

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

© 2011 г. Ю. Г. Веселов

ВУНЦ ВВС "Военно-воздушная академия им. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина"

E-mail: vesel_foto@mail.ru

Поступила в редакцию 22.12.2010 г.

В работе предложено для оценки технического состояния цифровых оптико-электронных систем и комплексов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) воспользоваться статистической теорией распознавания образов. Разработан подход к оценке эффективности системы распознавания технического состояния. Получено аналитическое выражение средней вероятности ошибки распознавания и показано, что на его основе, имеется возможность оценить качество признаков и решающего правила.

Ключевые слова: цифровые оптико-электронные системы дистанционного зондирования Земли, решающее правило, оценка технического состояния, показатели качества изображения, распознавание образов

ПРЕИМУЩЕСТВА ЭКСПЛУАТАЦИИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ПО СОСТОЯНИЮ

Современные цифровые технологии, обладая колоссальными возможностями по обработке, передаче и хранению огромных объемов информации, все активнее внедряются в самые разные сферы человеческой деятельности и прежде всего в те из них, где традиционно господствовали аналоговые.

Быстрое развитие цифровых технологий не могло не заинтересовать специалистов, занимающихся вопросами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), и уже в настоящее время цифровые технологии широко применяются в новых разработках аппаратуры ДЗЗ.

Неоспоримым преимуществом цифрового сигнала перед аналоговым являются удобство его компьютерной обработки (возможность автоматизированной обработки видеоданных с целью сокращения их избыточности, компенсации шумов и геометрических искажений), а также меньшая продолжительность времени получения видеoinформации потребителем с момента ее регистрации. Весомым аргументом в пользу цифрового представления видеoinформации является возможность сохранения последней в неизменном виде в течение практически неограниченного времени, что нельзя сказать о аналоговых снимках на фотопленке.

Известно, что эффективность применения оптико-электронных систем (ОЭС) ДЗЗ напрямую зависит от их технического состояния.

В последние годы приобретает все большую популярность метод эксплуатации аэрокосмической техники по техническому состоянию. С внедрением программ обслуживания и ремонта по состоянию появляются необходимая база и реальная возможность осуществления безресурсной эксплуатации большинства изделий аэрокосмической техники.

Адаптация программы эксплуатации по техническому состоянию к ОЭС и комплексам ДЗЗ не только позволяет сократить временные и материальные затраты на их эксплуатацию, но также дает возможность иметь постоянную систему контроля за их характеристиками с целью оценки эффективности применения в определенных условиях.

Исторически сложилась следующая система контроля технического состояния ОЭС ДЗЗ, включающая:

– оценку технического состояния ОЭС ДЗЗ посредством визуального контроля качества изображения;

– визуальный контроль качества изображения параллельно с использованием контрольно-проверочной аппаратуры;

– оценку технического состояния ОЭС ДЗЗ посредством автоматизированной оценки показателей качества изображения.

Отечественный и зарубежный опыт свидетельствуют, что эксплуатация ОЭС ДЗЗ, основанная на программе технического обслуживания по состоянию, наилучшим образом обеспечивает заданные уровни надежности, готовности и эффективности применения средств ДЗЗ по назначению при оценке их технического состояния на основе способов автоматизированного контроля качества изображения параллельно с использованием систем встроенного контроля.

ОЭС ДЗЗ в настоящее время представлены широким классом систем, работающих во всех областях оптического диапазона (ультрафиолетовый, видимый и инфракрасный), и имеют различные принципы формирования изображения (кадровые, линейного сканирования, панорамные и т.д.).

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 количества контрольно-проверочной аппаратуры.

С учетом этих требований основными способами оценки технического состояния при техническом обслуживании по состоянию могут являться контроль бортовой аппаратуры средств ДЗЗ с помощью встроенных систем контроля и по материалам их применения.

