# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ВИЗУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЕ НАЗЕМНО-КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

DOI: 10.18572/2686-8598-2019-3-3-26-40

Гаврилов Д.А.<sup>1</sup>,<sup>2</sup>, Ловцов Д.А.<sup>1</sup>, Татаринова Е.А.<sup>2</sup>

1 AO «Институт точной механики и вычислительной техники им. С.А. Лебедева РАН», Москва 119991. Россия

2 «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»

Московская область, г. Долгопрудный, 141701, Россия dal-1206@mail.ru; qavrilov.da@mipt.ru; tatarinova.ea@mipt.ru

Аннотация: представлены результаты исследований, связанные с обоснованием теоретических основ построения эффективных автоматизированных оптико-электронных систем наземно-космического мониторинга (АОЭС НКМ). Предлагаются научно-теоретические положения для решения сложной задачи (проблемы) эффективной переработки визуальной информации в АОЭС НКМ. Представлены анализ научных условий и постановка сложной задачи, функционально-логическая декомпозиция сложной задачи эффективной переработки визуальной информации в АОЭС на иерархическую совокупность частных задач меньшей сложности, разработка методологических вопросов информационной теории АОЭС НКМ, логическая последовательность этапов разработки объектно-ориентированной технологии эффективной АОЭС НКМ, методика решения сложной задачи функционирования АОЭС НКМ.

**Ключевые слова:** оптико-электронная система, мониторинг, переработка визуальной информации, детектирование, локализация, классификация, эффективность.

#### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в условиях глобальной информатизации особую актуальность приобретают вопросы обеспечения эффективности переработки визуальной информации при комплексном информационном мониторинге (наземном, аэровоздушном, космическом, подводном), осуществляемом в интересах решения различных народнохозяйственных и социально-экономических задач с помощью дистанционно пилотируемых аппаратов, оснащенных автоматизированными оптико-электронными системами [1, 2].

Современные цифровые средства формирования изображений охватывают практически весь электромагнитный спектр от гамма-излучения до радиоволн. Полученные изображения позволяют проводить неограниченное число операций и процедур по их обработке, существенно отличающихся как по сложности выполнения, так и по реализации. Тем не менее, основной целью данных операций является автоматизация процесса получения информации описательного характера, позволяющей производить расширенный логический анализ имеющихся графических данных. Изображения, получаемые для анализа в каждой из областей применения, являются уникальными и имеют особенности, связанные непосредственно с характеристиками внешней среды, устройствами считывания и фиксации изображения, условиями съемки, определенными факторами, создающими различные помехи, и непредвиденными обстоятельствами.

Существующие оптико-электронные системы наземно-космического мониторинга

(НКМ), использующие в своей работе автоматизированные методы переработки информации (назовем их автоматизированные оптико-электронные системы или АОЭС) часто недостаточно эффективны в отношении точности и оперативности при решении вопросов переработки визуальной информации. Основной причиной недостаточной эффективности является отсутствие формально-логического аппарата теории детектирования, локализации и классификации, обеспечивающего как выработку обоснованных требований к информационно-техническому и программному обеспечению процессов переработки информации, так и количественную оценку их эффективности и качества [2.3].

Большинство существующих методов решения задач НКМ предназначены для систем централизованной переработки информации и не обеспечивают учета большинства факторов неопределенности, неизбежно возникающих в сложных системах. Одним из путей повышения эффективности переработки информации в АОЭС НКМ является рациональное распределение частных задач переработки информации по основным подсистемам АОЭС НКМ. В основе решения информационных задач лежит разработка научно-методологических положений (НМП), формально-математического аппарата (ФМА) и основанном на них информационно-математическом обеспечении (ИМО) оперативной переработки визуальной информации, учитывающем особенности децентрализованной переработки информации. Состав специального ИМО определяется необходимостью наличия в нем комплекса эффективных алгоритмов, направленных на повышение качества детектирования, локализации и классификации, уменьшения разрядности вычислений для их ускорения, эффективного использования разреженности данных, а также адаптация классических и нейросетевых алгоритмов для решения поставленных целевых задач. [4]

Таким образом, для повышения эффективности решаемых задач является актуальной разработка совокупности методологических положений новой информационной теории АОЭС НКМ, описывающей различные состояния оптико-электронных систем, возникающих в ходе их работы, и позволяющих обеспечивать необходимую точность, устойчивость, оперативность и живучесть детектирования, локализации и классификации объектов в автоматизированных оптико-электронных системах наземно-космического мониторинга (АОЭС НКМ), а также эффективное управление процессом обработки фото- и видеоизображений с учетом отраслевых особенностей.

Объектом настоящего исследования является АОЭС НКМ, обеспечивающая оперативное решение задач переработки информации в видимом и инфракрасном диапазонах спектра, на основе применения комплекса средств оптико-электронной техники.

Предметом исследования является совокупность научно-методологических и теоретических положений, а также информационно-математическое обеспечение АОЭС НКМ, реализующее математические методы переработки визуальной информации.

#### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ. МЕТОДЫ

В общем виде процесс переработки визуальной информации в АОЭС НКМ можно описать следующим образом: распределение энергии источника светового излучения по пространственным координатам (x, y), времени t и волны  $\lambda$  длине, описывается функцией  $C(x, y, t, \lambda)$ . Наблюдаемое изображение  $\Phi$ , характеризующееся множеством  $\Phi$  его параметров и множеством  $\Phi$  параметров входных информационных искажений, включающих как случайные природные информационные сбои и ошибки  $\Phi$  (искажения стабилизации) так и преднамеренные деструктивные возмущающие факторы информационно-технического воздействия  $\Phi$ 0 поступающее в АОЭС НКМ, которая характеризуется множеством  $\Phi$ 1 функциональных параметров, является результатом

усреднения функции С(x, y, t, λ) по диапазону длин волн и описывается выражением:

$$\Phi = \int_{0}^{\lambda \max} C(x, y, t, \lambda) R(\lambda) d\lambda + f(P, V, \Delta \lambda), \quad (1)$$

