

# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ РАСПОЗНАВАНИЯ РАДИОИЗЛУЧЕНИЙ БОРТОВЫХ СРЕДСТВ РАДИОСВЯЗИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИМИТАЦИОННО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Хряпкин А.В.<sup>1</sup>, Калужный Н.М.<sup>1</sup>, Безрук В.М.<sup>1</sup>, Николаев И.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина,

E-mail: [oleksandr.khriapkin@nure.ua](mailto:oleksandr.khriapkin@nure.ua), [mykola.kaliuzhnyi@nure.ua](mailto:mykola.kaliuzhnyi@nure.ua), [valerii.bezruk@nure.ua](mailto:valerii.bezruk@nure.ua)

<sup>2</sup> Харьковский национальный университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба Харьков, Украина,

E-mail: [3rmorti7@gmail.com](mailto:3rmorti7@gmail.com)

**Аннотация** – В докладе приводится сравнительный анализ эффективности алгоритмов распознавания радиоизлучения бортовых средств радиосвязи. Сравниваются статистический, эмпирический алгоритмы, а также алгоритмы на базе расчета минимума расстояний.

**Ключевые слова** – распознавание, имитационно-математическое моделирование, статистический алгоритм, расстояние махаланобиса.

## I. Введение

Актуальной задачей при создании системы распознавания является выбор оптимального алгоритма распознавания или комбинации из нескольких алгоритмов. Такие алгоритмы должны с одной стороны обеспечивать максимальную эффективность распознавания, а с другой – иметь высокую скорость работы. В связи с этим задача оценки эффективности различных алгоритмов распознавания и выбора наиболее эффективного алгоритма для реализации в системах распознавания является актуальной. Целью доклада является изложение результатов имитационно-статистического моделирования эффективности различных алгоритмов распознавания большого числа источников радиоизлучений при использовании "точечных" и "интервальных" сигнальных признаков.

## II. Основная часть

При больших размерах распознаваемых алфавитов классов (типов) источников радиоизлучений и ограниченном словаре сигнальных признаков задача выбора наиболее эффективного алгоритма распознавания может быть решена только при использовании метода имитационно-статистического (математического) моделирования, позволяющего реализовать итеративную процедуру последовательного приближения разрабатываемой системы распознавания к потенциально достижимой и оценить ее эффективность в различных условиях функционирования.

Для сравнительной оценки эффективности распознавания источников радиоизлучений по параметрам излучаемых сигналов были выбраны логический, статистический и алгоритм распознавания по минимуму расстояния [1,2].

В общем случае источников радиоизлучений, как объекты распознавания, могут быть описаны признаками, содержащими векторы параметров классов излучений средств радиосвязи (СРС):

$$A_l = \{C_{lk}[a_{lk}(\alpha_\mu)]\}, l = \overline{1, L}, k = \overline{1, m}, \quad (1)$$

где:  $C_{lk}[a_{lk}(\alpha_\mu)]$ ,  $l = \overline{1, L}$ ,  $k = \overline{1, m}$ , - перечень классов излучений бортовых СРС l-го класса ЛА, m – количество классов излучений бортовых СРС.

В качестве входного вектора измеренных признаков наблюдаемых источников радиоизлучений неизвестного типа использовался вектор, содержащий восемь параметров, принимавших в процессе эксперимента случайные значения:

$$A_{\text{ИЗМ}} = \{f_{\text{ИЗМ}}, \Delta f_{\text{ИЗМ}}, \tau_{\text{ИЗМ}}, \Delta \tau_{\text{ИЗМ}}, T_{\text{ИЗМ}}, \Delta T_{\text{ИЗМ}}, F_{\text{ДИЗМ}}, \Delta F_{\text{ДИЗМ}}\} \quad (2)$$

где:  $f_{\text{ИЗМ}}$  - среднее значение несущей частоты,  $\Delta f_{\text{ИЗМ}}$  - диапазон перестройки несущей частоты от импульса к импульсу,  $\tau_{\text{ИЗМ}}$  - среднее значение длительности излучаемых импульсов,  $\Delta \tau_{\text{ИЗМ}}$  - диапазон изменения длительности излучаемых импульсов от посылки к посылке,  $T_{\text{ИЗМ}}$  - среднее значение периода повторения импульсов,  $\Delta T_{\text{ИЗМ}}$  - величина диапазона вобуляции (перестройки) периода следования импульсов,  $F_{\text{ДИЗМ}}$  - среднее значение внутримпульсной девиации частоты (ширины спектра) сигнала,  $\Delta F_{\text{ДИЗМ}}$  - диапазон изменения внутримпульсной девиации частоты от импульса к импульсу.