Цифровая съемка новая, исключительно быстро развивающаяся, область техники. Особенности конструкции цифровых ОЭС ДЗЗ и принципы получения изображения выдвигают несколько иные требования к оценке показателей качества получаемых изображений и встроенному контролю. Также анализ алгоритмов функционирования встроенных систем контроля оптико-электронных комплексов ДЗЗ показал, что они не обеспечивают требуемой достоверности оценки их технического состояния. Таким образом, наиболее приемлемым способом оценки технического состояния цифровых ОЭС ДЗЗ является способ оценки технического состояния по материалам применения.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОЭС И КОМПЛЕКСОВ ДЗЗ

Оценка технического состояния ОЭС ДЗЗ по материалам применения основывается на определении качества получаемых аэрокосмических снимков, посредством анализа значений показателей качества изображения. Таким образом, по-

казатели качества являются параметрами контроля технического состояния ОЭС ДЗЗ. Под качеством будем понимать свойство изображения, характеризующее его способность нести в себе сведения о геометрических и фотометрических характеристиках и параметрах объектов. Показатель качества изображения - это 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 и оптико-электронной системы в целом.

Проблема выбора контролируемых параметров (признаков технического состояния) из полного набора показателей качества изображения является одной из ключевых в постановке задачи по оценке технического состояния ОЭС ДЗЗ. Контролируемые параметры должны быть наиболее информативными параметрами контролируемой системы.

Наиболее информативный параметр ОЭС ДЗЗ – это такой параметр, который оказывает наибольшее влияние на качество получаемого этой системой изображения.

При эксплуатации ОЭС ДЗЗ по состоянию основной задачей является идентификация вида технического состояния объекта эксплуатации. Для более объективной оценки состояния используются, как правило, несколько параметров (признаков) контроля, желательно не коррелированных друг с другом. Для оценки технического состояния ОЭС ДЗЗ в силу случайности параметров контроля целесообразно воспользоваться статистической теорией распознавания образов. В качестве объектов распознавания будем рассматривать виды технического состояния цифровых ОЭС ДЗЗ (например: работоспособное, предотказное, частично неработоспособное, полностью неработоспособное (ГОСТ 27.002-89..., 1990)), 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.

Необходимо также отметить, что одной из особенностей ОЭС ДЗЗ является то, что в получаемых ими материалах содержится информация 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. Таким

образом, разрабатываемая система оценки технического состояния должна быть адаптивна под различные условия и задачи применения, посредством формирования эталонных признаков для каждой задачи и условий применения.

Учесть влияние внешних условий на значение контролируемых параметров позволяет математическая модель ОЭС ДЗЗ, базирующаяся на линейной теории ОЭС и реализующая аналитический способ оценки разрешающей способности, а также специализированная методика оценки возможностей рассматриваемых систем ДЗЗ (Веселов и др., 2003).

Во время разработки системы распознавания определяются эталонные признаки объектов для каждого класса. Причем эталонные признаки могут формироваться с использованием собранного статистического материала по результатам эксплуатации контролируемых систем (если он имеется), а также с использованием сильных методов решения задач – экспертных систем. Простейшая структура экспертной системы, используемая для таких целей, представлена на рис. 1.

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 признаками. По минимуму расстояния принимается решение о принадлежности наблюдения к гипотезе (Белоглазов, Казарин, 1998).

Рассмотрим математическую модель наблюдения вектора признаков

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$$

$$\tilde{x} = x + \xi, \tag{1}$$

где \tilde{x} – наблюдения вектора признаков, например, $\tilde{x} = (\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_m)$; ξ – центрированный случайный вектор погрешностей.

Причем количество элементов вектора признаков для оптико-электронного комплекса ДЗЗ равно сумме элементов для каждого средства входящего в состав рассматриваемого комплекса.