где  $R = \langle B, n, v(\lambda), \delta, r_s, \chi, \omega, H_r, H_{3\varphi}, \varepsilon, \Psi \rangle$  В – тип сенсора регистратора; n – размер сенсора регистратора; v – спектральная чувствительность сенсора регистратора;  $r_s$  – разрешающая способность;  $\delta$  – чувствительность;  $\chi$  – битность;  $\omega$  – температура сенсора; Hг – светосила объектива; Hэ $\varphi$  – э $\varphi$  фективная светосила;  $\varepsilon$  – линейное увеличение;  $P = \langle p, r, \rho \rangle$ ; p –динамический диапазон; r – контраст;  $\rho$  – резкость;  $\Psi = \langle \Omega, V \rangle$  – множество  $\varphi$  функциональных ин $\varphi$  ормационных искажений входных потоков:

 $\Omega = \langle \omega_R, \omega_A, \omega_{sh}, \omega_k, \omega_{\ni}, \omega_{\exists}, \omega_{\varphi}, \omega_c \rangle$  искажения, вносимые физической природой конструкции оптико-электронной системы;  $\omega$  – шум считывания;  $\omega_{A}$  – шум предусиления;  $\omega_{sh}$  – дробовой шум;  $\omega_{k}$  – уменьшение контрастности;  $\omega_{g}$  – ошибка экспозиции;  $\omega_{g}$  – неоднородная засветка;  $\omega_{\varphi}$  – ошибка фокусировки;  $\omega_{c}$  – смаз;  $V = \langle v_u; v_s; v_w; v_w; v_p \rangle$  – искажения, вносимые противником;  $v_u$  – имитовставка;  $v_s$  – замутнение потока;  $v_s$  – хищение информации;  $v_p$  – разрушение информационных данных;  $\Delta \lambda = \lambda_{max} - \lambda_{min}$ .

На первом этапе изображение Ф проходит процессы предварительной переработки: стабилизации, фильтрации, шумоподавления, субъективного и объективного улучшения качества и др.; набор операций для осуществления предварительной переработки достаточно полно описан в научной литературе и может считаться стандартным.

Основные процессы, связанные с переработкой визуальной информации, осуществляются на втором этапе и включают анализ сцены (экспозиции), выделение геометрической структуры видимого поля и выбор методов детектирования и классификации объекта интереса (нейросетевой, классический, комбинированный). С помощью данных основных методов проводятся измерения характеристик изображения, после чего поступившая информация передается непосредственно на переработку и распознавание множества D объектов интереса при этом на каждом этапе осуществляется верификация и контроль качества распознавания и оценки сцены с учетом общей логической организации системы.

Основной целью функционирования многоуровневой АОЭС НКМ как информационной системы можно считать обеспечение минимально допустимой неопределенности (энтропии) Н соответствия множества {Q} фактических значений показателей (характеристик) качества (включая показатели детектирования, локализации и классификации) переработки визуальной информации множеству {Q^0} требуемых значений в условиях целевого применения АОЭС НКМ при определенных ограничениях на временные и информационные ресурсы [5]. Таким образом, в качестве количественной меры результативности функционирования АОЭС НКМ можно использовать апостериорную информационную энтропию соответствия показателей качества процессов, осуществляемых в АОЭС, требуемым значениям, рассчитанную в результате проведения  $n=\overline{1,N}$  этапов переработки визуальной информации, с учетом оценок  $Q^*C_N(\Psi)$  вероятностных характеристик  $C_n$ , действующих на АОЭС помех, возмущений и сбоев (ошибок):

$$H_N(Q \subseteq Q^0) = H_H - \sum_n I_n + H[Q_N \subseteq Q^0 | Q^*(C_N(\Psi)]]$$
 (2)

где H<sub>н</sub> – начальная информационная энтропия соответствия показателей качества (точности и оперативности при ограничении на устойчивость и живучесть и др.) заданным требованиям, определенная по результатам проектирования и стендовых

испытаний AOЭC; I \_ – количество визуальной информации, полученной на n-м этапе переработки при многократном оценивании путем уменьшения энтропии соответствия за счет приближения условий переработки к требуемым; Н[-]- апостериорная энтропия соответствия показателей качества требуемым значениям.

При этом неопределенность (1) соответствия тактико-технических характеристик и требований (TTX и TTT) в системе должна быть минимизирована. Общую математическую постановку сложной задачи (проблемы) эффективной переработки визуальной информации в АОЭС можно, в частности, сформулировать следующим образом: Дано: ситуационная модель функционирования АОЭС НКМ характеризуется кортежем:

$$z = \langle R.E.\Omega.\Phi(D).M.A\rangle$$

где R – множество функциональных параметров АОЭС; Е – множество вариантов разметки изображений;  $\Omega$  – множество параметров искажений стабилизации;  $\Phi(D)$  – множество обучающих выборок в информационной базе; D – множество объектов распознавания;  $M = \{m, \}, l = 1, ..., L - множество технологических методик, включаю$ щих множество способов т, дешифрирования организационно-технологического характера;  $A = \{a_i\}, j=1,...,J-$  множество алгоритмов  $a_i$  оптимизации.

