

УДК 621.396.96

DOI: [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2020.1\(25\).72-79](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2020.1(25).72-79)

И. М. НИКОЛАЕВ, кандидат технических наук,
старший научный сотрудник

<https://orcid.org/0000-0002-1250-9918>

(Харьковский национальный университет
Воздушных Сил им. И. Кожедуба, г. Харьков)

Н. М. КАЛЮЖНЫЙ, кандидат технических наук,
старший научный сотрудник

<https://orcid.org/0000-0003-0964-6062>

А. В. ХРЯПКИН, кандидат технических наук,
доцент

<https://orcid.org/0000-0003-4730-3327>

(Харьковский национальный университет
радиоэлектроники, г. Харьков)

Методика решения задачи распознавания радиоизлучающих летательных аппаратов на основе алгоритма вычисления оценок подобия

Излагается методика применения алгоритма вычисления оценок подобия для решения задачи распознавания летательных аппаратов (ЛА) по параметрам излучения бортовых радиолокационных станций (БРЛС). Методика предусматривает приведение совокупности параметров излучения БРЛС, которые могут являться сигнальными признаками ЛА, и каталога их эталонных описаний на выбранном языке сигнальных признаков к логическому виду $\{0, 1\}$ с помощью введения эталонного описания наиболее типичной БРЛС и установления мер близости значений признаков эталонного класса с принятым вектором сигнальных признаков. Работоспособность алгоритма проиллюстрирована на примере распознавания пяти классов ЛА при использовании в качестве сигнальных признаков восьми параметров излучения БРЛС. На основе результатов моделирования показано, что этот алгоритм может обеспечить высокую вероятность распознавания большого числа классов радиоизлучающих ЛА при оптимальном правиле вычисления близости объектов в выбранном пространстве сигнальных признаков.

Ключевые слова: распознавание, алгоритм вычисления оценок, радиоизлучающий летательный аппарат, бортовая радиолокационная станция, параметры излучения, сигнальные признаки.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из возможных методов решения задачи распознавания радиоизлучающих летательных аппаратов (ЛА) по сигнальным признакам, связанным со структурой и параметрами излучения бортовых радиоэлектронных станций (БРЛС), является использование алгоритмов, основанных на вычислении оценок подобия (АВО) [1–4]. Метод вычисления оценок подобия широко используется для решения задач классификации объектов и явлений в различных областях практической деятельности [5–7]. В основе решения этих задач лежит применение модели алгоритмов распознавания, основанной на вычислении оценок подобия распознаваемых объектов и прецедентов. Достоинством этих алгоритмов является то, что в них решение о классе наблюдаемого объекта принимается на основе сопоставления всех или определенных сочетаний признаков, входящих в описание объектов распознавания.

В связи с этим задача описания методического подхода к решению задачи распознавания радиоизлучающих ЛА на основе АВО в современных средствах радиоэлектронного наблюдения (РЭН), предназначенных для контроля воздушного пространства, имеет важное практическое значение.

В настоящее время существует большое количество публикаций, посвященных различным аспектам применения алгоритмов, основанных на вычислении оценок подобия, для классификации геологических, биологических, медицинских и других объектов и/или явлений [2–4]. В работах [5–7] исследуются алгоритмы классификации лиц, документов и других объектов при использовании в качестве признаков метрик сходства в заданном пространстве признаков. Методический подход к решению задачи распознавания радиоизлучающих объектов на основе модели АВО рассмотрен в [8] на примере решения задачи распознавания наземных РЛС. Однако в этой работе не учитывается возможность совместного распознавания на основе модели АВО классов (типов), типов БРЛС и состояний ЛА, которые могут быть классифицированы по изменению режимов работы БРЛС [9]. Как показал проведенный анализ, в известной зарубежной и отечественной научно-технической литературе отсутствуют публикации, посвященные решению задачи распознавания ЛА по параметрам излучения БРЛС на основе модели АВО, что обуславливает необходимость проведения исследований в этом направлении.

Целью статьи является изложение методики применения в средствах РЭН алгоритма вычисления оценок подобия для решения задачи распознавания радиоизлучающих ЛА по совокупности частотно-временных параметров излучения бортовых радиолокационных станций (БРЛС).

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Сущность АВО применительно к задаче распознавания радиоизлучающих ЛА состоит в вычислении оценок подобия, характеризующих «близость» распознаваемого и эталонных объектов по системе ансамблей

сигнальных признаков, связанных со структурой и параметрами излучения бортовых РЛС. Методика решения задачи распознавания радиоизлучающих ЛА с использованием АВО базируется на теоретических положениях, приведенных в [1–4, 8], и предусматривает выполнение следующих шагов:

1) выделяется совокупность параметров излучения БРЛС, которые могут являться сигнальными признаками ЛА, на основе которых составляется каталог эталонных описаний распознаваемых классов ЛА на выбранном языке сигнальных признаков;

2) вводятся критерии близости на множестве сигнальных признаков, описывающих распознаваемые классы ЛА и типы БРЛС;

3) задается правило, позволяющее вычислить оценку подобия эталонного описания объекта и реализации вектора сигнальных признаков распознаваемого ЛА;

4) задаются правила формирования оценок подобия и формирования суммарной оценки для каждого из классов (типов) распознаваемых ЛА;

5) задается правило принятия решения, которое на основе оценок подобия, полученных для заданного алфавита классов (типов) ЛА и типов БРЛС, обеспечивает отнесение распознаваемого объекта к одному из классов ЛА.

