

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ В ЗАДАЧАХ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЦИФРОВЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПЛЕКСОВ ПОЛУЧЕНИЯ ВИДОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

Ю.Г. Веселов¹, А.Н. Захарченко², А.С. Островский¹

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: aleksandr_ostrovsky@mail.ru

²ФГУП “18 ЦНИИ” МО РФ, Москва, Российская Федерация

Реализован подход к адаптации стратегии эксплуатации по состоянию с контролем параметров для цифровых оптико-электронных систем и оптико-электронных комплексов получения видовой информации. Предложено осуществлять оценку их технического состояния на основе метода автоматического распознавания статистической теории распознавания образов (многоальтернативное распознавание видов технического состояния по совокупности одновременно оцененных контролируемых параметров), позволяющего учитывать условия применения и задачи на аэросъемку посредством формирования адаптивных эталонных описаний. Оценка эффективности системы распознавания технического состояния, а также качества признаков и решающего правила проведена с использованием аналитического выражения средней вероятности ошибки распознавания. Предлагаемый подход может стать основой для разработки эффективных методов комплексирования цифровых оптико-электронных систем получения видовой информации.

Ключевые слова: цифровые оптико-электронные системы, оптико-электронные комплексы получения видовой информации, оценка технического состояния, стратегия эксплуатации, показатели качества изображения, статистические системы распознавания.

USING THE AUTOMATIC RECOGNITION METHOD IN PROBLEMS OF TECHNICAL STATE CONTROL OF DIGITAL IMAGERY OPTICAL-ELECTRONIC COMPLEXES

Yu.G. Veselov¹, A.N. Zaharchenko², A.S. Ostrovskiy¹

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: aleksandr_ostrovsky@mail.ru

²Federal State Unitary Enterprise “18th Central Research Institute” of RF Ministry of Defense, Moscow, Russian Federation

In this paper the approach to adaptation of the operation strategy by state of digital optoelectronic systems and imagery optical-electronic complexes with the control of their parameters has been implemented. Assessment of their technical state is encouraged to implement based on the automatic recognition method of the statistical theory of pattern recognition (multialternative recognition of kinds of technical condition using jointly simultaneously estimated and controlled parameters), allowing to consider the application conditions and tasks for aerial surveys by forming adaptive standard descriptions. Evaluating the effectiveness of the recognition system of the technical state is carried out using analytical expression

for an average probability of error detection; it is also used to assess the quality attributes and decision rules. The proposed approach could serve as a basis for the development of effective methods of interconnecting of digital imagery optoelectronic systems.

Keywords: digital optoelectronic systems, imagery optical-electronic complexes, technical state control, strategy of operation, image quality indicators, statistical pattern recognition systems.

Введение. В настоящее время интенсивно эксплуатируются современные цифровые оптико-электронные комплексы (ОЭК) получения видовой информации (ПВИ), отличающиеся высокими тактико-техническими характеристиками. Задачей государственной важности является обеспечение наиболее полного использования этих характеристик. Решение этой задачи требует непрерывного совершенствования способов и методов технической эксплуатации оптико-электронных систем (ОЭС) и ОЭК ПВИ, а также дальнейшего развития их инструментальной базы — автоматических и автоматизированных систем контроля (оценки) технического состояния.

Эффективность применения ОЭС ПВИ напрямую зависит от их технического состояния.

Отечественный и зарубежный опыт свидетельствует о том, что эксплуатация ОЭС ПВИ, основанная на стратегии технической эксплуатации и ремонта (СТЭР) по состоянию с контролем параметров, базирующаяся на автоматизированном контроле качества изображения параллельно с использованием систем встроенного контроля (рис. 1), обеспечивает наилучшим образом заданные уровни надежности, готовности и эффективности применения средств ПВИ [1]. Применение методов, реализующих автоматизированную оценку технического состояния цифровых ОЭК ПВИ по совокупности одновременно оцененных контролируемых параметров, позволит реализовать гибкие правила управления техническим состоянием и постоянную систему контроля рассматриваемых систем в целях обеспечения возможности существенного сокращения числа и объема профилактических и восстановительных работ при максимизации использованного ресурса



Рис. 1. Применяемые стратегии технической эксплуатации и ремонта

оптико-электронного оборудования. При этом повысятся такие показатели результативности мониторинга земной поверхности как своевременность и полнота решения задач за счет снижения количества пересечений мероприятий профилактических и восстановительных работ с выполнением задач мониторинга земной поверхности.

Следовательно, одним из перспективных направлений становится создание и внедрение в эксплуатацию бортовых и наземно-бортовых комплексных систем автоматизированной оценки технического состояния ОЭС ПВИ. Разработка и внедрение этих систем являются основой для эксплуатации ОЭС и ОЭК ПВИ по состоянию с контролем параметров.

С учетом изложенного выше возникает крупная научная и практическая проблема автоматизации оценки технического состояния ОЭС и ОЭК ПВИ в рамках стратегии эксплуатации по состоянию с контролем параметров на основе оценки качества их изображения и информации от встроенных средств контроля с использованием автоматических и автоматизированных систем обработки информации.

Ключевые задачи указанной проблемы — это разработка:

- комплексного метода оценки технического состояния ОЭС и ОЭК ПВИ, учитывающего условия применения и решаемые задачи;
- информационного, технического, математического и программного обеспечений оценки параметров контроля технического состояния ОЭС и ОЭК ПВИ в лабораторных и летных условиях, являющихся обеспечивающей частью системы автоматизированной оценки технического состояния рассматриваемых систем.

Данная работа посвящена решению актуальной научно-технической проблемы — разработке методологической основы автоматизированной оценки технического состояния цифровых ОЭК ПВИ относительно решаемых задач и условий применения.