Требуется: найти рациональный (оптимальный) вариант z\* модели функционирования АОЭС, обеспечивающий решение множества целевых задач переработки информации с помощью соответствующих четырёх функциональных подсистем (стабилизации; формирования информационной базы; детектирования, локализации и классификации; функционального <u>диаг</u>ностирования в режиме реального времени):

$$K:Q(z^*) = \sum_{i} \gamma_i Q_i(z^*) = \min_{\substack{\{z\} \ Q(z) = \{Q^{C}, Q^{M\delta}, Q^{ДЛК}, Q^{\Phi A}\},}}$$
 (3)

где  $z^*$  ∈ Z – оптимальная модель функционирования AOЭC;  $Z = \{z\}$  – исходное множество допустимых альтернатив;  $\gamma_i \ge 0$ ;  $\sum \gamma_i = 1$ , i = 1,...,4 – весовые коэффициенты показателей качества подсистем;  $Q^c$  – показатель качества процесса стабилизации (в частности,  $Q^c = \Omega$  – набор параметров искажений стабилизации);  $Q^{ub}$  – показатель качества формирования информационной базы для обучения нейросетей для решения задач распознавания визуальной информации ( $Q^{u6} = E -$  набор размеченных изображений); Q^длк – показатель качества переработки визуальной информации в АОЭС ( $Q^{\partial n\kappa} = \Delta$  – погрешность точности дешифрирования);  $Q^{\phi\partial}$  – показатель информационной эффективности, учитывающий функциональное диагностирование АОЭС НКМ в режиме реального времени ( $Q^{\phi \partial} = H_{ans}$  - апостериорная энтропия соответствия показателей качества целевого функционирования АОЭС требуемым значениям). Данная проблема относится к классу сложных задач иерархического многоэтапного стохастического программирования (поскольку решение разнесено в пространстве и времени и принимается в условиях меняющейся обстановки) и для ее решения необходима разработка эффективного информационно-математического обеспечения.

#### АНАЛИЗ И ДЕКОМПОЗИЦИЯ НАУЧНОЙ ПРОБЛЕМЫ

Для решения проблемы осуществлена функционально-логическая декомпозиция сложной задачи (3) эффективной переработки визуальной информации в АОЭС на иерархическую совокупность частных задач меньшей сложности и обеспечена вариабельность частных решений для получения рационального решения основной задачи.

Задача 1. Синтез и оптимизация информационных процессов стабилизации визу-

ального потока в условиях информационного соперничества [6].

Дано: входное видеоизображение Ф

Найти:  $a^*$ — рациональный алгоритм восстановления кадров в режиме реального времени, обеспечивающий компенсацию сдвига входного изображения в пределах возможного заданного смаза и формирующий стабилизированное изображение  $\Phi_ c=\Sigma_i \phi, i=1,...,n$ , где n- количество кадров  $\phi$ . Формально задача сводится к следующей математической постановке:

$$\begin{cases}
K: \Omega(\mathbf{a}^*, \Phi_{\mathbf{c}}) \in \Omega^0 \\
\tau(\mathbf{a}^*) \leq \tau^0 \\
L(\mathbf{a}^*) \leq L^0
\end{cases}$$

$$L(\mathbf{a}^*) = \min_{\{\mathbf{a}^*\}} \tag{4}$$

где W, W<sup>0</sup> – множество фактических (с учетом множества V входных искажений исходного потока) и допустимых значений параметров искажений стабилизации, соответственно;  $\tau$ ,  $\tau$ <sup>0</sup>- фактическое и максимально допустимое время вычисления совмещения двух кадров, соответственно; L,L<sup>0</sup>- фактическая и максимально допустимая вычислительная сложность алгоритма а\*, соответственно.

При этом вычислительная сложность алгоритма определяется выражением:

$$L(\mathbf{a}^*) = \sum_{i} L(\mathbf{a}_i),$$

где  $L(a_i) = \sum_i (C(a_i) + \beta_i J(a_i))$  вычислительная сложность алгоритма  $a_i$ ;  $C(a_i)$  – затраты на переработку информации алгоритмом  $a_i$ ;  $\beta_i$  – затраты на транспортировку;  $J(a_i)$  – объем полученных данных.

Результатом решения задачи является рациональный алгоритм  $a_i$  формирования стабилизированного изображения  $\Phi_c$ , которое используется в качестве исходных данных для задач 2 и 3.

Задача 2. Синтез и оптимизация процессов формирования неоднородной информационной базы АОЭС на основе эффективного обучения нейросетей для решения задач распознавания визуальной информации, как в режиме реального времени для обеспечения оперативной подготовки информационной базы, так и в фоновом режиме при реализации процесса пополнения существующей информационной базы непосредственно в ходе переработки визуальной информации [7].

Дано: множество  $N_1$  кадров  $\phi_i$  стабилизированного изображения  $\Phi_c = \sum_i \phi_i$ , где  $i = 1, \dots, N_1$  и множество  $N_2$  кадров  $\phi_j$  искусственно синтезированных изображений  $\Phi' = \sum_j \phi_j$ , где  $j = 1, \dots, N_2$ .

Найти:  $M_1^* \in \mathbf{M}_1 -$  ффективную методику подготовки обучающих выборок и обучения алгоритмов из множества  $\mathbf{M}_1$  допустимых методик создания информационной базы, содержащей множество  $\Phi(D) = \Phi_c \cup \Phi'$  обучающих выборок для множества  $D = \Phi_c \cup \Phi'$  обучающих выборок для множества  $D = \Phi_c \cup \Phi'$  обучающих выборок для множества  $\Phi_c \cup \Phi'$  обучающих выборок для множества  $\Phi_c \cup \Phi'$  обучающих при этом  $\Phi_c \cup \Phi'$  обучающих признаками  $\Phi_c \cup \Phi'$  обучающих признаками  $\Phi_c \cup \Phi'$  обучающих признаками  $\Phi_c \cup \Phi'$  обучающих выборок для множества  $\Phi_c \cup \Phi'$  обучающих выборок и обучения для  $\Phi_c \cup \Phi'$  обучающих выборок и обучения для  $\Phi_c \cup \Phi'$  обучающих выборок и обучения для  $\Phi_c \cup \Phi'$  обучающих выборок для множества  $\Phi_c \cup \Phi'$  обучающих выборок для  $\Phi_c \cup \Phi'$ 

Формально задача сводится к следующей математической постановке:

$$\begin{cases}
K:E[M_1^*, \Phi(D)] \in E^0 \\
D(M_1^*) \le D^0 \\
\Pi(M_1^*) \ge \Pi^0
\end{cases}$$

$$\Pi(M_1^*) = \max_{\{M_1\}}$$
(5)

где E,E<sup>0</sup> – множество фактических и допустимых вариантов разметки изображений (с учетом множества Р параметров входного изображения), соответственно: D. D<sup>o</sup> – фактическое и максимально возможное количество объектов в обучающей выборке, соответственно;  $\Pi$ ,  $\Pi^0$  – фактическая и минимально допустимая производительность комплекса при использовании методики М,\* подготовки обучающих выборок и обучения алгоритмов, соответственно.

