

А.А. КОРОТИН, Г.И. КОЗЫРЕВ, А.В. НАЗАРОВ, Е.В. БЛАГОДЫРЕНКО
**ИССЛЕДОВАНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ КОМБИНАТОРНО-
МЕТРИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА РАСПОЗНАВАНИЯ N -
МЕРНЫХ ГРУППОВЫХ ТОЧЕЧНЫХ ОБЪЕКТОВ В
ИЕРАРХИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ ПРИЗНАКОВ**

Коротин А.А., Козырев Г.И., Назаров А.В., Благодыренко Е.В. Исследование достоверности комбинаторно-метрического алгоритма распознавания N -мерных групповых точечных объектов в иерархическом пространстве признаков.

Аннотация. В работе представлены результаты исследований комбинаторно-метрического алгоритма распознавания многомерных групповых точечных объектов (ГТО) в пространстве признаков, имеющих иерархическую организацию. На примере многоуровневых описаний смоделированных и реальных объектов исследован характер изменения показателей достоверности в условиях, когда результаты распознавания, полученные на одном уровне иерархии, используются в качестве исходных данных на следующем. Рассмотрены предпосылки представления распознаваемых объектов или процессов в виде ГТО и источники иерархии. Так, результаты измерений n -мерного процесса в m временных сечениях или в одном сечении, но m независимыми наблюдателями представляются при распознавании n -мерным m -элементным ГТО. В случае распознавания протяженных в пространстве объектов — априорная неопределенность относительно ракурса представления, неполноты состава и координатных шумов элементов обуславливают комбинаторные процедуры количественной оценки меры близости многомерных ГТО, представляющих объект распознавания тому или иному классу. Устойчивость представленного комбинаторно-метрического алгоритма распознавания ГТО достигается возможностью смены стратегии принятия классификационного решения, использующей априорные показатели распознавания на низших уровнях иерархии. В численных экспериментах проводилась классификация геометрии ГТО, представляющего образец, по составу элементов образца или по комплексному априорному показателю достоверности. Для повышения вероятности правильного распознавания предложено использовать перебор результатов распознавания на нижних уровнях иерархии, характеризующихся более низкими априорными показателями достоверности распознавания по первичным признакам. Благодаря использованию процедур поиска комбинаций индексов в окрестности максимума апостериорной вероятности правильного распознавания на нижних уровнях доставляется экстремальное значение критерия качества функционирования системы распознавания на ее верхнем уровне иерархии. Приведены экспериментальные зависимости априорных и апостериорных показателей достоверности при различных условиях проведения измерений и состояний объектов распознавания.

Ключевые слова: многоуровневый групповой точечный объект, распознавание образов, иерархия признаков, достоверность распознавания.

1. Введение. Современные высокотехнологичные системы технического зрения, радиовидения и технической диагностики предъявляют к алгоритмам распознавания требования оперативного принятия решений в неоднородном, высокоразмерном и иерархическом пространстве признаков. Построение иерархической системы признаков, инвариантных к широкому спектру искажений и условий наблюдения можно рассматривать как следствие необходимости достоверного распознавания протяженных в пространстве и/или во времени многоуровневых объектов/процессов, включая и их представления в виде ГТО [1-5]. Существующие

подходы к распознаванию ГТО, представлены в работах Я. А. Фурмана, А. А. Роженцова, Р. Г. Хафизова, в которых изображения плоских, объемных точечных полей и ГТО исследуются с позиции теории сигналов [1, 2, 7]. В работах ученых данной научной школы разработан аппарат дискретных комплексных и кватернионных сигналов, позволяющий применительно к точечным полям и локализованным точечным объектам решать задачи спектрального и корреляционного анализа, согласованной фильтрации, оценки параметров и распознавания. Настоящая работа является продолжением работы [29], и обусловлена необходимостью оценки качества распознавания ГТО на текущем уровне иерархии от степени потери достоверности на нижних уровнях. При этом достоверность распознавания обеспечивается как выбором параметров многоуровневой декомпозиции процедур в классе метрических алгоритмов, так и эвристиками, направленными на преодоление комбинаторных барьеров, возникающих при распознавании ГТО.

2. Многоуровневые групповые точечные представления. В многоуровневых системах распознавания словарь признаков определен на множестве алфавитов классов локальных распознающих устройств, расположенных на нижних уровнях иерархии. На рисунке 1 приведены примеры 2-х и 3-х мерных ГТО, для представления каждого элемента которых используется процедура поиска-обнаружения и распознавания. Так, распознаванию пространственно-распределенных многоэлементных объектов радио- или оптическими средствами предшествует процедура поиска, обнаружения и оценивания характеристик малоразмерных и точечных целей (рисунок 1а), составляющих сцену или ордер классифицируемого объекта.