Задача распознавания радиоизлучающих ЛА на основе АВО может быть сформулирована следующим образом: имеется алфавит классов (типов) ЛА $\Lambda_{ЛА} = \{\Lambda_1, \Lambda_2, \dots, \Lambda_m, \dots, \Lambda_M\}$, каждый из которых описывается N признаками из априорного словаря $A_{анп}(\alpha_v) = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N\}$. Решения о принадлежности наблюдаемого объекта к одному из классов (типов) заданного алфавита принимается на основе сравнения измеренных параметров излучения (сигнальных признаков) наблюдаемого объекта с априорными эталонными описаниями распознаваемых классов ЛА. В качестве сигнальных признаков обычно используются значение несущей частоты f_o , длительность импульсов $\tau_{и}$, ширина спектра импульса $\Delta F_{и}$, период следования импульсов $T_{п}$, длительность серий (пачек) импульсов $\tau_{п}$, период следования серий (пачек) импульсов $T_{п}$, время контакта (облучения) средства РЭН с источником радиоизлучения $\tau_{обл}$, период облучения $T_{обл}$. В дополнение к этим признакам могут использоваться вид и параметры закона внутримпульсной модуляции, параметры перестройки несущей частоты от импульса к импульсу и/или от пачки импульсов к пачке импульсов, параметры перестройки длительности и периода следования импульсов и/или длительности и периода следования пачек импульсов.

Для упрощения вычислительных процедур в модели АВО признаки эталонного описания и принятые сигнальные признаки приводятся к логическому виду $\{0, \neq 1\}$ с помощью введения эталонного описания наиболее типичной (гипотетической) БРЛС и установления мер близости значений признаков эталонного класса с принятым вектором сигнальных признаков: $|\alpha_{vij} - \alpha_{vij}^{\text{эт}}| \leq \varepsilon_v$. При этом применяется правило: 1 – разность между эталонным значением и реализацией признака не более ε , т. е. признак выражен; 0 – признак не

выражен. В ряде случаев признаки могут принимать значения из множества $\{0, \neq 1, \neq x\}$, где x означает, что информация о признаке отсутствует. Однако в этом случае усложняется задача выбора меры близости ε_v .

Априорная информация, содержащая приведенные к логическому виду $\{0, \neq 1\}$ описания ЛА всех распознаваемых классов на языке сигнальных признаков $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N)$, представляется в виде таблицы T_{MN} размерности $M \times N$, где $M = m_1 + m_2 + \dots + m_k + \dots + m_M$, а m_k – количество типов ЛА, образующих k -й класс. Строки таблицы T_{MN} , характеризующие признаки каждого из объектов $\lambda_{11}, \lambda_{12}, \lambda_{13}, \lambda_{21}, \lambda_{22}, \dots, \lambda_{2k}, \dots, \lambda_{m1}, \lambda_{m2}, \dots, \lambda_{mq}, \dots, \lambda_{M1}, \lambda_{M2}, \dots, \lambda_{Mg}$ обозначаются через $S_{11}, S_{12}, S_{13}, S_{21}, S_{22}, \dots, S_{2k}, \dots, S_{m1}, S_{m2}, \dots, S_{mq}, \dots, S_{M1}, S_{M2}, \dots, S_{Mg}$. Входной вектор сигнальных признаков, характеризующий наблюдаемый ЛА неизвестного класса (типа) λ_x , также приводится к логическому виду $\{0, \neq 1\}$ и представляется в виде строки S_{lx} .

При использовании АВО решение о классе (типе) наблюдаемого объекта принимается по результатам сравнения реализации λ_x с априорными описаниями λ_{lx} всех объектов, содержащихся в таблице T_{MN} , и принятия решения о том, к какому классу отнести объект. Классификация основана на вычислении оценки степени схожести объекта λ_x с объектами, принадлежность которых к классам (типам) ЛА известна. Эта процедура включает в себя два этапа: сначала подсчитывается оценка для каждого объекта из таблицы T_{MN} , а затем полученные оценки используются для получения суммарных оценок по каждому из классов Λ_m . Далее проверяется сходство строки распознаваемого объекта S_{lx} со строками $S_{11}, S_{12}, S_{13}, S_{21}, S_{22}, \dots, S_{2k}, \dots, S_{m1}, S_{m2}, \dots, S_{mq}, \dots, S_{M1}, S_{M2}, \dots, S_{Mg}$ таблицы T_{MN} , принадлежащими объектам каждого из классов ЛА. Число строк по каждому из классов, сходных распознаваемой строке S_{lx} , обозначается как $\Gamma(\lambda_x, \Lambda_1)$ – по первому классу ЛА, Λ_2 , $\Gamma(\lambda_x, \Lambda_2)$ – по второму классу ЛА, \dots , $\Gamma(\lambda_x, \Lambda_M)$ – по M -у классу ЛА. Оценки, полученные в виде числа строк, суммируются и сравниваются между собой по классам на наибольшую величину [1–4, 8]:

$$\Gamma(\lambda_x, \Lambda_1) = \Gamma_{S_{11}}(\lambda_x, \Lambda_1) + \Gamma_{S_{12}}(\lambda_x, \Lambda_1) + \dots + \Gamma_{S_{1q}}(\lambda_x, \Lambda_1) = \sum_{S_{1q}} \Gamma(\lambda_x, \Lambda_1);$$

$$\Gamma(\lambda_x, \Lambda_M) = \Gamma_{S_{M1}}(\lambda_x, \Lambda_M) + \Gamma_{S_{M2}}(\lambda_x, \Lambda_M) + \dots + \Gamma_{S_{Mq}}(\lambda_x, \Lambda_M) = \sum_{S_{Mq}} \Gamma(\lambda_x, \Lambda_M).$$

На основании сравнения принимается решение либо об отнесении распознаваемого объекта λ_x к одному из классов Λ_m , $m = \overline{1, M}$, либо об отказе от его распознавания. В качестве решающего правила используется максимальная оценка степени подобия признаков наблюдаемого ЛА с эталонными описаниями распознаваемых классов (типов) ЛА заданного алфавита. Вычисление оценок, определяющих принадлежность распознаваемого объекта к определенному классу и типу, осуществляется по формулам, приведенным в [1–4, 8]:

$$\Gamma_l(\lambda_x) = \frac{1}{r} \sum_r (2^{p(\lambda_{mr}, \lambda_x)} - 1),$$

где r – число типов объектов в классе; $p(\lambda_{mr}, \lambda_x)$ – величина, представляющая собой сумму оценок совпадения при сравнении вектор-реализации полученных признаков объекта λ_x с эталонными признаками табл. 1.