К примеру, для оценки технического состояния цифровых кадровых ОЭС ДЗЗ, работающих в видимом диапазоне, в качестве параметров контроля используются такие, как (Веселов и др., 2007) разрешающая способность R , количество передаваемых градаций яркости m , количество дефектных элементов фоточувствительного прибора с зарядовой связью (ФПЗС) или КМОП (комплемментарная структура металл–оксид–полупроводник) приемника излучения k и составляющие дисторсии по координатным осям $\delta x_{вд}$, $\delta y_{вд}$. Вектор признаков будет иметь вид $x = (R, m, k, \delta x_{вд}, \delta y_{вд})$.



Рис. 1. Структура экспертной системы для определения эталонных признаков.

Для инфракрасной (ИК) системы в качестве параметров контроля используются угловое разрешение γ , энергетическое разрешение ΔT , количество дефектных элементов многоэлементного приемника излучения k и составляющие дисторсии по координатным осям $\delta x_{ИК}$, $\delta y_{ИК}$, вектор признаков $x = (\gamma, \Delta T, k, \delta x_{ИК}, \delta y_{ИК})$. Вектор параметров контроля технического состояния оптико-электронного комплекса ДЗЗ, состоящего из двух систем цифровой кадровой ОЭС ДЗЗ, работающей в видимом диапазоне, и ИК-системы ДЗЗ, будет иметь вид $x = (R, m, k, \delta x_{вд}, \delta y_{вд}, \gamma, \Delta T, k, \delta x_{ИК}, \delta y_{ИК})$.

Сформулируем задачу идентификации вектора состояния объекта контроля x следующим образом.

Для оценки вида технического состояния с использованием предлагаемой методики, посредством определения наиболее вероятных вектора математических ожиданий M_x и ковариационной матрицы R_x вектора x , необходимо иметь единственную реализацию \tilde{x} (она формируется с использованием специализированного методического обеспечения оценки параметров контроля технического состояния) и методику оценки эталонных признаков для каждого вида технического состояния с учетом условий применения.

Для решения задачи определим полное множество гипотез $G = \{\Omega_0, \dots, \Omega_k, \dots, \Omega_{l-1}\}$, $i = 0, \dots, l - 1$ и предположим, что вектор x характеризуется

условной нормальной многомерной плотностью распределения

$$P(x/\Omega_v) \in N\{M(x/\Omega_v), R(x/\Omega_v),\} \quad (2)$$

зависящей от гипотезы Ω_v , которая имеет место во время проведения измерения. В определении (2) с помощью $M(x/\Omega_v)$ обозначен вектор математических ожиданий эталонных признаков, с помощью $R(x/\Omega_v)$ обозначена ковариационная матрица вектора признаков.

Пусть во время измерений имеет место произвольная гипотеза $\Omega \in G$ тогда x можно представить в виде

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

где, $R(x/\Omega_k)$ – ковариационная матрица центрированного случайного вектора погрешностей, а $M(x/\Omega_k)$ – вектор математических ожиданий эталонных признаков или образов, имеющих в системе наблюдения.

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

$$P(x/\Omega_k) = (2\pi)^{-m/2} |R(x/\Omega_k)|^{-1/2} \times \exp\left[-\frac{1}{2}(\tilde{x} - M(x/\Omega_k))^T R^{-1}(x/\Omega_k)(\tilde{x} - M(x/\Omega_k))\right]. \quad (3)$$

Разумно отнести наблюдение \tilde{x} к той гипотезе, для которой функция правдоподобия максимальна. Максимум функции правдоподобия достигается минимизацией функционала $J_k = \|\tilde{x} - M(x/\Omega_k)\|_{R(x/\Omega_k)^{-1}}^2$, 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.

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

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

В дальнейшем J_k будем называть оценочным функционалом, или просто функционалом

$$J_k = (\tilde{x} - M_k)^T R_k^{-1}(\tilde{x} - M_k), \quad (4)$$

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

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ КЛАССИФИКАЦИИ СОСТОЯНИЙ ЦИФРОВЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ И КОМПЛЕКСОВ ДЗЗ

Оценим погрешность классификации состояний средней вероятностью ошибки (Фукунага, 1979), позволяющей заранее оценить качество признаков и решающего правила для любого количества гипотез. Для вычисления средней вероятности ошибки $P_{\text{ош}}$ рассмотрим следующие величины: P_{kq} – условные вероятности того, что при наличии гипотезы Ω_q принята гипотеза Ω_k ; Π_{kq} – потери неправильного решения.