В настоящее время ОЭС ПВИ представлены широким классом систем, работающих во всех областях оптического диапазона (ультрафиолетовый, видимый и инфракрасный) и имеющих различные принципы формирования изображения (кадровые, линейного сканирования, панорамные и т.д.). Рассматриваемая система контроля технического состояния и оценки эффективности применения ОЭС позволяет осуществлять эффективное и адаптивное их комплексирование под различные задачи и условия применения.

Реализация стратегии эксплуатации по состоянию возможна только при наличии достоверной информации о текущем техническом состоянии объекта контроля (диагностирования), причем средства и методы контроля должны обеспечивать оценку технического состояния по возможности без демонтажа оборудования с летательного аппарата и с применением минимального числа тестового и контрольно-проверочного оборудования.

С учетом этих требований основными способами оценки технического состояния при техническом обслуживании по состоянию могут являться контроль бортовой аппаратуры средств ПВИ по материалам их применения по тестовым полигонам и без них.

Цифровая съемка — новая, исключительно быстро развивающаяся область техники. Особенности конструкции цифровых ОЭС ПВИ и принципы получения изображения предъявляют несколько иные требования к оценке показателей качества получаемых изображений и встроенному контролю. Анализ алгоритмов функционирования встроенных систем контроля ОЭК ПВИ показал, что они не всегда обеспечивают требуемую достоверность оценки их технического состояния. Таким образом, наиболее надежный способ оценки технического состояния цифровых ОЭС ПВИ — оценка технического состояния по материалам их применения.

Использование статистической теории распознавания образов для оценки технического состояния ОЭК получения видовой информации. Общеизвестно, что автоматизация контроля качества функционирования и технической диагностики опико-электронной аппаратуры должна осуществляться на базе современных математических методов.

В настоящее время наиболее перспективным направлением работ в области автоматического и автоматизированного контроля, а также технической диагностики является разработка статистических методов неразрушающего контроля, который обеспечивает проведение необходимых измерений параметров или показателей качества изделий без ухудшения их свойств [2, 3].

Задача автоматизированного контроля ОЭС базируется на методах автоматического распознавания, и в данном случае рассматривается как статистическая задача принятия решения о наличии одного из альтернативных диагностируемых ее состояний, в котором можно выделить два основных этапа [4, 5].

Первый этап — восприятие информации о состоянии ОЭС и преобразовании ее к виду, удобному для последующей обработки.

Второй этап — выявление содержащихся в контролируемых параметрах особенностей, которые, например, отличают работоспособное состояние ОЭС от неработоспособного. При этом большое значение имеет выбор, описание и анализ контролируемых параметров (признаков).

Оценка технического состояния ОЭС ПВИ по материалам применения основывается на определении качества получаемых аэроснимков с помощью анализа значений их показателей качества. Таким образом, показатели качества представляют собой параметры контроля технического состояния ОЭС ПВИ. Под качеством будем пони-

мать свойство изображения, характеризующее его способность содержать сведения о геометрических и фотометрических характеристиках и параметрах объектов. Показатель качества изображения — величина, служащая конкретным индикатором этого свойства. К показателям качества изображения предъявляется ряд требований: они должны однозначно характеризовать свойства изображения и их изменение, быть применимыми для анализа каждого звена ОЭС и системы в целом.

Проблема выбора контролируемых параметров (признаков технического состояния) из полного набора показателей качества изображения — одна из ключевых в постановке задачи по оценке технического состояния ОЭС ПВИ. Выбранные из широкого перечня параметры контролируемой системы должны обладать максимальной информативностью. Наиболее информативный параметр ОЭС ПВИ это такой параметр, который оказывает наибольшее влияние на качество получаемого этой системой изображения.

Основная задача при эксплуатации ОЭС ПВИ по состоянию — идентификация вида технического состояния объекта эксплуатации. Как правило, для более объективной оценки состояния используются несколько параметров (признаков) контроля, желательно не коррелированных друг с другом. Доказано, что ковариация признаков увеличивает вероятность ошибки в системах распознавания по критериям максимума апостериорной вероятности и максимума отношения правдоподобия.

Содержание метода статистической оценки технического состояния цифровых ОЭК получения видовой информации. Для оценки технического состояния ОЭС ПВИ в силу случайности значений параметров контроля целесообразно использовать статистическую теорию распознавания образов. В качестве объектов распознавания будем рассматривать виды технического состояния цифровых ОЭС и ОЭК ПВИ [6] (рис. 2), а в качестве признаков объектов распознавания — параметры (признаки) объекта контроля.

Часто достоверная информация об априорных сведениях отсутствует. В этом случае в качестве решающего правила классификации, по которому расчетные значения вектора признаков сравниваются с эталонными, выберем критерий максимума функции правдоподобия.

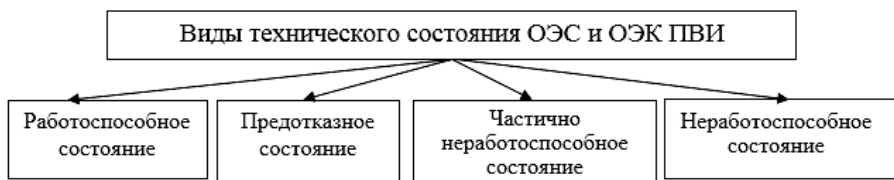


Рис. 2. Рассматриваемые в работе виды технического состояния ОЭС и ОЭК ПВИ



Рис. 3. Изменение качества изображения при смене условий применения при дешифрировании до класса самолет $H = 6000$ м (а), до вида транспортный самолет $H = 3000$ м (б) и до типа самолета Ан-26 $H = 1500$ м (в)

Необходимо отметить, что одной из особенностей ОЭС ПВИ является наличие в материалах, получаемых ими, информации не только об их техническом состоянии, но и об условиях съемки. Причем влияние внешних условий настолько велико, что может ухудшить значения контролируемых параметров до значений, соответствующих неработоспособному состоянию ОЭС, хотя объективно исследуемая система находится в работоспособном состоянии (рис. 3). Следовательно, разрабатываемая система оценки технического состояния должна быть адаптивна под различные условия и задачи применения (т.е. с какой глубиной должно проводиться дешифрирование материалов съемки — с точностью до вида, класса или типа) путем формирования эталонных признаков для каждой задачи и условий применения.