Таблица 1. Фрагмент априорного описания распознаваемых классов ЛА на выбранном языке сигнальных признаков

ЛА	Тип БРЛС	$\Delta f_{рц}$, ГГц	$\tau_{имп}$, мкс	$T_{имп}$, мкс	$\Delta F_{с'}$, МГц	$\tau_{пач}$, мс	$T_{пач}$, мс	$\tau_{обл}$, мс	$T_{обл}$, с
Λ_1	λ_{11}	8,9-9,3	3,3-3,5	4900-5000	0,23-0,3	12,0-13,0	3900-4100	12,0-13,0	3,9-4,1
	λ_{12}	9,5-10,3	14,0-15,0	900-1000	2,4-2,5	23,5-24,5	4900-5100	23,5-24,5	4,9-5,1
	λ_{13}	13,4-14,0	50,0-60,0	1400-1500	1,0-1,1	21,1-21,5	7800-8200	21,1-21,5	7,8-8,2
Λ_2	λ_{21}	8,5-9,9	0,5-5,0	400-2500	2,0-4,0	19,0-21,0	25,0-26,0	120,0-130,0	3,1-3,4
	λ_{22}	8,5-9,6	0,6-0,7	830-840	1,4-1,6	7,4-7,6	9,9-10,0	29,9-30,1	8,9-9,1
	λ_{23}	8,5-9,9	4,0-5,0	450-500	1,8-2,6	24,0-25,0	25,0-26,0	120,0-130,0	3,1-3,4
Λ_3	λ_{31}	8,5-9,9	10,0-15,0	400-500	4,0-6,0	24,0-25,0	25,0-26,0	120,0-130,0	3,1-3,4
	λ_{32}	8,5-9,9	7,0-10,5	60,0-75,0	3,5-4,0	4,0-4,6	3,5-4,2	15,0-18,0	1,5-1,8
	λ_{33}	9,0-10,0	1,4-1,5	1560-1570	0,6-0,8	35,0-37,0	7150-7250	35,0-37,0	7,1-7,3
Λ_4	λ_{41}	9,3-9,4	1,9-4,6	900-2550	0,2-0,25	42,0-44,0	950-1050	42,0-44,0	0,9-1,1
	λ_{42}	9,3-9,4	0,3-1,1	450-1050	0,9-1,1	42,0-44,0	2800-2900	42,0-44,0	2,8-2,9
	λ_{43}	9,3-9,5	0,7-0,8	970-980	1,2-1,3	8,5-8,8	13,3-13,6	40,5-41,0	9,4-9,5
	λ_{44}	9,3-9,4	2,4-2,5	2495-2505	0,4-0,45	32,0-33,0	8900-9100	32,0-32,5	8,9-9,1
	λ_{45}	9,3-9,4	1,9-2,1	2220-2240	0,4-0,5	40,0-45,0	2500-3000	40,0-45,0	2,5-3,0
Λ_5	λ_{51}	0,41-0,46	10,5-19,5	3350-4650	1,2-1,4	225-235	11900-12100	225-235	11-12
	λ_{52}	3,1-3,4	80-84	8400-9300	1,2-1,4	39,0-41,0	9999-10001	39,0-41,0	9,9-10

Решение о принадлежности распознаваемого объекта осуществляется по максимальному значению оценки класса $\Gamma_i(\lambda_x)$ и оценки типа ЛА $p(\lambda_{mr}, \lambda_x)$.

Проиллюстрируем изложенный подход к реализации процедуры распознавания классов ЛА по параметрам излучений БРЛС с использованием АВО, для чего воспользуемся фрагментом априорного описания пяти гипотетических классов ЛА (табл. 1), в котором априорная информация о ЛА представлена в виде интервалов возможных значений (ИВЗ) следующих параметров излучения БРЛС: $\Delta f_{рц} = [f_o^{min}, f_o^{max}]$ – ИВЗ рабочей (несущей) частоты; $[\tau_u^{min}, \tau_u^{max}]$ – ИВЗ длительностей импульсов; $[\Delta F_u^{min}, \Delta F_u^{max}]$ – ИВЗ ширины спектра излучения; $[T_{п}^{min}, T_{п}^{max}]$ – ИВЗ периода повторения импульсов; $[\tau_{п}^{min}, \tau_{п}^{max}]$ – ИВЗ длительностей пачки импульсов; $[T_{п}^{min}, T_{п}^{max}]$ – ИВЗ период следования пачек импульсов; $[\tau_{обл}^{min}, \tau_{обл}^{max}]$ – ИВЗ времени контакта средства РЭН с радиоизлучающим объектом (длительности облучения); $[T_{обл}^{min}, T_{обл}^{max}]$ – ИВЗ периода облучения.

Этот фрагмент составлен расчетно-аналитическим методом в соответствии с методикой, описанной в [6], на основе данных о принципах функционирования, типах, режимах работы и параметрах излучения БРЛС ЛА различного назначения, приведенных в [10–29]. Он является частью эталонной базы данных, предназначенной для тестирования имитационно-математической модели оценки эффективности распознавания классов (типов) ЛА по параметрам излучения бортовых РЭС, описанной в [30].