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 $P_{\text{ош}}$ неправильного решения

$$P_{\text{ош}} = \sum_{k=0}^{l-1} \sum_{q=0}^{l-1} P_{kq}, \quad \text{при } k \neq q. \quad (5)$$

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

$$J = (J_0, \dots, J_k, \dots, J_{l-1}), \quad (6)$$

тогда

$$P_{kq} = \int_{-\infty}^{+\infty} dJ_k \int_{-\infty}^{J_k} \dots \int_{-\infty}^{J_k} P(J/\Omega_q) \times dJ_0 \dots dJ_{k-1} dJ_{k+1} \dots dJ_{l-1}. \quad (7)$$

Рассмотрим произвольный функционал J_k как случайную величину

$$J_k = (\tilde{x} - M_k)^T R_k^{-1}(\tilde{x} - M_k). \quad (8)$$

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

$$\tilde{x} = M_q + \xi, \quad M_q = M(\Omega_q). \quad (9)$$

“Ошибочный” функционал J_k^q (вместо q -й гипотезы рассматривается k -я гипотеза) получается при подстановке (9) в (8)

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

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 R_k можно убрать индекс k , а слагаемое $\xi^T R_k^{-1} \xi$ не влияет на положение экстремума J_k по Ω_k . Для вывода плотности $P(J/\Omega_k)$ это слагаемое можно отбросить и рассмотреть соотношение

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

где

$$M_{k/q} = [(M_q - M_k)]^T R^{-1} [(M_q - M_k)], \quad (10)$$

$$\eta = 2\xi^T R^{-1} (M_q - M_k).$$

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

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

где $M_J = [M_{0/q}, M_{1/q}, \dots, M_{k/q}, \dots, M_{l-1/q}]^T$; K_J – условная ковариационная 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 (10) получим

$$M_{n/q} = (M_q - M_n)^T R^{-1} (M_q - M_n),$$

$$K_{k,n/q} = 4M\{\xi^T R^{-1} (M_q - M_k)\}[\xi^T R^{-1} (M_q - M_n)]^T\}.$$

Для упрощения дальнейших преобразований обозначим

$$(M_q - M_k) = m_k, \quad (M_q - M_n) = m_n. \quad (11)$$

Теперь запишем

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

С учетом обозначений (11) окончательно имеем

$$K_{k,n/q} = 4(M_q - M_n)^T R^{-1} (M_q - M_k); \quad (12)$$

$$k, n = 0, 1, \dots, l-1.$$

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 (7) переведем координаты вектора J в ортонормированный базис с помощью преобразования Карунена–Лоева (Корн, Корн, 1984):

$$I = CJ,$$

где матрица C составлена по столбцам из ортонормированных собственных векторов ковариационной матрицы K_J . Важно, что матрица

$$\Lambda = CK_J C^T$$

диагональна, причем, на диагонали расположены собственные числа матрицы K_J . Обозначим их $\lambda_{k/q}$, $k = 0, 1, 2, \dots, l-1$.