Эталонные описания распознаваемых типов источников радиоизлучений представлены в виде интервалов ( $\alpha_{\nu}^{\text{мин}}$ ,  $\alpha_{\nu}^{\text{макс}}$ ) указанных выше параметров сигналов (словаря сигнальных признаков), где  $\alpha_{\nu}^{\text{мин}}$ ,  $\alpha_{\nu}^{\text{макс}}$  - минимальное и максимальное значения  $\nu$ -го признака,  $\nu = 1, \dots, 8$ .

Формирование случайного вектора входных признаков осуществлялось с помощью датчиков случайных чисел путем выбора (по равномерному закону) случайных значений указанных параметров из диапазонов их возможных значений, представленных в базе эталонных описаний распознаваемых типов источников радиоизлучений. Для этого с помощью равномерного датчика случайных чисел выбирался один из режимов распознаваемых типов, представленных в экспериментальной базе данных (БД), и на основе эталонного описания выбранного режима формировались конкретные значения параметров входного вектора.

Принятие решения о принадлежности входного вектора к одному из распознаваемых типов источников радиоизлучений для каждого из исследуемых алгоритмов осуществлялось по величине достаточных статистик, вычисляемых по следующим формулам:

а) для статистического алгоритма [1]:

$$\gamma(A_{\text{ИЗМ}}) = \arg \max_{i=1 \dots M} \max_{j=1 \dots m_i} \max_{r=1 \dots n_{ij}} \prod_{v=1}^N \varphi_{ijr}(A_{\text{ИЗМ}})$$

где M - число классов,  $m_i$  - число типов,  $n_{ij}$  - число режимов источников радиоизлучений;

$$\varphi_{ijr}(\alpha) = \frac{1}{\alpha_{ijr,v}^{\text{макс}} - \alpha_{ijr,v}^{\text{мин}}} \left[ \Phi \left( \frac{\alpha_{ijr,v}^{\text{макс}} - \alpha_{\nu, \text{ИЗМ}}}{\sigma_{\nu}} \right) - \Phi \left( \frac{\alpha_{ijr,v}^{\text{мин}} - \alpha_{\nu, \text{ИЗМ}}}{\sigma_{\nu}} \right) \right]$$

если эталонный признак является "интервальным", и по формуле:

$$\varphi_{ijr}(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{ijr,v}} e^{-\frac{(\alpha_{\nu, \text{ИЗМ}} - \alpha_{ijr,v})^2}{2\sigma_{ijr,v}^2}}$$

если эталонный признак является "точечным";

где  $\Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^u e^{-\frac{t^2}{2}} dt$  - интеграл вероятности (функция

Лапласа),  $u = \frac{\alpha_v - \alpha_v^*}{\sigma_v}$  - аргумент функции Лапласа;

б) для алгоритма минимума расстояния:

$$j_{opt}(A_{изм}(\alpha)) = \arg \min_{i=1, \dots, J} \left[ (A_{изм}(\alpha) - A_{i,эм})^T K_A^{-1} (A_{изм}(\alpha) - A_{i,эм}) \right]$$

где  $K_A^{-1}$  - обратная матрица ошибок измерения сигнальных признаков.

Если составляющие  $\alpha_{iv}$  вектора  $A_{изм}(\alpha)$  являются взаимно независимыми, то данный алгоритм может быть представлен в виде:

$$\gamma(A_{изм}) = \arg \min_{i=1, \dots, M} \sum_{j=1, \dots, m}^N \frac{(\alpha_{изм} - \alpha_{ijv})^2}{\sigma_v^2}$$

где  $\sigma_v^2$  - дисперсия ошибки измерения v-го параметра.