Классификация технического состояния сложных систем может основываться на множестве однотипных точечных измерений наблюдаемых параметров на заданных интервалах наблюдения или совокупности терминальных точек, описывающих состояния системы в ее фазовом пространстве [6] (рисунок 1б).

Системы технического зрения, осуществляют пространственное сканирование на предмет обнаружения особых точек (элементов) или дескрипторов, используемых в различных детекторах изображений (рисунок 1с), таких как детекторы Моравеца, Харриса и Стефана, MSER (Maximally Stable Extremal Regions), SIFT (Scale Invariant Feature Transform), SURF (Speeded Up Robust Features), Хафа, FAST (Features from Accelerated Test) и других [7-13].

При разработке подсистем информационного обеспечения систем технического зрения перспективных летательных аппаратов требуется решать не общую проблему автоматического понимания изображения произвольной сцены, а гораздо более определенную и узкую задачу проблемно-

ориентированной интерпретации изображения объекта [15, 16, 26]. Часто задача сводится к обнаружению и идентификации на изображении некоторого набора особых точек, наличие которых может повлиять на формирование решения, как например, при поиске на малоконтрастных изображениях летательных аппаратов [15] (рисунок 1*d*).

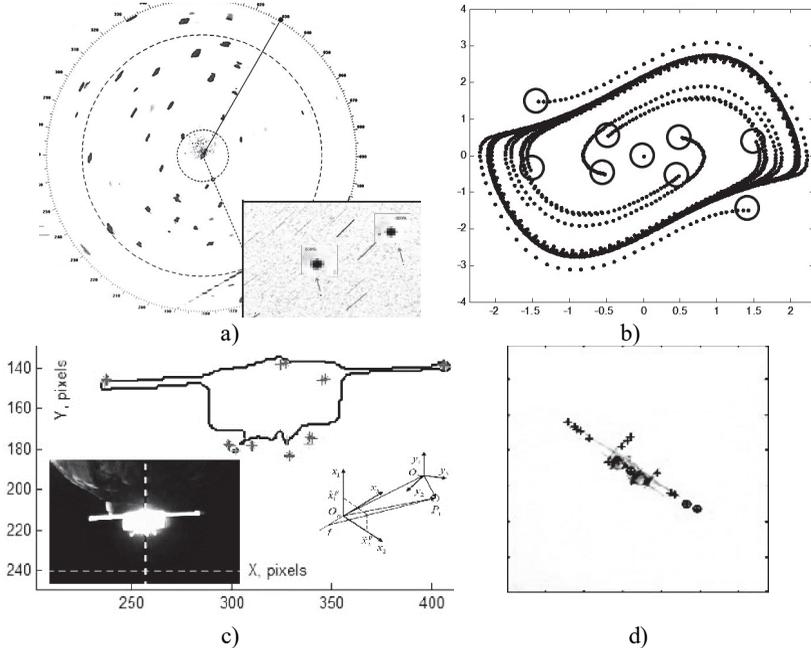


Рис. 1. Многоуровневые групповые точечные представления:

- a) идентификация точечных целей в порядке на экране радиолокатора и при сопровождении оптико-электронным средством;
- b) ассоциация особых точек динамической системы;
- c) детектирование контрольных точек при определении параметров относительного движения стыковочных модулей;
- d) Результат поиска особых точек методом SIFT

Примером многоуровневого представления ГТО являются порядки построений войсковых формирований на местности, в случае, когда две оси координат — относительные координаты сосредоточенных целей (элементов войсковых формирований), третья координата — тип цели (рисунок 2), которую необходимо обнаружить и идентифицировать по признакам более низкого уровня иерархии [17].

Если в какой-либо информационной системе реализована возможность одновременных измерений характеристик одного и того же процесса, характеризуемого n параметрами в m различных сечениях (различных ракурсах), то результаты такого наблюдения также представимы в

виде n -мерного m -точечного ГТО. Например, при распознавании космических объектов используют различные признаки, видовые из оптических детальных изображений; интегральные и многоспектральные фотометрические (кривые блеска) и поляризационные [18-23, 30-32].