В результате решения задачи 2 формируется проблемно-ориентированная внутри-машинная информационная база АОЭС НКМ, представляющая собой комплекс специализированных баз данных и знаний функциональных подсистем АОЭС, обеспечивающих эффективное решение целевых и функциональных задач, включая детектирование, локализацию и классификацию [7].

Задача 3. Синтез и оптимизация информационных процессов распознавания визуальной информации, включая процессы детектирования, локализации и классификации [8].

Дано: множество N1 кадров стабилизированного изображения Ф, и информационная база, содержащая множество Ф(D) обучающих выборок.

Найти: М₃\*∈М2 – эффективную методику дешифрирования (детектирования, локализации и классификации) подмножества  $D_{\nu} = \{d_{\nu i}\}$ , объектов интереса  $d_{\nu i}$  i = 1,...,l, обладающих признаками k = 1,...,K в стабилизированном изображении  $\Phi$  с минимальной погрешностью  $\Delta$  из множества  $\mathbf{M}_{s}$  допустимых методик, с помощью множества Ф(D) обучающих выборок.

Формально задача сводится к следующей математической постановке:

$$\begin{cases}
K: \Delta[M_2^*, \Phi(D)] = \min_{\{M_2\}} \\
t(M_2^*) \le t^0, \\
h(M_2^*) \le h^0
\end{cases}$$
(6)

где  $\Delta$  – погрешность дешифрирования; t, t $^0$  – фактическое и максимально допустимое время работы методики M,\* дешифрирования, соответственно; h,h0 – фактическая и минимально допустимая достоверность, соответственно.

Для решения задачи (6) используются рациональные маршруты детектирования, локализации и классификации, основанные как на классических, так и на нейросетевых методах, а также их комбинациях. Выбор требуемых методов и алгоритмов оперативной переработки информации осуществляется при условии ограничения вычислительных затрат на выполнение частных операций детектирования, локализации и классификации и повышения информационной эффективности каждой выполняемой операции. В процессе решения осуществляется расширенный логический анализ входных визуальных данных. На основе полученной информации оператор может сформировать план дальнейшего использования выявленных аналитических данных.

Задача 4. Оптимизация функционирования АОЭС НКМ на основе разработки методик функционального диагностирования АОЭС НКМ в режиме реального времени

Дано: результаты решения 1-й, 2-й и 3-й задач:  $W(a^*), E(M_a^*), \Delta(M_a^*)$ .

Найти: оптимальную модель z\*функционирования АОЭС НКМ, обеспеченную рациональным набором R\* функциональных параметров, при которой апостериорная энтропия, характеризующая неопределенность соответствия ТТХ и ТТТ к целевому функционированию АОЭС НКМ, достигает минимального значения.

Формально задача сводится к следующей математической постановке:

$$\begin{cases} K: H_{\rm aps}(z^*) = \min \\ z = \langle R^*, \Omega(a^*), E(M_1^*), M_2^*, \Phi(D_k) \rangle \\ R^* = \langle B^*, n^*, \nu^*(\lambda), \delta^*, r_s, \chi, \omega, H_{\Gamma}, H_{9\dot{\Phi}}, \varepsilon, \Psi \rangle \end{cases}$$
(7)

где  $z^*(R^*, a^*, M_1^*, M_2^*) \in Z$  – оптимальная модель функционирования АОЭС НКМ из множества Z допустимых альтернатив.

В результате решения данной взаимосвязанной совокупности частных научных задач (4) – (7) достигается решение сложной задачи (проблемы) эффективной переработки визуальной информации в АОЭС НКМ.

#### РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИЧЕСКИХ ВОПРОСОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕОРИИ АОЭС НКМ

Построение эффективной автоматизированной оптико-электронной системы наземно-космического мониторинга (АОЭС НКМ) представляется возможным на основе проблемно-ориентированного варианта комплексного «ИКД»-подхода («информационно-кибернетически-дидактического») [1], т.е. системного подхода с акцентированием внимания на его информационном, кибернетическом и дидактическом аспектах, состоящего в интеграции методологии информационного подхода (при котором объект рассматривается как целенаправленная информационная система), методологии кибернетического подхода (при котором объект рассматривается как система управления на уровне информационных процессов и алгоритмов функционирования информационной базы) с методологией дидактического подхода (при котором объект рассматривается как система, способная к самообучению) в составе методологии системного подхода (при котором объект рассматривается как сложноорганизованная многоуровневая и многоаспектная система).

Интеграции информационного и дидактического аспектов системного подхода способствует формируемая на их основе общенаучная энтропийная концепция. В свою очередь интеграции информационного и кибернетического аспектов способствует целевая концепция, которая позволяет сформировать план прикладных исследований (рис. 1).

Информационная теория сложных АОЭС НКМ основана на объектно-ориентированной технологии создания информационно-математического обеспечении и программно-аппаратных средств переработки визуальной информации [10, 11]. В качестве концептуально-логической модели АОЭС НКМ использована известная инвариантная функциональная структура, представленная в [1] в виде комплекса функциональных подсистем: измерения ( $P_1$ ), наблюдения ( $P_2$ ), идентификации ( $P_3$ ), принятия решений ( $P_4$ ), централизованной координации ( $P_5$ ), информационного обмена ( $P_6$ ) и информационной защиты ( $P_7$ ).

Рис. 1. Проблемно-ориентированный вариант комплексного «ИКД»-подхода к исследованию сложных систем.



Схема реорганизации и отображение сложной АОЭС НКМ на концептуально-логической модели представлена на рис. 2.

Уровни реорганизации характеризуются следующим образом:

Уровень 1. Выбор метода, определение способов и средств решения задач. Основными подсистемами, функционирующими на данном уровне, являются подсистема измерения (Р.) и подсистема координации (Р.).