В качестве примера можно привести таблицу для двух различных условий применения ОЭС ПВИ: первое — умеренная дымка с метеорологической дальностью видимости (МДВ) 2...3 км; второе — ясные погодные условия при МДВ более 10 км.

Выполнение ОЭС ПВИ различных задач в зависимости от ее условий применения

Задача (глубина дешифрирования)	Работоспособные состояния		Неработоспособные состояния	
	РС	ПОС	ЧНРС	ПНРС
Класс	+/+	+/+	+/+	-/-
Вид	+/+	+/+	-/+	-/-
Тип	-/+	-/-	-/-	-/-

П р и м е ч а н и е. В числителе указаны условия № 1 при МДВ 2...3 км, в знаменателе — условия № 2 при МДВ более 10 км.

Воздушная дымка различной интенсивности ограничивает МДВ тестового объекта. В указанном примере рассматриваются три задачи: дешифрирование объектов до класса, вида и типа. Определены четыре вида технического состояния (см. рис. 2).

В соответствии с приведенными данными (см. таблицу) система, находящаяся фактически в одном и том же техническом состоянии при различных условиях применения, может выполнять разные задачи: при МДВ 2...3 км ОЭС ПВИ не обеспечивает дешифрирование заданного объекта до типа даже в полностью работоспособном состоянии, а в частично неработоспособном состоянии — дешифрирование заданного объекта до вида; однако при МДВ более 10 км объект до типа дешифрируется.

Учет влияния внешних условий на значение контролируемых параметров позволяет математическая модель ОЭС ПВИ, основанная на линейной теории ОЭС и реализующая аналитический способ оценки разрешающей способности, а также специализированная методика оценки возможностей рассматриваемых систем ПВИ [7].

Во время разработки системы распознавания определяются эталонные признаки объектов для каждого класса. Причем эталонные признаки могут формироваться с использованием специального комплекса математических моделей ОЭС ПВИ, собранного статистического материала по результатам эксплуатации контролируемых систем (если он имеется), а также с помощью сильных методов решения задач — экспертных систем.

Рассматриваемый в работе вероятностный подход предполагает знание оценок математических ожиданий вектора признаков и разброс или связи внутри класса, задаваемые ковариационной матрицей. Из априорных данных формируется полное множество гипотез по классам. Расчетные признаки сравниваются с эталонными. По минимуму расстояния принимается решение о принадлежности наблюдения к гипотезе [8–10].

Рассмотрим математическую модель наблюдения вектора признаков $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$:

$$\tilde{x} = x + \xi,$$

где \tilde{x} — наблюдения вектора признаков, $\tilde{x} = (\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_m)$; ξ — центрированный случайный вектор погрешностей. Причем число элементов вектора признаков для ОЭК ПВИ равно сумме элементов для каждого средства, входящего в рассматриваемый комплекс.

Так, для оценки технического состояния цифровых кадровых ОЭС ПВИ, работающих в видимом диапазоне, в качестве параметров контроля используются следующие: разрешающая способность R ; число передаваемых градаций яркости m ; число дефектных элементов фоточувствительного прибора с зарядовой связью (ФПЗС) или КМОП (комплементарная структура металл–оксид–полупроводник) приемника излучения k ; составляющие дисторсии по координатным осям $\delta x_{вд}$, $\delta y_{вд}$. Вектор признаков будет иметь вид $x = (R, m, k, \delta x_{вд}, \delta y_{вд})$. Параметрами контроля для инфракрасной системы (ИКС) являются

угловое (γ) и энергетическое (ΔT) разрешения, число дефектных элементов многоэлементного приемника излучения k , составляющие дисторсии по координатным осям $\delta x_{ИК}$, $\delta y_{ИК}$. Вектор признаков будет иметь вид $x = (\gamma, \Delta T, k, \delta x_{ИК}, \delta y_{ИК})$. Вектор параметров контроля технического состояния ОЭК ПВИ, состоящего из цифровой кадровой ОЭС ПВИ, работающей в видимом диапазоне, и ИКС ПВИ,

$$x = (R, m, k, \delta x_{вд}, \delta y_{вд}, \gamma, \Delta T, k, \delta x_{ИК}, \delta y_{ИК}).$$

Сформулируем задачу идентификации вектора состояния объекта контроля x . Для оценки вида технического состояния с помощью предлагаемой методики путем определения наиболее вероятных вектора математических ожиданий M_x и ковариационной матрицы R_x вектора x необходимы:

- единственная реализация \tilde{x} (формируется с использованием специализированного методического обеспечения оценки параметров контроля технического состояния);
- методика оценки эталонных признаков для каждого вида технического состояния с учетом условий применения.

Для решения задачи определим полное множество гипотез $G = \{\Omega_0, \dots, \Omega_k, \dots, \Omega_{l-1}\}$, $i = 0, \dots, l - 1$. Например, для двух условий наблюдения, трех поставленных задач и четырех видов технического состояния (см. таблицу) можно сформировать две совокупности полных групп гипотез:

1) для условия № 1 при МДВ 2... 3 км

$$\begin{pmatrix} \Omega_{111} & \Omega_{112} & \Omega_{113} & \Omega_{114} \\ \Omega_{121} & \Omega_{122} & \Omega_{123} & \Omega_{1вд} \\ \Omega_{131} & \Omega_{132} & \Omega_{133} & \Omega_{134} \end{pmatrix};$$

2) для условия № 2 при МДВ более 10 км

$$\begin{pmatrix} \Omega_{211} & \Omega_{212} & \Omega_{213} & \Omega_{214} \\ \Omega_{221} & \Omega_{222} & \Omega_{223} & \Omega_{2вд} \\ \Omega_{231} & \Omega_{232} & \Omega_{233} & \Omega_{234} \end{pmatrix}.$$

Предположим, что вектор x характеризуется условной нормальной многомерной плотностью распределения

$$P(x/\Omega_\nu) \in N\{M(x/\Omega_\nu), R(x/\Omega_\nu)\}, \quad (1)$$

зависящей от гипотезы Ω_ν , которая принята во время проведения измерения. В (1) $M(x/\Omega_\nu)$ — вектор математических ожиданий эталонных признаков; $R(x/\Omega_\nu)$ — ковариационная матрица вектора.