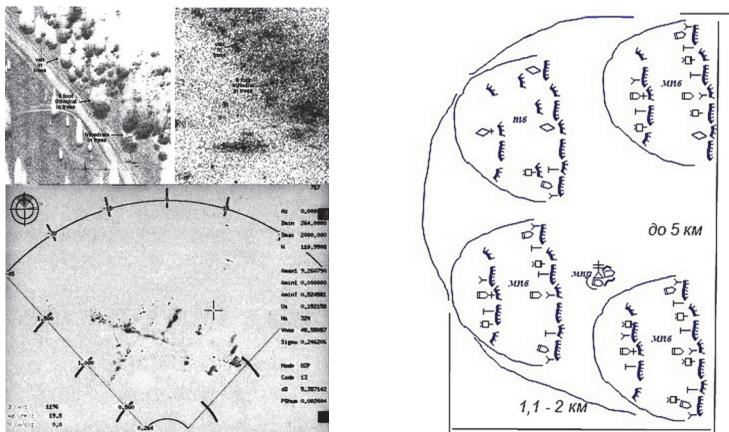


Рис. 2. Порядки построения войсковых формирований в обороне в виде трехмерных ГТО как результат радиолокационного опознавания

Таковыми признаками могут являться значения одноименных параметров фотометрических реализаций, полученных при многопунктных синхронных базисных наблюдениях (на рисунке 3 КА YAOGAN 20A, шкала блеска в звездных величинах, приведенных к дальности 1000 км).

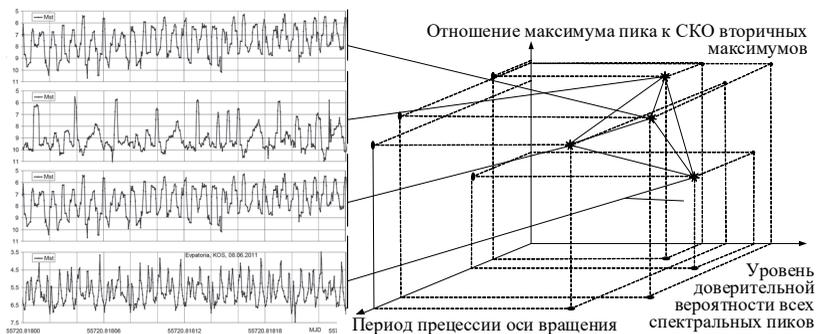


Рис. 3. Распознаваемый образец включает четыре синхронных фрагмента кривой блеска преобразованных в 4-х точный ГТО в пространстве 3-х характеристик (пример)

Принимая гипотезу об информативности и постоянстве зависимости относительных изменений различных кривых блеска от функционально-конструктивных характеристик космических объектов в различных ракурсах (спектральных диапазонах) с учетом фазовых углов типа стабилизации и типа отражающей поверхности, каждая из m кривых представляется в виде точки в пространстве ее n характеристик и последующего распознавания типовых компоновок конструкций (или технического состояния) космических объектов посредством идентификации ГТО.

Кроме точечного представления интегральных параметров временных реализаций возможно использование многоточечного представления однопозиционных многоспектральных/спектрофотометрических наблюдений и получение спектрально зависимых характеристик оптических сигналов в n -цветных диаграммах в различных фотометрических системах ($U-B$) и ($B-V$), ..., и другие (рисунок 4.а).

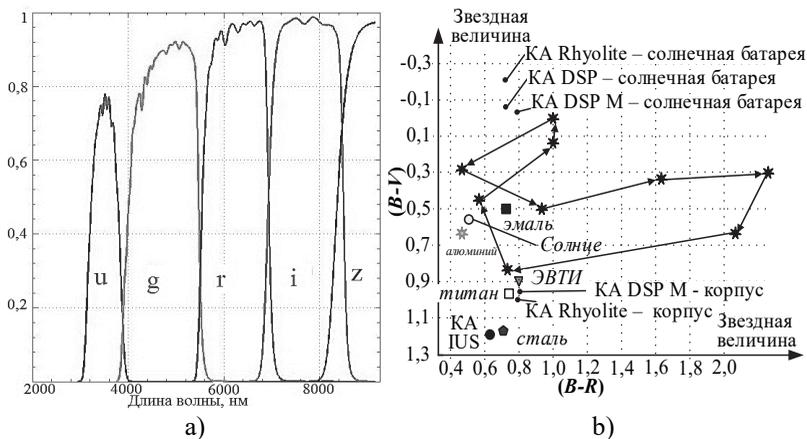


Рис. 4. а) Пример широкополосной пятицветной фотометрической системы UGRIZ для каталога SDSS – как пространственного базиса ГТО; б) ГТО (вершины графа) образован измерениями через равные промежутки времени показателей цвета КА в двумерном фазовом пространстве фотометрической системы UBVR

Например, анализ двухцветной диаграммы ($B-V$) и ($V-R$) для геостационарных объектов (рисунок 4 б) показывает, что различные типы объектов группируются на ней по показателям цвета [18]. При этом в фотометрических системах, содержащих большее число спектральных полос, чем BVR или UBV , различия между показателями цвета позволяют более увереннее различать КА по компоновкам конструкции и покрытиям. В соответствии с теоремой Ковера пространство кривых блеска может быть

отображено в пространство более высокой размерности, где множества состояний КА, которые отображают кривые, станут линейно-разделимым. В этом случае метрический подход к классификации позволяет более достоверно решать задачи распознавания.