Параметры излучения и мера (критерии) близости, выбранные для преобразования априорного описания распознаваемых классов ЛА к единому логическому представлению в виде множества $\{0, 1\}$, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры излучения и меры близости, выбранные для преобразования априорного описания распознаваемых классов ЛА к единому логическому представлению в виде множества $\{0, 1\}$

Признаки	$\Delta f_{рц}$, ГГц	$\tau_{имп}$, мкс	$T_{имп}$, мкс	$\Delta F_{с'}$, МГц	$\tau_{пач}$, мс	$T_{пач}$, мс	$\tau_{обл}$, мс	$T_{обл}$, с
Значения признаков	9,6	12,5	2000,0	1,5	20,0	3000	100	3,0
Мера близости ϵ	$\pm 0,3$	$\pm 3,5$	± 500	$\pm 0,5$	$\pm 5,0$	± 2500	± 50	$\pm 2,5$

Результатом сравнения эталонных параметров со всеми признаками, приведенными в табл. 2, является содержание табл. 3. Табл. 3 иллюстрирует содержимое таблицы T_{MN} .

Таблица 3. Априорная информация об объектах и признаках, приведенная к логическому виду

Класс ЛА	Тип РЛС	$\Delta f_{рц}$, ГГц	$\tau_{имп}$, мкс	$T_{имп}$, мкс	$\Delta F_{с'}$, МГц	$\tau_{пач}$, мс	$T_{пач}$, мс	$\tau_{обл}$, мс	$T_{обл}$, с
Λ_1	λ_{11}	0	0	0	0	0	1	0	1
	λ_{12}	1	1	1	0	1	1	0	1
	λ_{13}	0	0	1	1	1	0	0	0
Λ_2	λ_{21}	1	0	1	0	1	0	1	1
	λ_{22}	1	0	1	1	0	0	0	0
	λ_{23}	1	0	0	0	1	0	1	1
Λ_3	λ_{31}	1	1	0	0	1	0	1	1
	λ_{32}	1	0	0	0	0	0	0	1
	λ_{33}	1	0	1	1	1	0	0	0

Λ_4	λ_{41}	1	0	1	0	0	1	0	1
	λ_{42}	1	0	1	1	0	1	0	1
	λ_{43}	1	0	1	1	0	0	0	0
	λ_{44}	1	0	1	0	0	0	0	0
	λ_{45}	1	0	1	0	0	1	0	1
Λ_5	λ_{51}	0	1	1	1	0	0	0	0
	λ_{52}	0	0	0	1	0	0	0	0

Предположим, что на распознавание поступил вектор параметров от радиоизлучающего объекта неизвестного класса, измеренные значения сигнальных признаков которого и его реализация, приведенная к логическому виду, представлены в табл. 4.

Таблица 4. Измеренные значения сигнальных признаков от радиоизлучающего объекта неизвестного класса и его реализация λ_x , приведенная к логическому виду

Признаки	$\Delta f_{\text{рц}}$ ГГц	$\tau_{\text{имп}}$ мкс	$T_{\text{имп}}$ мкс	$\Delta F_{\text{с}}$ МГц	$\tau_{\text{пач}}$ мс	$T_{\text{пач}}$ мс	$\tau_{\text{обл}}$ мс	$T_{\text{обл}}$ с
Измеренные значения сигнальных признаков ЛА неизвестного класса	9,38	2,0	1700	0,55	41,5	3500	41,5	5,0
Реализация признаков λ_x	1	0	1	0	0	1	1	1

Проведем сравнение принятой реализации λ_x с априорными описаниями классов ЛА и определим величины $p(\lambda_{mr}, \lambda_x)$ для каждого из классов ЛА, приведенных в табл. 3. В результате сравнения реализации λ_x с описаниями БРЛС λ_{11} , λ_{12} и λ_{13} класса Λ_1 получим $p(\lambda_{11}, \lambda_x) = 5$, $p(\lambda_{12}, \lambda_x) = 5$, $p(\lambda_{13}, \lambda_x) = 2$. В этом случае оценка степени подобия реализации λ_x по классу Λ_1 составит $G_1(\lambda_x) = 1/3[(2^5 - 1) + (2^5 - 1) + (2^2 - 1)] = 21,67$ (ед.). В результате сравнения реализации λ_x с описаниями БРЛС λ_{21} , λ_{22} и λ_{23} класса Λ_2 соответственно получим $p(\lambda_{21}, \lambda_x) = 5$, $p(\lambda_{22}, \lambda_x) = 4$, $p(\lambda_{23}, \lambda_x) = 5$. При этом оценка степени подобия реализации λ_x по классу Λ_2 будет равна $G_2(\lambda_x) = 1/3[(2^5 - 1) + (2^4 - 1) + (2^5 - 1)] = 25,67$ (ед.).

Аналогично по классу Λ_3 получим $p(\lambda_{31}, \lambda_x) = 4$, $p(\lambda_{32}, \lambda_x) = 5$, $p(\lambda_{33}, \lambda_x) = 2$, при этом оценка подобия составит $G_3(\lambda_x) = 1/3[(2^4 - 1) + (2^5 - 1) + (2^2 - 1)] = 18,3$ (ед.). Для класса Λ_4 $p(\lambda_{41}, \lambda_x) = 7$, $p(\lambda_{42}, \lambda_x) = 6$, $p(\lambda_{43}, \lambda_x) = 4$, $p(\lambda_{44}, \lambda_x) = 5$, $p(\lambda_{45}, \lambda_x) = 6$, при этом оценка степени подобия составит $G_4(\lambda_x) = 1/5[(2^7 - 1) + (2^6 - 1) + (2^4 - 1) + (2^5 - 1) + (2^6 - 1)] = 59,8$ (ед.). Для класса Λ_5 получим $p(\lambda_{51}, \lambda_x) = 2$, $p(\lambda_{52}, \lambda_x) = 2$, при этом оценка степени подобия $G_5(\lambda_x) = 1/2[(2^2 - 1) + (2^2 - 1)] = 3$ (ед.).