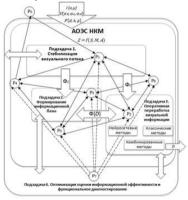
Уровень 2. Самоорганизация, выбор стратегической модели. Основными подсистемами, функционирующими на данном уровне, являются подсистема наблюдения (Р.) и подсистема идентификации (Р.).

*Уровень 3.* Адаптация и модификация методов для решения задач в условиях информационного противоборства. Основной подсистемой, функционирующей на данном уровне, является подсистема информационного обмена (Р.).

Уровень 4. Административное управление, принятие решений на основе полученной аналитической информации. Основной подсистемой, функционирующей на данном уровне, является подсистема принятия решений (Р.).

Требуемая степень защищенности и безопасности информационных массивов поддерживается подсистемой информационной защиты (Р.) непрерывно на всех уровнях.

Рис. 2.Схема реорганизации и отображение многоуровневой АОЭС НКМ на кониептуально-логической модели



Проведем анализ задачи переработки информации в АОЭС АКМ. Информационно-математическая структура АОЭС НКМ представлена на рис. 3.

AO3C HKM Po P1 еоретическое, научно-методологическое P2 P3 P6 P4 P7 Формально-математический аппарат построения АОЭС НКМ

Рис.3. Информационно-математическая структура АОЭС НКМ

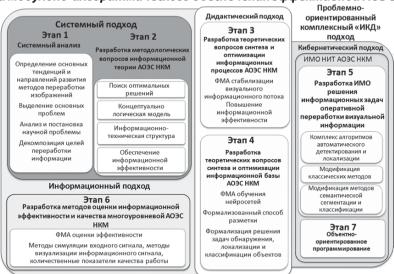
Входной информационный оптический поток, поступающий в АОЭС АКМ и подлежащий переработке, содержит множество параметров, характеризующих свойства объекта. Данные параметры, как правило, включают в себя формализованные и неформализованные образы объекта. Формализованные образы объекта представляют собой множество формализованных описаний объекта, отражающих семантические связи между его смысловыми элементами, множество проверок, реализуемых при решении задачи анализа. Неформализованные образы объекта содержат множество знаний об объекте, которыми система располагает и может пополнять в процессе работы, и множество вопросов, формулируемых при принятии решения.

Для решения каждой задачи переработки входной визуальной информации используется определенный набор параметров, при этом различные комбинации параметров могут применяться для постановки и решения самых разнообразных задач. Реализация процесса, как правило, проходит через два последовательных этапа. На первом этапе осуществляется наблюдение за состояниями объекта и соответствующими им функциональным состояниям системы. На втором этапе происходит формализация технического состояния системы, в результате переработки формируется информационная модель решения задачи [12, 13].

### ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ЭТАПОВ РАЗРАБОТКИ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ЭФФЕКТИВНОЙ АОЭС НКМ

Логическая последовательность разработки формально-математического аппарата и совокупности научно-методических положений к построению АОЭС НКМ в условиях информационного противоборства может быть представлена в виде методологической диаграммы, представленной на рис 4.

Puc. 4. Методологическая диаграмма этапов разработки и логической организации модульно-алгоритмического обеспечения эффективной АОЭС НКМ



Разработка объектно-ориентированной технологии создания программно-аппаратных средств переработки визуальной информации, основанной на информационно-математическом обеспечении многоуровневой АОЭС НКМ, включает следующие этапы:

В рамках системного подхода реализованы этапы 1 и 2.

*Этап 1.* Системный анализ, включающий определение основных тенденций и направлений развития методов переработки изображений, построенных на основе

классических и нейросетевых подходах; выделение основных проблем, возникающие при переработке визуальной информации; распределение задач по функциональным подсистемам в соответствии с архитектурой АОЭС НКМ; анализ и постановка научной проблемы; декомпозиция целей переработки информации.

Этап 2. Разработка основных методологических положений информационной теории АОЭС НКМ, в том числе поиск оптимальных решений; формирование концептуально-логической модели: разработка информационно-технической структуры: обеспечение информационной эффективности АОЭС НКМ в условиях информационного противоборства. Разработанные методологические положения основаны на доказанном утверждении о неизменности степени информационной энтропии системы [14].

В рамках дидактического подхода реализуются этапы 3 и 4.

Этап 3. Разработка теоретических положений синтеза и оптимизации информационных процессов АОЭС НКМ, реализуемых в ходе ситуационного планирования в условиях информационного противоборства, обеспечивающих обоснование параметров АОЭС НКМ, требуемых для качественной переработки информации, и оперативной выработки организационно-технических решений в процессе целевого функционирования АОЭС НКМ, включая начальный этап функционирования. Доказано утверждение о квадрате расстояния любого элемента псевдоевклидова пространства.

Утверждение 1: квадрат расстояния любого элемента псевдоевклидова пространства  $x \in \mathbb{R}^M$  до аффинной комбинации  $x_c \in \mathbb{R}^M$  элементов  $\{x_1, ..., x_c\}$  с коэффициентами коэффициентами с=(c1,...,c $_{n}$ ), где  $x_{c}=\sum_{k=1}^{n}c_{k}x_{k}\in\mathbb{R}^{M}$ ,  $\sum_{k=1}^{n}c_{k}=1$   $C_{c}=1$ , определяется равенством

$$r^{2}(x_{c},x) = \sum_{k=1}^{n} c_{k} r^{2}(x_{k},x) - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{n} \sum_{l=1}^{n} c_{k} c_{l} r^{2}(x_{k},x_{l}).$$

Этап 4. Разработка теоретических положений синтеза и оптимизации неоднородной проблемно-ориентированной внутри-машинной информационной базы АОЭС НКМ, предназначенной для создания прикладной интеллектуальной человеко-машинной АОЭС НКМ, обеспечивающих повышение информационной эффективности в условиях информационного противоборства. Доказано утверждение об оси симметрии контура [2].