Возможный вид условных плотностей распределений трех скалярных признаков для четырех проверяемых гипотез приведен на рис. 4.

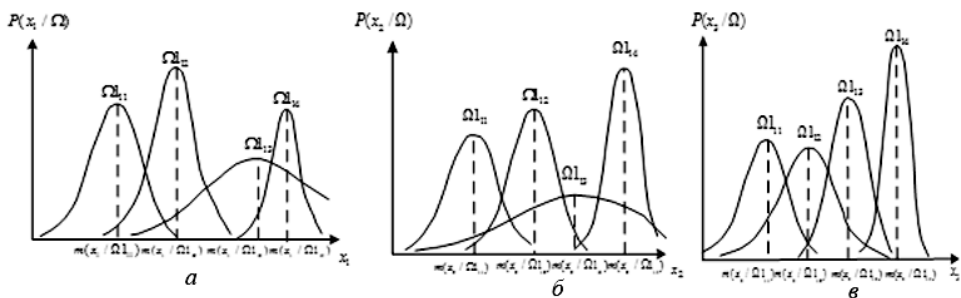


Рис. 4. Возможный вид условных плотностей распределения трех признаков x_1 (а), x_2 (б) и x_3 (в) для четырех проверяемых гипотез (четыре вида технического состояния)

Пусть во время измерений принята произвольная гипотеза $\Omega \in G$, тогда вектор x можно представить в виде

$$\tilde{x} = M(x/\Omega) + \xi.$$

Таким образом, вектор x является случайным вектором, принадлежащим одной из l совокупностей (гипотез), причем вектор x распределен нормально с плотностью

$$P(x/\Omega_k) = (2\pi)^{-m/2} |R(x/\Omega_k)|^{-1/2} \times \exp \left[-\frac{1}{2} (\tilde{x} - M(x/\Omega_k))^T R^{-1}(x/\Omega_k) (\tilde{x} - M(x/\Omega_k)) \right]. \quad (2)$$

Разумно отнести наблюдение \tilde{x} к той гипотезе, для которой функция правдоподобия максимальна. Максимум функции правдоподобия достигается минимизацией функционала

$$J_k = \|\tilde{x} - M(x/\Omega_k)\|_{R(x/\Omega_k)^{-1}}^2, \quad (3)$$

где $\|\tilde{x} - M(x/\Omega_k)\|_{R(x/\Omega_k)^{-1}}^2$ — квадратичная форма вектора $\tilde{x} - M(x/\Omega_k)$, взвешенная с матрицей $R^{-1}(x/\Omega_k)$, т.е.

$$\begin{aligned} \|\tilde{x} - M(x/\Omega_k)\|_{R(x/\Omega_k)^{-1}}^2 &= \\ &= (\tilde{x} - M(x/\Omega_k))^B R^{-1}(x/\Omega_k) (\tilde{x} - M(x/\Omega_k)). \end{aligned}$$

Для решения задачи находится минимальный функционал J_k . Наиболее вероятные вектор математических ожиданий $M(x/\Omega_k)$ и ковариационная матрица $M(x x^T)$ определяются наиболее вероятной гипотезой Ω_k , выбранной в результате операции $\min_k J_k$.

Далее функционал J_k будем называть оценочным функционалом, или функционалом

$$J_k = (\tilde{x} - M_k)^T R_k^{-1} (\tilde{x} - M_k),$$

где $R_k = R(x/\Omega_k)$; $M_k = M(x/\Omega_k)$.

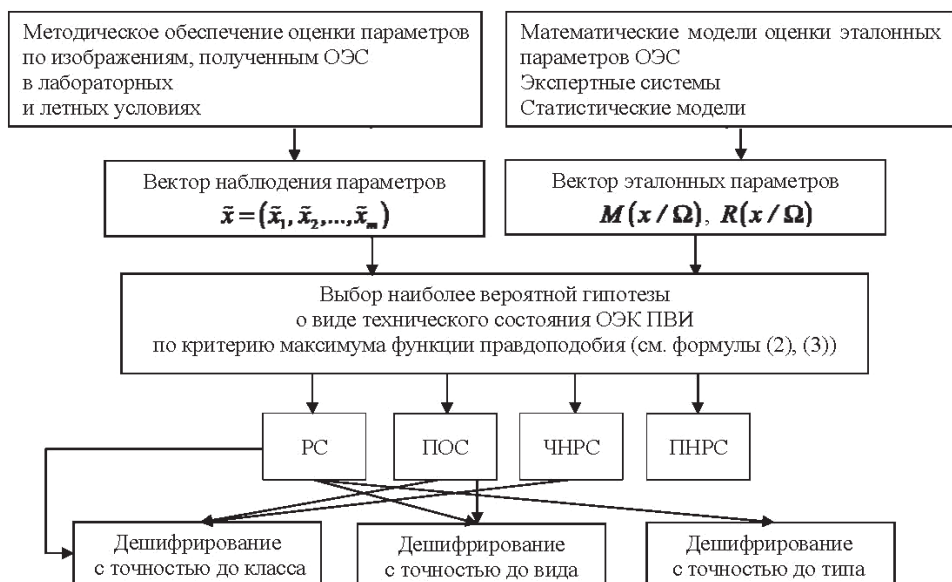


Рис. 5. Схема метода статистической оценки технического состояния цифровых ОЭС и ОЭК ПВИ

Схема, иллюстрирующая состав и содержание, а также поясняющая работу метода статистической оценки технического состояния цифровых ОЭС и ОЭК ПВИ, приведена на рис. 5.