Исходя из условия $G_4(\lambda_x) > G_2(\lambda_x) > G_1(\lambda_x) > G_3(\lambda_x) > G_5(\lambda_x)$ принимаем решение о принадлежности принятой реализации признаков к классу Λ_4 . Оценивая значения величин $p(\lambda_{mr}, \lambda_x)$ в пределах признаков эталонного описания класса Λ_4 , устанавливаем, что параметры распознаваемой БРЛС принадлежат типу λ_4 . При этом решение о принадлежности распознаваемой БРЛС осуществляется по максимальному значению оценки класса $G_m(\lambda_x)$ и оценки типа БРЛС $p(\lambda_{mr}, \lambda_x)$.

Проверка работоспособности АВО на компьютерной математической модели, описанной в [30], показала, что этот алгоритм при использовании эталонной базы данных, содержащей 129 строк априорного описания 44 типов ЛА, разбитых на 8 классов, по вектору сигнальных признаков, содержащему 12 параметров, характеризующих режимы работы бортовых РЛС, обеспечивает распознавание типов ЛА с вероятностью 0,7 и распознавание классов ЛА с вероятностью более 0,8.

Целью дальнейших исследований является сравнение возможностей АВО с возможностями других алгоритмов распознавания радиоизлучающих ЛА в зависимости от размерности и состава алфавитов распознаваемых классов (типов) ЛА, классов (типов) бортовых РЛС и классов излучений бортовых средств радиосвязи (СРС), состава, информативности и точности измерения сигнальных признаков радиоизлучений бортовых РЛС и СРС, полноты и достоверности априорных баз данных и других факторов.

ВЫВОДЫ

Результаты моделирования показали, что АВО может обеспечить достаточно высокую эффективность распознавания большого числа классов ЛА при его правильной настройке по обучающей выборке, в процессе которой подбираются близкие к оптимальным правила вычисления оценок близости объектов в выбранном пространстве сигнальных признаков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Журавлёв Ю. И. Об алгебраическом подходе к решению задач распознавания или классификации. Проблемы кибернетики. 1978. Вып. 33. С. 5–68. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ccas.ru/frc/papers/zhuravlev78prob33.pdf>.
2. Журавлев Ю. И., Камиллов М. М., Туляганов Ш. Е. Алгоритмы вычисления оценок и их применение. Ташкент: Фан. 1974. 119 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.twirpx.com/file/499388/>.
3. Дьяконов А. Г. Алгебра над алгоритмами вычисления оценок (учебное пособие). М.: МГУ им. М. В. Ломоносова. 2005. 70 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://alexanderdyakonov.narod.ru/avo.pdf>.
4. Фазылов Ш. Х., Мирзаев Н. М., Раджабов С. С. Построение модели алгоритмов вычисления оценок с учётом большой размерности признакового пространства. Вестн. СГТУ. 2012. № 1(64). Вып. 2. С. 274–279.
5. Aleksander Lynchenko, Aleksander Sheshkus and Vladimir L. Arlazarov. Document image recognition algorithm based on similarity metric robust to projective distortions for mobile devices. Proc. SPIE 11041, Eleventh Intern. Conf. on Machine Vision (ICMV 2018). 110411K (15 March 2019). <https://doi.org/10.1117/12.2523152>.
6. Chi-Kien Tran & Tsair-Fwu Lee. Improving Face Recognition Performance Using Similarity Feature-based