Утверждение 2: Если имеется симметричный контур  $U = \{u_l\}_{l=0}^{N-1}, \;$ ось симметрии которого совпадает с осью абсцисс, а точка  $\mathbf{u}_{_{0}}$  лежит на оси симметрии, тогда для дескриптора Фурье  $F = \{f_{l}\}_{l=0}^{N-1}$  контура U выполняется равенство

$$I_m(f_l)=0$$
,  $l=\overline{0,N-1}$ , где  $f_l=u_0+\sum_{k=1}^{N-1}u_k\cdot exp\Big(-i\cdot rac{2\pi}{N}\cdot l\cdot k\Big)$ ,  $l=\overline{0,N-1}$  дискретное преобразование Фурье для контура U.

В рамках информационного подхода реализуется этап 5.

Эman 5. Разработка теоретических положений синтеза и оптимизация информационных процессов распознавания визуальной информации, полученной непосредственно от объекта и необходимой для принятия дальнейших решений, а также составления прогнозов и оперативного планирования тактики поведения в условиях информационного соперничества для обеспечения повышения информационной эффективности АОЭК НКМ. Доказано утверждение об эквивалентности алгоритмов распознавания.

*Утверждение 4:* если метрические потенциалы  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  подобны, то алгоритмы распознавания  $G_{\Phi_1}$  и  $G_{\Phi_2}$  — эквивалентны  $\Phi_{\tilde{\alpha}_1}(\overline{x})$  - метрический потенциал поля, создаваемого вершиной  $\tilde{\alpha}$  в точке  $\overline{x}$  про-

 $\Phi_{\tilde{\alpha}_1}(\overline{x})$  - метрический потенциал поля, создаваемого вершиной  $\tilde{\alpha}$  в точке  $\overline{x}$  пространства  $\overline{D}^N$ . Каждый такой потенциал определяет метрический алгоритм распознавания  $G_{_0}$  с решающим правилом  $R_{_0}$ . Алгоритмы  $G_{_1}$  и  $G_{_2}$  считаются эквивалентными, если при  $\overline{x} \in \overline{D}^N$   $\mathrm{sign}(R_0^{(1)}(\overline{x})) = \mathrm{sign}(R_0^{(2)}(\overline{x}))$ , то есть для любого  $\overline{x} \in \overline{D}^N$  алгоритмы  $G_{_1}$  и  $G_{_2}$  работают одинаково.

В рамках кибернетического подхода реализуются этапы 6 и 7.

*Этап 6.* Оптимизация оценки информационной эффективности и качества, разработаны математические методы функционального диагностирования многоуровневой АОЭС НКМ в условиях информационного противоборства [15].

Этап 7. Разработка и обоснование организационно методического обеспечения внедрения и проверки полученных результатов, оперативная переработка визуальной информации, на основе экспериментальных исследований разработанных алгоритмов [16].

#### МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ СЛОЖНОЙ ЗАДАЧИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АОЭС НКМ

Для решения поставленной сложной задачи функционирования АОЭС НКМ разработана методика, использующая новую эффективную технологию переработки визуальной информации в АОЭС НКМ в режиме реального времени с требуемым качеством. Разработка технологии создания программно-аппаратных средств переработки визуальной информации, основанной на информационно-математическом обеспечении многоуровневой АОЭС НКМ, осуществляется путем последовательного выполнения совокупности шагов-этапов до получения результата. Технологическая последовательность шагов обеспечивается упорядоченной совокупностью необходимых моделей, методов и алгоритмов.

*Шаг 1*. Ввод исходных данных для переработки с учетом заданной ситуационной модели z функционирования АОЭС НКМ согласно (1).

*Шаг 2.* Оценка движения камеры и стабилизации видеоизображения. Восстановление кадров визуального информационного потока, формирование стабилизированного изображения  $\Phi$  с, путем решения первой частной задачи (4).

Шаг 3. Формирование информационной базы АОЭС НКМ, обучение нейросетей для решения задач распознавания визуальной информации. Формирование информационной базы осуществляется на основании заданных условий путем решения частной второй задачи (5). Процесс подготовки информационной базы включает разметку изображений с помощью разработанного универсального метода, учитывающего основные принципы построения обучающих выборок для обучения нейросетевых алгоритмов по комплексным сценариям.

Шаг 4. Дешифрирование стабилизированного изображения Ф\_с. Разработка и модификация эффективных алгоритмов оперативной переработки визуальной информации с помощью формализованных процедур детектирования, локализации и классификации объектов на аэрокосмических изображениях, основанных на решении третьей частной задачи (6).

*Шаг 5.* Функциональное диагностирование АОЭС НКМ, оценка соответствия заданного качества путем решения частной четвертой задачи (7).

*Шаг 6.* Выдача результата в виде упорядоченной информационной последовательности описательного характера необходимой для принятия дальнейших решений, а также составления прогнозов и оперативного планирования тактики поведения в условиях информационного соперничества.

Таким образом, получена методология разработки и логической организации мо-

дульно-алгоритмического обеспечения эффективной АОЭС НКМ в условиях информационного противоборства.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основе разработанного ФМА обнаружения, локализации и классификации создан портативный программно-аппаратный комплекс обнаружения, селекции, классификации и сопровождения целей (ПАК обнаружения). Представленный ПАК обнаружения реализован на аппаратной платформе Jetson Tx1/Tx2. Особенностью данного ПАК обнаружения является высокая вычислительная мошность не менее 1 Тфлопс при достаточно низком энергопотреблении, малых габаритных размерах и массе. Разработка предназначена для использования в бортовых системах обработки фото- и видеоданных без необходимости сжатия, шифрования и последующей передачи на землю, что существенно сокращает время принятия решения и минимизирует риск утечки.

Проведено исследование эффективности работы алгоритмов применительно к имеющейся базе изображений автомобильной техники, показавшее, что сети на основе архитектур «U-Net» [17], «YOLO» [18, 19], «SSD» [20, 21], Mask R-CNN» [22, 23], и «Faster R-CNN» [24, 25] не обеспечивают достаточной точности обнаружения и локализации в виду относительно малых размеров объектов распознавания (характерный размер объекта автомобильной техники для изображений в базе данных составляет 30 пикселей) (табл. 1).