Оценка погрешности классификации состояний цифровых ОЭК и ОЭС получения видовой информации. Оценим погрешность классификации состояний средней вероятностью ошибки [11, 12], позволяющей заранее оценить качество признаков и решающего правила для любого числа гипотез. Для вычисления средней вероятности ошибки $P_{\text{ош}}$ рассмотрим условные вероятности P_{kq} того, что при наличии гипотезы Ω_q принята гипотеза Ω_k и потери неправильного решения Π_{kq} .

Запишем математическое ожидание потерь

$$R_n = M(\Pi_{kq}) = \sum_{k=0}^{l-1} \sum_{q=0}^{l-1} \Pi_{kq} P_{kq},$$

которое обычно называют средним риском. Для простой функции потерь

$$\Pi_{kq} = \begin{cases} 0, & k = q; \\ 1, & k \neq q \end{cases}$$

риск равен средней вероятности ошибки (неправильного решения)

$$P_{\text{ош}} = \sum_{k=0}^{l-1} \sum_{q=0}^{l-1} P_{kq} \text{ при } k \neq q. \quad (4)$$

Для нахождения вероятностей P_{kq} необходимо знать условное совместное распределение $P(J/\Omega_q)$ вектора оценочных функционалов

$$J = (J_0, \dots, J_k, \dots, J_{l-1}). \quad (5)$$

Тогда

$$P_{kq} = \int_{-\infty}^{+\infty} dJ_k \int_{-\infty}^{J_k} \cdots \int_{-\infty}^{J_k} P(J/\Omega_q) dJ_0 \cdots dJ_{k-1} dJ_{k+1} \cdots dJ_{l-1}. \quad (6)$$

Рассмотрим произвольный функционал J_k как случайную величину

$$J_k = (\tilde{x} - M_k)^T R_k^{-1} (\tilde{x} - M_k). \quad (7)$$

Условное распределение $P(J/\Omega_q)$ существует, когда

$$\tilde{x} = M_q + \xi; \quad M_q = M(\Omega_q). \quad (8)$$

“Ошибочный” функционал J_k^q (вместо q -й гипотезы рассматривается k -я гипотеза) получается при подстановке (8) в (7):

$$J_k^q = [M_q - M_k + \xi]^T R_k^{-1} [M_q - M_k + \xi].$$

Раскроем квадратичную форму

$$J_k^q = (M_q - M_k)^T R_k^{-1} (M_q - M_k) + 2\xi^T R_k^{-1} (M_q - M_k) + \xi^T R_k^{-1} \xi.$$

Пусть для всех гипотез совпадают ковариационные матрицы $R_k = R(\Omega_k)$, т.е. предположим, что дисперсии различных признаков слабо зависят от гипотез. Тогда в обозначении матрицы R_k можно убрать индекс k , а слагаемое $\xi^T R_k^{-1} \xi$ не влияет на положение экстремума функционала J_k по гипотезе Ω_k . Для вывода плотности $P(J/\Omega_k)$ это слагаемое можно отбросить и рассмотреть соотношение

$$J_k^q = M_{k/q} + \eta,$$

где

$$\begin{aligned} M_{k/q} &= [(M_q - M_k)]^T R^{-1} [(M_q - M_k)]; \\ \eta &= 2\xi^T R^{-1} (M_q - M_k). \end{aligned} \quad (9)$$

Возмущение η нормально распределено, центрировано, поэтому случайная величина J_k^q распределена по нормальному закону, следовательно, l -мерная условная плотность вектора $J = (J_0, \dots, J_k, \dots, J_{l-1})$ имеет вид

$$P(J/\Omega_q) = \left[\left(\sqrt{2\pi} \right)^l \sqrt{\det K_J} \right]^{-1} \exp \left[-\frac{1}{2} (J - M_J)^B K_J^{-1} (J - M_J) \right],$$

где $M_J = [M_{0/q}, M_{1/q}, \dots, M_{k/q}, \dots, M_{l-1/q}]^T$; K_J — условная ковари-

ационная матрица вектора J ,

$$K_J = [K_{k,n/q}] = [M((J_k^q - M_{k/q})(J_n^q - M_{n/q})^T)].$$

На основании (9) получим

$$\begin{aligned} M_{n/q} &= (M_q - M_n)^T R^{-1} (M_q - M_n); \\ K_{k,n/q} &= 4M \left\{ [\xi^T R^{-1} (M_q - M_k)] [\xi^T R^{-1} (M_q - M_n)]^T \right\}. \end{aligned}$$

Для упрощения дальнейших преобразований обозначим

$$(M_q - M_k) = m_k; \quad (M_q - M_n) = m_n. \quad (10)$$

Тогда

$$\begin{aligned} K_{k,n/q} &= 4 \left\{ [\xi^T R^{-1} m_k] [\xi^T R^{-1} m_n]^T / \Omega_q \right\} = \\ &= 4M \left\{ [\xi^T R^{-1} m_n]^T [\xi^T R^{-1} m_k] / \Omega_q \right\} = \\ &= 4M \left\{ m_n^T R^{-1} \xi \xi^T R^{-1} m_k / \Omega_q \right\} = 4m_n^T R^{-1} M \left\{ \xi \xi^T / \Omega_q \right\} R^{-1} m_k = \\ &= 4m_n^T R^{-1} m_k. \end{aligned}$$

С учетом обозначений (10) окончательно имеем

$$K_{k,n/q} = 4(M_q - M_n)^T R^{-1} (M_q - M_k), \quad k, n = 0, 1, \dots, l-1. \quad (11)$$

Диагональные элементы ковариационной матрицы $[K_{k,n/q}]$ необходимо рассчитывать для $k = n \neq q$. Это условие определяется физическим смыслом “ошибочных” функционалов J_k^q .