- Selection and Classification Algorithm. *J. of Information Hiding and Multimedia Signal Processing*. 2015. Ubiquitous Intern. Vol. 6, № 1, January 2015.
7. Yihua Chen, Eric K. Garcia, Maya R. Gupta, Ali Rahimi & Luca Cazzanti. Similarity-based Classification: Concepts and Algorithms. *J. of Machine Learning Research*. № 10. 2009. Pp. 747–776. Publ. 3/09.
 8. Кудрявцев А. М. Обработка разведывательной информации (учебное пособие). Л.: ВАС им. С. М. Буденного. 1989. 332 с.
 9. Николаев И. М. Методика априорного описания летательных аппаратов на основе сигнальных признаков, связанных со структурой и параметрами излучения бортовых радиолокационных станций. Озброєння та військова техніка. Київ: ЦНДІ ОВТ. № 3(23). 2019. С. 67–77.
 10. Нечаев Е. Е., Дерябин К. С. Современные бортовые радиолокационные станции и антенные решетки многофункциональных авиационных комплексов военного назначения (по материалам открытой печати). *Научн. Вестн. МГТУ ГА*. 2015. № 221. С. 90–105. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <file:///D:/Users/Admin/Downloads/sovremennye-bortovye-radiolokatsionnye-stantsii-i-antennnye-reshetki-mnogofunktsionalnyh-aviatsionnyh-kompleksov-voennogo.pdf>.
 11. Антипов В. Н., Меркулов В. И., Самарин О. Ф., Чернов В. С. Основные направления развития авиационных бортовых РЛС. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2009. № 10. С. 7–28. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.twirpx.com/file/390482/>.
 12. Перунов Ю. М., Мацукевич В. В., Васильев А. А. Зарубежные радиоэлектронные средства / Под ред. Ю. М. Перумова. В 4-х кн. Кн. 1. Радиолокационные системы. М.: Радиотехника, 2010. 336 с.
 13. Рябкин Ю. В. Установление информативных параметров типовых источников радиоизлучений для их идентификации. *Наук. Пр. Донецького нац. техн. ун-ту. Серія: “Обчислювальна техніка та автоматизація”*. Вип. 88. Донецьк: ДонНТУ, 2005. С. 145–152. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ea.donntu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/16330/1/145-151.pdf>.
 14. Боков А. Радиоэлектронное оборудование бомбардировщика В-1В. *Зарубежное военное обозрение* №2. 1989. С. 44–50. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://pentagonus.ru/publ/radioehlektronnoe_oborudovanie_bombardirovshhika_b_1b/18-1-0-1288.
 15. Бобков А. БРЭО тактического истребителя F-16 / *Зарубежное военное обозрение*. 2007. № 12. С. 50–57. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://pentagonus.ru/publ/18-1-0-546>.
 16. Михов М. Прицельные РЛС самолётов тактической авиации стран НАТО. *Зарубежное военное обозрение*. 1990. №8. С. 38–43. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://pentagonus.ru/publ/16-1-0-679>.
 17. Бобков А. Авиационные средства дальнего радиолокационного обнаружения и управления иностранных государств (Е-2С). *Зарубежное военное обозрение*. 2006. № 6. С. 43–46. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://pentagonus.ru/publ/17-1-0-338>.
 18. AWACS Surveillance Radar. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.northropgrumman.com/capabilities/awacsapy2/documents/awacs.pdf>.
 19. E-2C Hawkeye. *Авиационная энциклопедия «Уголок неба»*. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.airwar.ru/enc/spy/e2c.html>.
 20. Никольский М. С. В-1В. [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://www.aviation-gb7.ru/B-1.htm>.
 21. Дальний топливозаправщик KC-135 Stratotanker. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://worldweapon.ru/sam/kc135.php>.
 22. KC-135. *Авиационная энциклопедия «Уголок неба»*. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.airwar.ru/enc/craft/kc135.html>.
 23. F-16E/F Block 60 Desert Falcon. *Авиационная энциклопедия «Уголок неба»*. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.airwar.ru/enc/fighter/f16df.html>.
 24. AN/APG-77. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/AN/APG-77>.
 25. AN/APG-79 AESA Radar Active Electronically Scanned Array. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.raytheon.com/capabilities/products/apg79aesa/>.
 26. AN/APS-145. Advanced Airborne Surveillance Radar. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://digilander.libero.it/humboldt/pdf/ANAPS-145.pdf>.
 27. AN/APQ-164(V) – Archived 10/97. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.forecastinternational.com/archive/dispatch_old_pdf.cfm?
 28. РЛС AN/APQ-164 бомбардировщика В-1В. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.militaryparitet>.
 29. AN/APN-59. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.radartutorial.eu/19.kartei/08.airborne/karte027.en.html>.
 30. Безрук В. М., Калужный Н. М., Николаев И. М., Хряпкин А. В. Имитационно-математическое моделирование комплексного распознавания радиоизлучающих объектов по совокупности параметров сигналов радиоэлектронных средств. Сб. научн. тр. 6-го Межд. радиоэлектронного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития». Конф. «Радиолокация, спутниковая навигация, радиомониторинг». Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ. Точка. 2017. С. 288–293.

REFERENCES

1. Zhuravlov, Yu. I. (1978). “Ob algebraicheskom podkhode k resheniyu zadach raspoznavaniya ili klassifikatsii” [On the algebraic approach to solving recognition or classification problems], *Problems of Cybernetics*, vol. 33, pp. 5–68. Available at: <http://www.ccas.ru/frc/papers/zhuravlev78prob33.pdf>.