Справедливо равенство плотностей

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

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 K_J определены выражением (12)). Алгебраические преобразования позволили заменить плотность $P(J/\Omega_q)$ на плотность $P(I/\Omega_q)$, 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. Благодаря этому необходимо вычислить интеграл

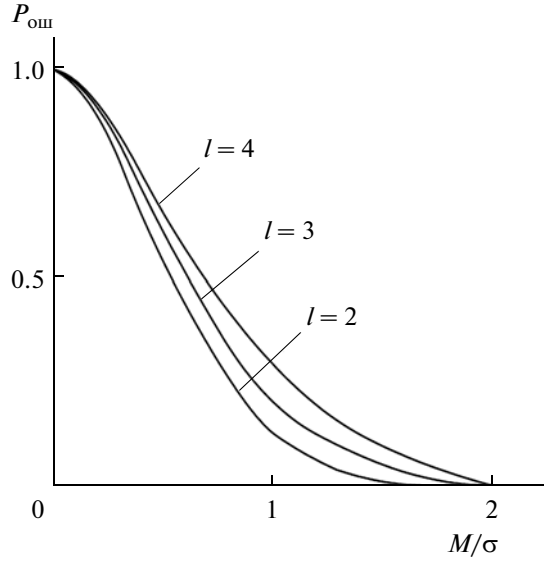


Рис. 2. Зависимость вероятности ошибочного распознавания от числа проверяемых гипотез.

$$P_{kq} = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^l} \int_{-\infty}^{\infty} \prod_{s=1}^{l-1} \lambda_{s/q} \int_{-\infty}^{I_k} \dots \int_{-\infty}^{I_k} \times \exp \left[-\frac{1}{2} \sum_{\substack{s=0 \\ s \neq q}}^{l-1} \frac{(I_s - \tilde{M}_{s/q})^2}{\lambda_{s/q}} \right] dI_0 \dots dI_{k-1} dI_{k+1} \dots dI_{l-1} \quad (13)$$

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

Преобразуем (13)

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

$$\times dI_0 \dots \frac{1}{\sqrt{2\pi\lambda_{k-1/q}}} \int_{-\infty}^{I_k} e^{-\frac{(I_{k-1} - \tilde{M}_{k-1/q})^2}{2\lambda_{k-1/q}}} dI_{k-1} \frac{1}{\sqrt{2\pi\lambda_{k+1/q}}} \times$$

$$\times \int_{-\infty}^{I_k} e^{-\frac{(I_{k+1} - \tilde{M}_{k+1/q})^2}{2\lambda_{k+1/q}}} dI_{k+1} \dots \frac{1}{\sqrt{2\pi\lambda_{l-1/q}}} \times$$

$$\left. \times \int_{-\infty}^{I_k} e^{-\frac{(I_{l-1} - \tilde{M}_{l-1/q})^2}{2\lambda_{l-1/q}}} dI_{l-1} \right\} e^{-\frac{(I_k - \tilde{M}_{k/q})^2}{2\lambda_{k/q}}} dI_k.$$

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

Аналогичным образом вычисляются остальные интегралы. После вычислений окончательно запишем

$$P_{kq} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\lambda_{k/q}}} \int_{-\infty}^{\infty} \prod_{\substack{s=0 \\ s \neq k}}^{l-1} \Phi \left(\frac{I_k - \tilde{M}_{s/q}}{\sqrt{\lambda_{s/q}}} \right) e^{-\frac{(I_k - \tilde{M}_{k/q})^2}{2\lambda_{k/q}}} dI_k = \quad (14)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{y^2}{2}} \prod_{\substack{s=0 \\ s \neq k}}^{l-1} \Phi \left(\frac{y\sqrt{\lambda_{s/q}} + \tilde{M}_{s/q} - \tilde{M}_{k/q}}{\sqrt{\lambda_{s/q}}} \right) dy,$$

где $y = \frac{I_k - \tilde{M}_{k/q}}{\lambda_{k/q}}$, $\Phi(\cdot)$ определяется выражением

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt.$$

Таким образом, выражения (14), (6), (5) можно использовать для оценки значимости параметров контроля комплекса ОЭС ДЗЗ, а так же заранее