Для вычисления интеграла (6) переведем координаты вектора J в ортонормированный базис с помощью преобразования Карунена–Лоева [13, 14] $I = CJ$, где C – матрица, составленная по столбцам из ортогонализированных собственных векторов ковариационной матрицы K_J . Важно, что матрица $\Lambda = CK_J C^T$ диагональная, причем на диагонали расположены собственные числа матрицы K_J . Обозначим их $\lambda_{k/q}$, $k = 0, 1, 2, \dots, l-1$.

Справедливо равенство плотностей

$$\begin{aligned} P(J/\Omega_q) &= \left[(\sqrt{2\pi})^l \sqrt{\det K_J} \right]^{-1} \exp \left[-\frac{1}{2} (J - M_j)^T K_J^{-1} (J - M_j) \right] = \\ &= \left[(\sqrt{2\pi})^l \sqrt{\det(CK_J C^T)} \right]^{-1} \exp \left\{ -\frac{1}{2} [C(J - M_j)]^T [CK_J C^T]^{-1} [C(J - M_j)] \right\} = \\ &= \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^l \sqrt{\prod_{s=1}^{l-1} \lambda_{s/q}}} \exp \left[-\frac{1}{2} \sum_{\substack{s=0 \\ s \neq q}}^{l-1} \frac{(I_s - \tilde{M}_{s/q})^2}{\lambda_{s/q}} \right] = P(I/\Omega_q), \end{aligned}$$

где $\tilde{M}_{s/q} = [C(M_q - M_s)]^T [CRC^T]^{-1} [C(M_q - M_s)]$; I_s — координаты вектора $I = CJ$; $\tilde{M}_{s/q}$ — координаты вектора $M_I = CM_J$; $\lambda_{s/q}$ — собственные числа условной ковариационной матрицы K_J (элементы матрицы K_J определены выражением (11)). Алгебраические преобразования позволили заменить плотность $P(J/\Omega_q)$ плотностью $P(I/\Omega_q)$, система координат $\{I_0, \dots, I_k, \dots, I_{l-1}\}$ повернута так, что функционалы I_k , принимающие значения на своих осях координат, статистически независимы. Вследствие этого необходимо вычислить интеграл

$$P_{kq} = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^l \sqrt{\prod_{s=1}^{l-1} \lambda_{s/q}}} \times \\ \times \int_{-\infty}^{\infty} dI_k \int_{-\infty}^{I_k} \dots \int_{-\infty}^{I_k} \exp \left[-\frac{1}{2} \sum_{\substack{s=0 \\ s \neq q}}^{l-1} \frac{(I_s - \tilde{M}_{s/q})^2}{\lambda_{s/q}} \right] dI_0 \dots dI_{k-1} dI_{k+1} \dots dI_{l-1}.$$

Преобразуем это выражение

$$P_{kq} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\lambda_{k/q}}} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi\lambda_{0/q}}} \int_{-\infty}^{I_k} e^{-\frac{(I_0 - \tilde{M}_{0/q})^2}{2\lambda_{0/q}}} dI_0 \dots \times \right. \\ \times \dots \frac{1}{\sqrt{2\pi\lambda_{k-1/q}}} \int_{-\infty}^{I_k} e^{-\frac{(I_{k-1} - \tilde{M}_{k-1/q})^2}{2\lambda_{k-1/q}}} dI_{k-1} \times \\ \times \frac{1}{\sqrt{2\pi\lambda_{k+1/q}}} \int_{-\infty}^{I_k} e^{-\frac{(I_{k+1} - \tilde{M}_{k+1/q})^2}{2\lambda_{k+1/q}}} dI_{k+1} \dots \times \\ \left. \times \frac{1}{\sqrt{2\pi\lambda_{l-1/q}}} \int_{-\infty}^{I_k} e^{-\frac{(I_{l-1} - \tilde{M}_{l-1/q})^2}{2\lambda_{l-1/q}}} dI_{l-1} \right\} e^{-\frac{(I_k - \tilde{M}_{k/q})^2}{2\lambda_{k/q}}} dI_k.$$

В каждом интеграле в фигурных скобках выполним замену переменных $I_s - \tilde{M}_{s/q} = u_s \sqrt{\lambda_{s/q}}$, $s \neq k$. Для примера рассмотрим первый интеграл

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi\lambda_{0/q}}} \int_{-\infty}^{I_k} e^{-\frac{(I_0 - \tilde{M}_{0/q})^2}{2\lambda_{0/q}}} dI_0 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{I_0 - \tilde{M}_{0/q}}{\sqrt{\lambda_{0/q}}}} e^{-\frac{u_0^2}{2}} du_0 = \Phi \left(\frac{I_0 - \tilde{M}_{0/q}}{\sqrt{\lambda_{0/q}}} \right).$$

Аналогичным образом определим остальные интегралы. После вычислений окончательно запишем

$$\begin{aligned}
 P_{kq} &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\lambda_{k/q}}} \int_{-\infty}^{\infty} \prod_{\substack{s=0 \\ s \neq k}}^{l-1} \Phi \left(\frac{I_k - \tilde{M}_{s/q}}{\sqrt{\lambda_{s/q}}} \right) e^{-\frac{(I_k - \tilde{M}_{k/q})^2}{2\lambda_{k/q}}} dI_k = \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{y^2}{2}} \prod_{\substack{s=0 \\ s \neq k}}^{l-1} \Phi \left(\frac{y\sqrt{\lambda_{s/q}} + \tilde{M}_{s/q} - \tilde{M}_{k/q}}{\sqrt{\lambda_{s/q}}} \right) dy, \quad (12)
 \end{aligned}$$

где $y = \frac{I_k - \tilde{M}_{k/q}}{\lambda_{k/g}}$; $\Phi(\cdot)$ — функция, $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x 5^{-\frac{t^2}{2}} dt$.