2. Zhuravlev, Yu. I., Kamilov, M. M. & Tulyaganov, S. E. (1974), "Algoritmy vychisleniya otsenok i ikh primeneniye" [*Algorithms for computing estimates and their application*], Tashkent: Fan, 119 p. Available at: <https://www.twirpx.com/file/499388/>.
3. D'yakonov, A. G. (2005), "Algebra nad algoritmami vychisleniya otsenok" (*uchebnoye posobiye*) [*Algebra over algorithms for computing estimates (study guide)*], M.: Moscow State Univ. M.V. Lomonosov, 70 p. Available at: <http://alexanderdyakonov.narod.ru/avo.pdf>.
4. Fazylov, Sh. Kh. (2012), "Postroyeniye modeli algoritmov vychisleniya otsenok s uchotom bol'shoy razmernosti priznakovogo prostranstva" [Construction of a model of algorithms for computing estimates taking into account the large dimension of the attribute space], *Vestn. SGTU*, No 1 (64), vyp. 2, pp. 274–279. Available at: [file:///D:/Users/Admin/Downloads/postroyeniye-modeli-algoritmov-vychisleniya-otsenok-s-uchyotom-bolshoy-razmernosti-priznakovogo-prostranstva%20\(1\).pdf](file:///D:/Users/Admin/Downloads/postroyeniye-modeli-algoritmov-vychisleniya-otsenok-s-uchyotom-bolshoy-razmernosti-priznakovogo-prostranstva%20(1).pdf).
5. Aleksander Lynchenko, Aleksander Sheshkus & Vladimir L. Arlazarov. Document image recognition algorithm based on similarity metric robust to projective distortions for mobile devices. Proc. SPIE 11041, Eleventh Intern. Conf. on Machine Vision (ICMV 2018), 110411K (15 March 2019). Available at: <https://doi.org/10.1117/12.2523152>.
6. Chi-Kien Tran & Tsair-Fwu Lee. (2015). Improving Face Recognition Performance Using Similarity Feature-based Selection and Classification Algorithm. J. of Information Hiding and Multimedia Signal Processing. Ubiquitous Intern. Vol. 6. № 1, January 2015.
7. Yihua Chen, Eric K. Garcia, Maya R. Gupta, Ali Rahimi & Luca Cazzanti. Similarity-based Classification: Concepts and Algorithms. J. of Machine Learning Research, № 10, 2009, pp. 747-776. Published 3/09.
8. Kudryavtsev, A. M. (1989), "Obrabotka razvedyvatel'noy informatsii (uchebnoye posobiye)" [*Processing intelligence information (study guide)*], L.: YOU named after S. M. Budyonny, 332 p.
9. Nikolaev, I. M. (2019), "Metodika apriornogo opisaniya letatel'nykh apparatov na osnove signal'nykh priznakov, svyazannykh so strukturoy i parametrami izlucheniya bortovykh radiolokatsionnykh stantsiy" [A technique for a priori description of aircraft based on signal signs associated with the structure and radiation parameters of airborne radar stations], *Weapons and military equipment*, № 3 (23), pp. 67–77.
10. Nechayev, E. E., Deryabin, K. S. (2015). "Sovremennyye bortovyye radiolokatsionnyye stantsii i antennyye reshetki mnogofunktsional'nykh aviatsionnykh kompleksov voyennogo naznacheniya (po materialam otkrytoy pechati)" [Modern airborne radiolocation stations and antenna arrays of multifunctional aviation complexes for military purposes (based on open press materials)], *Nauchnyy Vestnik MGTU GA Scientific Her. of MGTU GA*, № 221, pp. 90–105. <users/Admin/Downloads/sovremennyye-bortovyye-radiolokatsionnyye-stantsii-i-antennyye-reshetki-mnogofunktsional'nykh-aviatsionnykh-kompleksov-voennogo.pdf>.
11. Antipov, V. N., Merkulov, V. I., Samarin, O.F., Chernov V.S. (2009). "Osnovnyye napravleniya razvitiya aviatsionnykh bortovykh RLS" [The main directions of development of airborne radar], *Successes of modern radio electronics*, № 10, pp. 7–28. <https://www.twirpx.com/file/390482/>.
12. Perumov, Yu. M., Matsukevich, V. V., Vasil'yev A. A., pod red. Perumova, Yu. M. (2010). "Zarubezhnyye radioelektronnyesredstva", kn.1. "Radiolokatsionnyye sistemy" [Foreign Radioelectronic Means, B. 1. Radar systems], *Radio Engineering, M.*, 336 p.
13. Ryabkyn, Yu. V. (2005). "Ustanovleniye ynforymatyvnykh parametrov tipovykh ystochnykov radyoyzlucheniya dlya ykh ydentyfikatsyy" [Determination of informational parameters of typical sources of radio emission for their identification], *Scientific works of Donetsk Nat. Techn. Univ. Series: «Computing and Automation»*. Vol. 88, DonNTU, Donetsk, pp. 145–152. <http://ea.donntu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/16330/1/145-151.pdf>.
14. Bokov, A. (1989). "Radioelektronnoye oborudovaniye bombardirovshchika B-1B" [Radio-electronic equipment of a B-1B bomber], *Foreign Military Review*, № 2, pp. 44–50. http://pentagonus.ru/publ/radioelektronnoye_oborudovaniye_bombardirovshchika_b_1b/18-1-0-1288.
15. Bobkov, A. (2007). "BREO takticheskogo istrebitelya F-16" [F-16 tactical fighter air-borne units], *Foreign military review*, No 12, pp. 50-57. Available at: <http://pentagonus.ru/publ/18-1-0-546>.
16. Mihov, M. (1990). "Pritsel'nyye RLS samolotov takticheskoy aviatsii stran NATO" [Sighting radar tactical aircraft of NATO countries], *Foreign Military Review*, № 8, pp. 38–43. <http://pentagonus.ru/publ/16-1-0-679>.
17. Bobkov, A. (2006). "Aviatsionnyye sredstva dal'nego radiolokatsionnogo obnaruzheniya i upravleniya inostrannykh gosudarstv (E-2C)" [Aviation means of long-range radar detection and control of foreign states (E-2C)], *Foreign military review*, № 6, pp. 43–46. <http://pentagonus.ru/publ/17-1-0-338>.
18. "AWACS Surveillance Radar", available at: <http://www.northropgrumman.com/capabilities/awacsapy2/documents/awacs.pdf>.
19. "E-2C Hawkeye. Aviatsionnaya entsiklopediya «Ugolok neba»" [E-2C Hawkeye. Aviation Encyclopedia «Sky Corner»], available at: <http://www.airwar.ru/enc/spy/e2c.html>.
20. Nikolsky, M. S. "B-1B", available at: <http://www.aviation-gb7.ru/B-1.htm>.
21. "Dal'niy toplivozapravshchik KC-135 Stratotanker" [Far tanker KC-135 Stratotanker], available at: <http://worldweapon.ru/sam/kc135.php>.
22. "KC-135. Aviatsionnaya entsiklopediya «Ugolok neba»" [KC-135. Aviation Encyclopedia «Corner of

