работе синтезированы алгоритм и структурная схема устройства распознавания объектов по спектру их акустического шума. Получены аналитические соотношения для анализа качества распознавания объектов, с применением которых рассчитаны и построены характеристики распознавания объектов, с



помощью которых определяются требования к точности измерения относительных мощностей акустических сигналов в выделенных частотных полосах для обеспечения требуемого качества распознавания объектов.

### **Список литературы**

1. Валецкий О. В. Оружие современных войн : боеприпасы, системы управляемого вооружения и меры противодействия их применению / Олег Валецкий; Центр стратегической конъюнктуры. — Пушкино : Центр стратегической конъюнктуры, 2015. — 264 с. : ил., табл. ; 21 см. — Библиогр. в конце разд. — ISBN 978-5-93883-263-3.

2. Юхно, П. М. Преднамеренные оптические помехи высокоточному оружию : / П. М. Юхно ; ISBN 978-5-93108-149-6 – Мягкая обложка – Издательство: Радиотехника, 2017. – 640 с.

3. Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции : / Г. Ван Трис ; М. : Советское радио, 1972. – Т. 1 – 742 с.

4. Просто о больших данных : / Гурвиц Джудит, Ньюджент Алан, Халпер Ферн, Кауфман Марсия : [перевод с английского]. – Москва : Эксмо, 2015. – 400 с. – (Библиотека Сбербанка. Т. 58). ISBN 978-5-699-85806-4

5. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей : учеб. для вузов. / Е. С. Вентцель. – 11-е изд. стер. – М. : КНОРУС, 2010. – 664 с.

6. Гуткин, Л. С. Теория оптимальных методов радиоприёма при флуктуационных помехах : / Л. С. Гуткин. – М. : Советское радио, 1972 – 448 с.