Таблица 1– Сравнение эффективности работы алгоритмов детектирования

Метод обнаружения и локализации	Показатель качества обнаружения и локализации
Авторское решение	0,92
UNet (SpaceNet)	0,82
YOLO (v3)	0,78
SSD	0,76
Mask R-CNN	0,63
Faster R-CNN	0,59

Выполнена теоретико-экспериментальная оценка точности дешифрирования видовой аэрокосмической информации. В качестве объектов интереса использовались объекты авиационной и сухопутной техники. В качестве базовых метрик рассмотрены функции точности (precision, p) и полноты (recall, r) для первых k объектов из ответов алгоритма:

$$r(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{k} z_i, \, p(k) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^{k} z_i, \, r(0) = 0, \, p(0) = 0,$$

где  $z=(z_1,z_2,...z_M)$  – вектор true positives.

Функционалом качества является площадь под кривой точности/полноты:

$$Q = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{M} (p(k) + p(k-1))(r(k) + r(k-1)).$$

На выходе выдаётся список вероятностей принадлежности обнаруженного и локализованного объекта к определённым типам объектов с заданным критерием корректности, которые являются исходными данными для подсистемы принятия решений. Критерий корректности (качества) topN алгоритма классификации объектов определяется как доля объектов, для которых отсутствует истинный тип в первых N типах списка вероятностей принадлежности к типам. Список типов с вероятностями принадлежности объекта к типу представляет собой отсортированный по убыванию вероятностей список пар

$$(id_i, p_i); i \in \{1,...N\}; \sum ipi = 1; \forall i < j, pi > pj,$$

где  $id_i$  – целочисленный идентификатор типа объекта;  $p_i$  – вероятность принадлежности объекта к этому типу.

Результаты проведенных экспериментов представлены в таблице 2

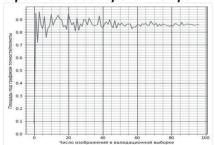
Название метрики	Значение показателя
Метрика обнаружения и локализации авиационной	BO: 0,93
техники	ВЛТ: 0,07
Метрика классификации авиационной техники (top3)	0,89
Метрика обнаружения и локализации сухопутной техники	BO: 0,9
	ВЛТ: 0,1
	0,74 (top1)
Метрика классификации сухопутной техники	0,82 (top3)
	0,93 (top5)

ВО – вероятность обнаружения;

ВЛТ – вероятность ложной тревоги.

Погрешность измерения метрик качества в зависимости от числа изображений в валидационной выборке представлена на рис. 5.

Рис. 5. Погрешность измерения метрик качества



Эксперименты по автоматическому обнаружению и сопровождению объекта интереса в видеосигнале с помощью технологий искусственного интеллекта, показали высокие показатели обнаружения и сопровождения объектов на видеопоследовательностях (рис. 6): функционал качества – 0,922; средняя мера Жаккара – 0,865; ошибка определения координат – 9,02%, частота срывов – 0,000617.

Рис. 6. Результаты работы алгоритмов обнаружения (а) и сопровождения (б) объектов в видеосигнале





a) 6)

#### ОБСУЖЛЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка теоретических основ и формализованного описания процессов функционирования автоматизированной оптико-электронной системы позволяет представить существующие процессы изменения параметров системы и определить механизмы и способы достижения заданных качественных показателей.

Разработанная объектно-ориентированная технология переработки визуальной информации включает функционально достаточный комплекс методов для решения основных частных задач АОЭС НКМ и многоуровневых решений, основанных как на классических подходах к обработке изображений, так и с применением технологий искусственного интеллекта.

Выделение унифицированных подходов к описанию, разработке и использованию разноуровневых методов распознавания фото- и видеоданных различного типа позволяет разрабатывать новые усовершенствованные методы эффективной обработки изображений, а также создавать их программные и аппаратные реализации, характеризующиеся высоким уровнем качества и оперативности.

#### **ЛИТЕРАТУРА:**

- 1. Ловцов Д.А. Информационная теория эргасистем : тезаурус / Д.А. Ловцов. 2-е изд., испр. и доп. Москва: Наука, 2005. 248 с.
- 2. Ловцов Д.А. Моделирование оптико-электронных систем дистанционно пилотируемых аппаратов: монография / Д.А. Ловцов, Д.А. Гаврилов, Москва: Технолоджи-3000, 2019, 164 с.
- 3. Gavrilov D.A. Information theory fundamentals of ground-space monitoring automated special-purpose optical-electronic system / D.A. Gayrilov, D.A. Loytsoy // Information Innovative Technologies: materials of the International scientific-practical conference. Moscow: Association of graduates and employees of AFEA named after prof. Zhukovsky, 2020. P. 155-159.
- 4. Ловцов Д.А. Моделирование оптико-электронных систем в процессах переработки визуальной информации / Д.А. Ловцов, Д.А. Гаврилов // Информатика: проблемы, методология, технологии (IPMT-2020) : материалы ХХ Международной научно-методологический конференции (г. Воронеж, 13-14 февраля 2020 г.). В 5 томах. Т. 2 : сборник научных статей / под редакцией А.А. Зацаринного, Д.Н. Борисова. Воронеж: Научно-исследовательские публикации, 2020. С. 625-633.
- 5. Ловцов Д.А. Информационная технология автоматизированного планирования определения навигационных параметров объектов ракетной техники / Д.А. Ловцов, И.И. Панюков // Автоматика и телемеханика. 1995. № 12. С. 32-46.
- 6. Гаврилов Д.А. Поточная аппаратная реализация алгоритма SURF / Д.А. Гаврилов, А.В. Павлов // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2018. Т. 23. № 5. С. 502-511.
- 7. Гаврилов Д.А. Разметка изображений самолетов на аэрокосмических снимках на основе непрерывных морфологических моделей / Д.А. Гаврилов, Л.М. Местецкий, А.Б. Семенов // Программирование. 2019. № 6. С. 3-12.
- 8. Гаврилов Д.А. Семантическая сегментация и классификация изображений с помощью нейросетей / Д.А. Гаврилов // Информатика, вычислительная техника и управление : сборник научных статей / под редакцией А.В. Князева, Д.А. Ловцова. Москва : ИТМиВТ РАН, 2018. Вып. 9. C. 57-66.
- 9. Гаврилов Д.А. Программно-аппаратный комплекс тестирования алгоритмов детектирования и локализации объектов в видеопоследовательностях / Д.А. Гаврилов // Научное приборостроение. 2019. Т. 29. № 1. С. 149-156.
- 10. Ловцов Д.А. Защищённая биометрическая идентификация в системах контроля доступа. І. Математические модели и алгоритмы / Д.А. Ловцов, К.В. Князев // Информация и космос. 2013.
- 11. Ловцов Д.А. Зашищённая биометрическая идентификация в системах контроля доступа. II. Качество информационно-математического обеспечения / Д.А. Ловцов, К.В. Князев // Информация и космос. 2013. № 2. С. 95-100.
- 12. Гаврилов Д.А. Аппаратная реализация сжатия динамического диапазона цифровых изображений на ПЛИС Xilinx / Д.А. Гаврилов, А.В. Павлов, Д.Н. Щелкунов // Журнал радиоэлектроники. 2018. № 10. С. 16. DOI: 10.30898/1684-1719.2018.10.6.
- 13. Пунь А.Б. Алгоритм адаптивной бинаризации объектов в видеопоследовательности в режиме реального времени / А.Б. Пунь, Д.А. Гаврилов, Н.Н. Щелкунов, А.А. Фортунатов // Успехи