Следовательно, выражения (4), (5), (12) можно использовать для оценки значимости параметров контроля комплекса ОЭС ПВИ, а также заранее рассчитать среднюю вероятность ошибки для любого числа гипотез.

Заключение. В качестве вывода можно отметить, что в предложенной работе рассмотрены современные способы оценки технического состояния ОЭС ПВИ. Для оценки технического состояния ОЭС и ОЖ ПВИ использована статистическая теория распознавания образов.

Оценка эталонных признаков для каждого вида технического состояния осуществлена с помощью математических моделей ОЭС, собранного статистического материала по результатам эксплуатации контролируемых систем, а также сильных методов решения задач — экспертных систем. Коррекцию полученных эталонных признаков под условия применения можно выполнять на основе физико-аналитических исследований.

В работе предложена теория оценки эффективности системы распознавания технического состояния ОЭС ПВИ. Выведена формула средней вероятности ошибки в статистических системах распознавания по критерию максимума апостериорной вероятности. Показано, что на основе аналитического выражения средней вероятности ошибки можно оценить качество признаков и решающего правила для любого числа гипотез и числа признаков (рис. 6).

По оси абсцисс на графиках отложена величина

$$M/\Sigma = \sum_{q=0}^{l-1} \sum_{\substack{s=0 \\ s \neq k}}^{l-1} \left(\frac{|\tilde{M}_{s/q} - \tilde{M}_{k/q}|}{\sqrt{\lambda_{s/q}}} \right),$$

которая характеризует информативность признаков.

Анализ кривых, приведенных на рис. 6, б, показывает, что с увеличением числа проверяемых гипотез вероятность ошибки распозна-

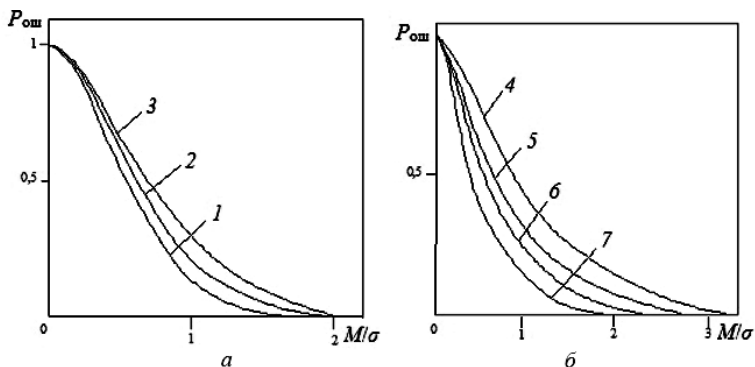


Рис. 6. Зависимость вероятности ошибки распознавания от числа $l = 2$ (1), 3 (2), 4 (3) проверяемых гипотез (а) и числа $k = 1$ (4), 2 (5), 3 (6), 4 (7) признаков (б)

вания возрастает (можно оценить динамику изменения вероятности ошибки распознавания). Зависимости, показанные на рис. 6, демонстрируют целесообразность использования нескольких признаков (параметров контроля) технического состояния ОЭС и ОЭК.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Теоретические основы и средства автоматизированного контроля* / В.Н. Буков, А.П. Базанов, Л.П. Колодежный и др. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1997. 47 с.
2. *Фомин Я.А., Тарловский Г.Р.* Статистическая теория распознавания образов. М.: Радио и связь, 1986. С. 234–237.
3. *Фомин Я.А., Безродный Б.Ф.* Адаптивные системы контроля изделий микроэлектроники на ПЭВМ. М.: Изд-во стандартов, 1993. С. 3–7.
4. *Гуковский Я.Е.* О статистическом подходе к обнаружению событий в автоматическом контроле // *Автоматика и телемеханика*. 1964. № 10. С. 1851–1855.
5. *Киеллер В.И.* Об определении и специфике автоматического контроля // *Автоматика и телемеханика*. 1962. № 4. С. 923–929.
6. *ГОСТ 27.002–89.* Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1990. 22 с.
7. *Веселов Ю.Г., Тихонычев В.В., Халтобин В.М.* Исследование характеристик цифровых фотоаппаратов // *Техника кино и телевидения*. 2003. № 6. С. 39–41.
8. *Белоглазов И.Н.* Алгоритм комплексного автоматического дешифрирования и оценка его эффективности. В сб.: *Применение ЭВМ для автоматизации процессов сбора и обработки информации*; под ред. И.Н. Белоглазова. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1984. С. 29–39.
9. *Белоглазов И.Н., Казарин С.Н.* Совместное оптимальное оценивание, идентификация и проверка гипотез в дискретных динамических системах // *Изв. РАН. ТиСУ*. 1998. № 4. С. 26–43.
10. *Веселов Ю.Г., Тихонычев В.В., Труфанов И.В., Халтобин В.М.* Оценка технического состояния цифровых аэрофотоаппаратов на основе теории распознавания образов. В сб.: *Авиационное оборудование*; под ред. В.С. Кулабухова. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2004.
11. *Веселов Ю.Г., Тихонычев В.В., Халтобин В.М.* Оценка технического состояния иконических оптико-электронных средств на основе теории распознавания образов. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2007. С. 16–17.

12. Веселов Ю.Г. Модель оценки информационных характеристик оптико-электронных систем дистанционного зондирования Земли // Исследование Земли из космоса. № 5. 2011. С. 3–10.
13. Фукунага К. Введение в статистическую теорию распознавания образов; под ред. А.А. Дорофеева. М.: Наука, 1979. 66 с.
14. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1984. 831 с.