- the Sky»], available at: <http://www.airwar.ru/enc/craft/kc135.html>.
23. “F-16E/F Block 60 Desert Falcon”/ Aviatcionnaya entsiklopediya «Ugolok neba» [F-16E / F Block 60 Desert Falcon], available at: <http://www.airwar.ru/enc/fighther/f16df.html>.
 24. AN/APG-77, available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/AN/APG-77>.
 25. AN/APG-79. AESA Radar Active Electronically Scanned Array, available at: <https://www.raytheon.com/capabilities/products/apg79aesa/>.
 26. AN/APS-145. Advanced Airborne Surveillance Radar, available at: <http://digilander.libero.it/humboldt/pdf/ANAPS-145.pdf>.
 27. AN/APQ-164(V), Archived 10/97, available at: https://www.forecastinternational.com/archive/disp_old_pdf.cfm?.
 28. Radar AN/APQ-164 bomber B-1B, available at: <http://www.m.rilitaryparitet>.
 29. AN/APN-59, available at: <http://www.radartutorial.eu/19.kartei/08.airborne/karte027.en.html>.
- Bezruk, V. M., Kalyuzhnyy, N. M., Nikolaev, I. M. & Khryapkin, A. V. (2017), “Imitatsionno-matematicheskoye modelirovaniye kompleksnogo raspoznavaniya radioizluchayushchikh ob”yektov po sovokupnosti parametrov signalov radioelektronnykh sredstv” [Simulation-mathematical modeling of complex recognition of radio-emitting objects by the set of parameters of the signals of radio electronic means], Coll. of scientific papers of the 6th Inter. Radioelectronic Forum “Applied Radioelectronics. Status and development prospects. ”Conf. «Radar, satellite navigation, radio monitoring». Kharkov: ANPRE, KHNURE, Point, pp. 288–293.

Ніколаєв І.М., Калюжний М.М., Хряпкін О.В.

МЕТОДИКА ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ РОЗПІЗНАВАННЯ РАДІОВИПРОМІНЮЮЧИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ НА ОСНОВІ АЛГОРИТМУ РОЗРАХУНКУ ОЦІНОК ПОДІБНОСТІ

Викладається методика застосування алгоритму обчислення оцінок подібності для вирішення задачі розпізнавання літальних апаратів (ЛА) по параметрах випромінювання бортових радіолокаційних станцій (БРЛС). Методика передбачає приведення сукупності параметрів випромінювання БРЛС, які можуть бути сигнальними ознаками ЛА, і каталогу їх еталонних описів на вибраній мові сигнальних ознак до логічного виду $\{0,1\}$ за допомогою введення еталонного опису найбільш типової БРЛС і встановлення критеріїв близькості значень ознак еталонного класу з прийнятим вектором сигнальних ознак. Працездатність алгоритму проілюстрована на прикладі розпізнавання п’яти класів ЛА при використанні в якості сигнальних ознак восьми параметрів випромінювання БРЛС. На основі результатів моделювання

показано, що цей алгоритм може забезпечити досить високу вірогідність розпізнавання великого числа класів радіовипромінюючих ЛА при оптимальному правилі обчислення близькості об’єктів у вибраному просторі сигнальних ознак.

Ключові слова: розпізнавання, алгоритм обчислення оцінок, радіовипромінюючий літальний апарат, бортова станція радіолокації, параметри випромінювання, сигнальні ознаки.

Nikolaev I., Kaluzhny N., Khryapkin A.

RECOGNITION TASKS RADIO-RADIATING AIRCRAFT BASED ON THE ALGORITHM FOR CALCULATING SIMILARITY ASSESSMENTS

The technique of applying the algorithm for calculating similarity estimates for solving the recognition problem of aircraft by the set of signal features associated with the structure and parameters of the radiation of airborne radar stations is described. It is shown that for the implementation of this algorithm it is necessary to select a set of radiation parameters for onboard radar stations, which may be signal signs of aircraft, compile a catalog of reference descriptions of recognizable classes of aircraft on their basis, determine proximity criteria on a set of signal signs describing recognizable classes of aircraft and types of airborne radar stations, set a rule that allows you to calculate the similarity score of the reference description of the object and the implementation of the vector of signal attributes of a recognizable aircraft, set the rules for generating similarity ratings and generate a total score for each of the classes (types) of recognizable aircraft, set a decision rule based on similarity ratings, obtained for a given alphabet of classes (types) of aircraft and types of airborne radar stations, provides recognition of a recognized object to one of the classes of aircraft. To simplify the computational procedures, the characteristics of the reference description and the accepted signal signs are reduced to a logical form by introducing a reference description of the most typical (hypothetical) radar station and establishing measures of proximity of the values of the characteristics of the reference class with the adopted vector of signal signs. The principle of implementation of the algorithm for calculating similarity ratings is illustrated by an example containing a fragment of an a priori description of five classes of aircraft. Based on the simulation results, it is shown that this algorithm can provide a sufficiently high probability of recognizing a large number of classes of radio-emitting aircraft with the optimal rule for calculating the proximity of objects in the selected space of signal attributes.

Keywords: recognition, estimation calculation algorithm, radio emitting aircraft, airborne radar, radiation parameters, signaling signs.

Сведения об авторах:**Николаев Иван Михайлович,**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник научного центра Воздушных Сил Харьковского национального университета Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, г. Харьков, Украина
orcid.org/0000-0002-1250-9918
e-mail: nikolaev49@ukr.net

Ivan Nikolaev

Candidate of Sciences, Senior Research, Senior Research Associate worker of scientific center of Aircrafts Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine
orcid.org/0000-0002-1250-9918
e-mail: nikolaev49@ukr.net

Калюжный Николай Михайлович,

заведующий проблемной НИЛ, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший преподаватель кафедры информационно-сетевой инженерии (по совместительству), Харьковский национальный университет радиоэлектроники, г. Харьков, Украина
<https://orcid.org/0000-0003-0964-6062>
e-mail: mykola.kaliuzhnyi@nure.ua

Mykola Kaliuzhnyi

PhD, Senior Scientist, Head of the problem research laboratory, senior Lecturer of the Department of INE (part-time), Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-0964-6062>
e-mail: mykola.kaliuzhnyi@nure.ua

Хряпкин Александр Владимирович

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры системотехники, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, г. Харьков, Украина
<https://orcid.org/0000-0003-4730-3327>
e-mail: oleksandr.khriapkin@nure.ua

Oleksandr Khriapkin

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of System Engineering Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-4730-3327>
e-mail: oleksandr.khriapkin@nure.ua

Статья поступила в редколлегию 03.12.2019.