Процедура нахождения оптимального решения в соответствии с критерием минимума расстояния заключается в вычислении совокупности взвешенных расстояний

$A_{изм}(\alpha) - A_{i,эм}$  и отнесении вектора измеренных признаков к тому классу (типу), для которого это расстояние является минимальным.

Вычисление достаточных статистик осуществлялось по результатам статистической обработки результатов распознавания при подаче на входы исследуемых алгоритмов случайного вектора сигнальных признаков ИРИ i-го типа путем многократной имитации его значений по нормальному закону с заданными значениями дисперсии  $\sigma_v^2$ . Выходные эффекты всех трех алгоритмов нормировались относительно их максимальных значений и отображались на графике в пределах  $\pm 1$  шагов относительно номера того типа источников радиоизлучений, которому соответствует максимальное значение рассчитанной статистики. Графики достаточных статистик, формируемых статистическим (линия 1), логическим (линия 2) и алгоритмом минимума расстояния (линия 3) при подаче на их входы одного и того случайного вектора сигнальных признаков при значениях ошибок  $\sigma_r=1,0$  МГц,  $\sigma_\tau=1$  мкс показаны на рис. 1. Эти графики дают наглядное представление, как об эффективности исследуемых алгоритмов, так и об информативности и степени пересечения эталонных описаний распознаваемых типов источников радиоизлучений на выбранном языке сигнальных признаков. Для сравнения на рис. 2 приведены результаты расчетов выходных эффектов этих же алгоритмов при  $\sigma_r=0,1$  МГц,  $\sigma_\tau=1$  мкс и  $\sigma_T=1$  мкс.

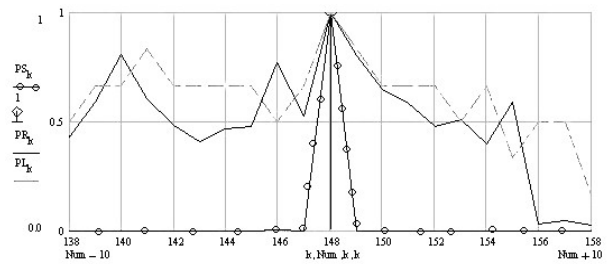


Рис. 1.

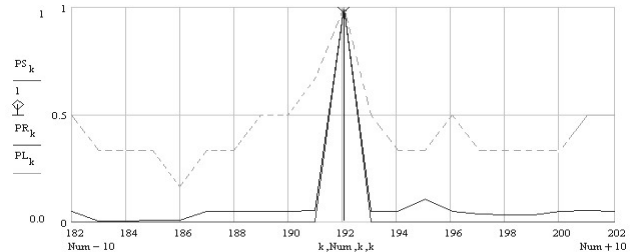


Рис. 2.

### III. Выводы

Проведенные исследования показали, что при использовании словаря сигнальных признаков интервального типа наиболее эффективным является статистический алгоритм распознавания. Менее эффективным является логический алгоритм, который в некоторых случаях выдает неоднозначные решения, состоящие из нескольких (правильного и близких к нему) типов источников радиоизлучений. При достаточно больших ошибках измерения параметров сигналов логический алгоритм и алгоритм распознавания по минимуму расстояния имеют большие уровни боковых выбросов, что приводит к ошибочным решениям. При уменьшении ошибок измерения параметров излучений (признаков) уровни боковых выбросов логического алгоритма уменьшаются, а его эффективность приближается к эффективности статистического алгоритма. Наихудшей эффективностью в данном случае обладает алгоритм распознавания по минимуму расстояния, который достаточно часто выдает ошибочные решения.

### IV. Список литературы

- [1] Горелик А.Л., Скрипкин В.А. Методы распознавания. – М.: Высшая школа, 1984. – 208 с.
- [2] Амеликин С.А. Обобщенное расстояние Евклида-Махаланобиса и его свойства / С.А. Амеликин, А.В. Захаров, В.М. Хачумов // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2006. – No 4. – С. 40–44.