REFERENCES

- [1] Bukov V.N., Bazanov A.P., Kolodezhny L.P. *Teoreticheskie osnovy i sredstva avtomatizirovannogo kontrolya* [Theoretical bases and automated control means]. Moscow, VVIA im. prof. N.E. Zhukovskogo Publ., 1997. 47 p. (in Russ.).
- [2] Fomin Ya.A., Tarlovskii G.R. *Statisticheskaya teoriya raspoznavaniya obrazov* [Statistical theory of pattern recognition]. Moscow, Radio i Svyaz' Publ., 1986. 262 p.
- [3] Fomin Ya.A., Bezrodnyy B.F. *Adaptivnye sistemy kontrolya izdeliy mikroelektroniki na PEVM* [Adaptive control system of microelectronic products with PC]. Moscow, Izd. Standartov Publ., 1993. 203 p. (in Russ.).
- [4] Gukovskiy Ya.E. About statistical approach to event detection in automatic control. *Avtom. Telemekh.* [Autom. Remote Control], 1964, no. 10, pp. 1851–1855 (in Russ.).
- [5] Kneller V.I. On the definition and specificity of the automatic control. *Avtom. Telemekh.* [Autom. Remote Control], 1962, no. 4, pp. 923–929 (in Russ.).
- [6] Standard RF. *GOST 27.002–89. Nadezhnost' v tekhnike. Osnovnyye ponyatiya. Terminy i opredeleniya* [State Standard 27.002–89. Industrial product dependability. General concepts. Terms and definitions]. Moscow, Izd. Standartov Publ., 1990. 22 p.
- [7] Veselov Yu.G., Tikhonychev V.V., Khaltobin V.M. The study of the characteristics of digital cameras. *Tekhnika kino i televideniya* [Technology of cinema and television], 2003, no. 6, pp. 39–41 (in Russ.).
- [8] Beloglazov I.N. Integrated automatic decoding algorithm and evaluation of its effectiveness. *Sb. VVIA im. Prof. N.E. Zhukovskogo "Primenenie EVM dlia avtomatizatsii protsessov sbora i obrabotki informatsii"* [Collect. Pap. Air Force Engin. Acad. n.a. Prof. N.E. Zhukovskiy "The use of computers for automation of process of collecting and processing of information"], Moscow, 1984, pp. 29–39 (in Russ.).
- [9] Beloglazov I.N., Kazarin S.N. Joint optimal estimation, identification and testing of hypotheses in discrete dynamical systems. *Izv. RAN. Teoriya i sistemy upravleniya* [J. Comput. Syst. Sci. Int.], 1998, no. 4, pp. 26–43 (in Russ.).
- [10] Veselov Yu.G., Tikhonychev V.V., Trufanov I.V., Khaltobin V.M., Kulabukhov V.S., eds. Technical state control of digital aerial cameras based on the theory of pattern recognition. *Sb. VVIA im. Prof. N.E. Zhukovskogo "Aviatsionnoe oborudovanie"* [Collect. Pap. Air Force Engin. Acad. n.a. Prof. N.E. Zhukovskiy "Aircraft equipment"], Moscow, 2004 (in Russ.).
- [11] Veselov Yu.G., Tikhonychev V.V., Khaltobin V.M. Technical state control of iconic optoelectronic devices based on pattern recognition theory. *Sb. VVIA im. Prof. N.E. Zhukovskogo* [Collect. Pap. Air Force Engin. Acad. n.a. Prof. N.E. Zhukovskiy], Moscow, 2007, pp. 16–17 (in Russ.).
- [12] Veselov Yu.G. Evaluation model of information characteristics for optoelectronic systems of Earth's remote sensing. *Issledovanie Zemli iz kosmosa* [Study the Earth from space], 2011, no. 5, pp. 3–10 (in Russ.).
- [13] Fukunaga K. Introduction to statistical pattern recognition. USA, Academic Press, 1972. (Russ. Ed.: Fukunaga K., ed. Dorofeyuk A.A. *Vvedenie v statisticheskuyu teoriyu raspoznavaniya obrazov*. Moscow, Nauka Publ., 1979. 368 p.).

- [14] Korn G.A., Korn T.M. *Mathematical handbook for scientists and engineers: definitions, theorems, and formulas for reference and review*. USA, McGraw-Hill, 1968. 1130 p. (Russ. ed.: Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov*. Moscow, Nauka Publ., 1984. 831 p.).

Статья поступила в редакцию 13.12.2013

Юрий Геннадьевич Веселов — канд. техн. наук, доцент кафедры “Информационная безопасность” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области оценки технического состояния оптоэлектронных систем получения видовой информации и обработки изображений.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Yu.G. Veselov — Cand. Sci. (Eng.), assoc. professor of “Information Security” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 100 publications in the field of assessment of technical condition of optoelectronic systems for obtaining imagery information and image processing.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Александр Николаевич Захарченко — д-р техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник ФГУП “18 ЦНИИ” МО РФ. Автор более 150 научных работ в области обработки информации.

ФГУП “18 ЦНИИ” МО РФ, Российская Федерация, 111558, Москва, Свободный пр-т, д. 4.

A.N. Zaharchenko — Dr. Sci. (Eng.), professor, leading researcher of the Federal State Unitary Enterprise “18th Central Research Institute”. Author of more than 150 publications in the field of information processing.

Federal State Unitary Enterprise “18th Central Research Institute” of RF Ministry of Defense, Svobodnyy pr-t 4, Moscow, 111558 Russian Federation.

Александр Сергеевич Островский — канд. техн. наук, ассистент кафедры “Информационная безопасность” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 50 научных работ в области оценки технического состояния оптоэлектронных систем получения видовой информации и обработки информации.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

A.S. Ostrovskiy — Cand. Sci. (Eng.), assistant lecturer of “Information Security” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 50 publications in the field of assessment of technical condition of optoelectronic systems for obtaining imagery information and information processing.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.