современной радиоэлектроники. 2018. № 9. С. 40-48.

- 14. Ловцов Д.А. Обоснование эффективной автоматизированной оптико-электронной системы специального назначения / Д.А. Ловцов, Д.А. Гаврилов // Телекоммуникации и кибербезопасность: специальные системы и технологии: материалы I Межведомственной научно-практической конференции (г. Серпухов, 18 апреля 2019 г.): сборник научных статей. Серпухов: ИИФ, 2019. С. 122-127.
- 15. Gavrilov D.A. Quality assessment of objects detection and localization in a video stream / D.A. Gavrilov // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение. 2019. № 2 (125). С. 40-55.
- 16. Гаврилов Д.А. Нейросетевой алгоритм автоматического обнаружения и сопровождения объекта интереса в видеосигнале / Д.А. Гаврилов // Шестнадцатая Национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2018 (г. Москва, 24-27 сентября 2018 г.). В 2 томах. Т. 2 : сборник научных статей. Москва : РКП, 2018. С. 188-195.
- 17. Ronneberger O. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation / O. Ronneberger, P. Fischer, T. Brox // Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention MICCAI 2015: 18th International Conference (Munich, Germany, October 5-9, 2015). P. III.: proceedings / eds. by N. Navab, J. Hornegger, W.M. Wells, A.F. Frangi. Springer, Cham, 2015. P. 234-241.
- 18. Redmon J. YOLOv3: An Incremental Improvement / J. Redmon, A. Farhadi. URL: https://arxiv.org/abs/1804.02767.
- 19. Bochkovskiy A. YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection / A. Bochkovskiy, C.Y. Wang, H.M Liao. URL: https://arxiv.org/abs/2004.10934.
- 20. Liu W. SSD: Single Shot MultiBox Detector / W. Liu, D. Anguelov, D. Erhan [et al.] // ECCV. Springer, Cham. 2016. P. 21-37.
- 21. Wang X. Multi-level temporal pyramid network for action detection / X. Wang, C. Gao, S. Zhang, N. Sang. URL: https://arxiv.org/pdf/2008.03270.pdf.
- 22. He K. Mask R-CNN / K. He, G. Gkioxari, P. Dollar, R. Girshick. URL: https://arxiv.org/pdf/1703.06870. pdf.
- 23. Kim G. Few-shot object detection via knowledge transfer / G. Kim, H.G. Jung, S.W. Lee. URL: https://arxiv.org/pdf/2008.12496.pdf.
- 24. Ren S. Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks / S. Ren, K. He, R. Girshick, J. Sun. URL: https://arxiv.org/pdf/1506.01497v3.pdf.
- 25. Mondal A. IIIT-AR-13K: A new dataset for graphical object detection in documents / A. Mondal, P. Lipps, C.V. Jawahar. URL: https://arxiv.org/pdf/2008.02569.pdf.

## THEORETICAL FOUNDATIONS OF EFFECTIVE PROCESSING VISUAL INFORMATION IN THE AUTOMATED OPTICAL-ELECTRONIC SYSTEM OF GROUND-SPACE MONITORING

Dmitriy Gavrilov<sup>1</sup>,<sup>2</sup>, Dmitriy<sup>1</sup> Lovtsov, Elena Tatarinova<sup>2</sup>

Lebedev Institute of Precise Mechanics and Computer Engineering, Russian Academy of Sciences
Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT)
gavrilov.da@mipt.ru; dal-1206@mail.ru; tatarinova.ea@mipt.ru

**Abstract:** the results of research related to the substantiation of the theoretical foundations for constructing effective automated optoelectronic systems for ground-space monitoring (AOES GSM) are presented. Scientific and theoretical provisions for solving a complex problem of effective processing of visual information in AOES GSM are proposed. The analysis of scientific conditions and the formulation of this problem, the functional and logical decomposition of the complex problem of effective processing of visual information in the AOES GSM into a hierarchical set of partial tasks of less complexity, the development of methodological issues of the information theory of AOES GSM, a logical sequence of stages in the development of object-oriented technology of effective AOES GSM, the methodology solving the complex problem of functioning of AOES GSM.

**Key words:** optoelectronic system, monitoring, processing of visual information, detection, localization, classification, efficiency.