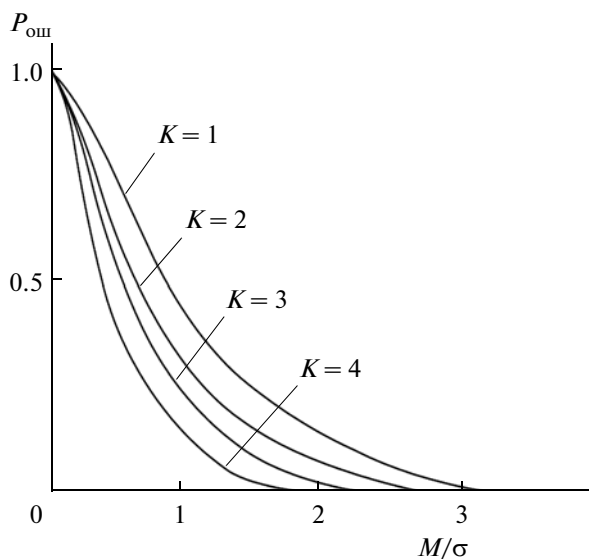


Рис. 3. Зависимость вероятности ошибочного распознавания от числа признаков.

рассчитать среднюю вероятность ошибки для любого количества гипотез.

В качестве вывода можно отметить, что в предложенной работе рассмотрены современные способы оценки технического состояния ОЭС ДЗЗ. Предложено для оценки технического состояния ОЭС и комплексов ДЗЗ воспользоваться статистической теорией распознавания образов.

Оценку эталонных признаков для каждого вида технического состояния предлагается осуществлять с использованием собранного статистического материала по результатам эксплуатации контролируемых систем, а также с использованием сильных методов решения задач — экспертных систем. Коррекцию полученных эталонных признаков под условия применения возможно выполнять на основе физико-аналитических исследований.

В работе предложена теория оценки эффективности системы распознавания технического состояния ОЭС ДЗЗ. Показано, что на основе аналитического выражения средней вероятности ошибки имеется возможность оценить качество признаков и решающего правила для любого количества гипотез и признаков рис. 2, 3. Анализ кривых, приведенных на рис. 2, показывает, что с увеличением числа проверяемых гипотез вероятность ошибочного распознавания увеличивается (имеется возможность оценить динамику изменения вероятности ошибочного распознавания). Зависимости на рис. 3 демонстрируют целесообразность использования нескольких признаков (параметров контроля) технического состояния.

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.

Для развития разработанного метода необходимо детально проработать вопрос информативности параметров контроля технического состояния (показателей качества изображения) ОЭС ДЗЗ с целью выбора наиболее информативных.

Оценку информативности параметров контроля технического состояния, скорее всего, необходимо связать с величиной воздействия каждого параметра на эффективность применения ОЭС и комплексов ДЗЗ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белоглазов И.Н., Казарин С.Н. Совместное оптимальное оценивание, идентификация и проверка гипотез в дискретных динамических системах // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1998. № 4. С. 26–43.
- Веселов Ю.Г. и др. Исследование характеристик цифровых фотоаппаратов // Техника кино и телевидения. 2003. № 6. С. 39–41.
- Веселов Ю.Г., Тихонычев В.В., Халтобин В.М. Оценка технического состояния иконоических оптико-электронных средств на основе теории распознавания образов. М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 2007. С. 16–17.
- ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М.: 1990. 22 с.
- Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М.: Наука, 1984. 588 с.
- Фукунага К. Введение в статистическую теорию распознавания образов / Под ред. А.А. Дорофеева. М.: Наука, 1979. 66 с.

The Model for Evaluation of Technical Condition of Optical-Electronic Systems for Earth Remote Sensing

Yu. G. Veselov

MECS of the Air Forces "N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin Air Force Academy", Moscow

In this paper we proposed to use statistical pattern recognition theory to evaluate the technical condition of digital optical-electronic systems and systems of remote sensing, worked out the approach to evaluating the effectiveness of the recognition technical condition system. An analytical expression of the average probability of error detection and showed that on its basis, it is possible to evaluate the quality of evidence and the decision rule.

Keywords: digital optical-electronic systems, Earth remote sensing, technical condition, theory of pattern recognition