Использование n поддиапазонов в полосе пропускания оптико-электронной системы обуславливает n -мерность вложения ГТО, а количество и взаимное расположение точек ГТО, зафиксированных через равные промежутки времени, определяют мощность признаков для распознавания наблюдаемой ситуации. Информативность такого представления для распознавания классов состояний наблюдаемых объектов зависит от степени устойчивости статистической взаимосвязи между значениями m измерений n параметров.

Таким образом, точечные изображения или пространственные ГТО в форме множеств точек, задаваемых функцией $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, которые называются генеральными множествами точек объекта $F = \{f(X)\}_0^{m-1}$ или в общем случае зашумленными точечными полями мощности m в n -мерном пространстве, являются распространенной формой представления промежуточных результатов для решения задач распознавания [1, 2, 24, 29].

В предельных случаях иерархически организованный образец ГТО, предъявляемый к распознаванию одновременно характеризуется:

- пространственными (относительными) геометрическими признаками, выявленными в результате поиска (сканирования) во времени и/или пространстве, то есть свойствами изображения;
- упорядоченным набором абсолютных параметров в классическом представлении системы распознавания, то есть некоординатными свойствами целостного классифицируемого объекта.

Первый и второй тип признаков образца ГТО несут различную смысловую нагрузку, потенциальную информативность и алгоритмическую сложность использования первого типа признаков в силу следующих условий задачи распознавания:

- предъявляемый образец в общем случае есть неизвестный фрагмент шаблона, наблюдаемый в условиях координатных шумов;
- образцу присущи любые виды искажений, включая неаффинные искажения формы ГТО в n -мерном пространстве его признаков;
- наблюдаемый образец обладает неизвестной ориентацией в пространстве абсолютных координат ГТО или наблюдаем с неизвестного ракурса в проекции на картинную плоскость наблюдателя;

– наличие ненулевой вероятности наличия ложных точек и/или отсутствия истинных точек — атрибутов распознаваемого класса ГТО (в результате ошибок сканирования в пространстве поиска);

– наличие ненулевой вероятности попадания в поле зрения наблюдателя фрагментов нескольких объектов, включая объекты принадлежащих различным классам.

3. Источники иерархии. Если классифицируемый образец есть протяженный и неделимый в N -мерном пространстве поиска неделимый объект, то при его перемещениях, поворотах, изменениях масштабов между координатами особых точек на его поверхности сохраняются неизменными геометрические соотношения вида расстояний, углов и другие инварианты. Соответственно, при перемещениях, поворотах, изменениях масштабов информативными будут указанные локальные геометрические характеристики класса в системе координат объекта, а не абсолютные значения координат особых точек на его поверхности. Информативный словарь признаков при этом задается в пространстве локальных геометрических характеристик объекта.

Если классифицируемым образцом выступает протяженный во времени N -мерный процесс, то между синхронными временными отсчетами его N характеристик существуют причинно-следственные или статистические взаимосвязи, неизменные при изменениях масштаба (области определения, девиации), частоты, амплитуды (при гармоническом представлении). В свою очередь, необходимость поиска, представления и распознавания протяженного во времени и/или пространстве объекта/процесса (обладающего формой с потенциально искаженными геометрическими характеристиками) обуславливает иерархическую декомпозицию системы его признаков и многоуровневость алгоритмов распознавания. Так, в практических задачах при оценке класса или ордера целей оцениваются характеристики малоразмерных и точечных целей, детекторы событий распознают особые точки сцены или фазовых портретов, при этом элементы метрически сличаемых ГТО не упорядочены и номера признаков могут не совпадать.

Придерживаясь классификации [1] следует различать ГТО и точечные поля на поверхности объектов (рисунок 5), последние не подразумевают иерархии признаков при идентификации координат точек [17].

Для объектов первого вида мощность m задающего генерального множества F не превышает $m = 20 \div 30$, для объектов второго вида значение m может достигать 10^5 и более [1, 19].

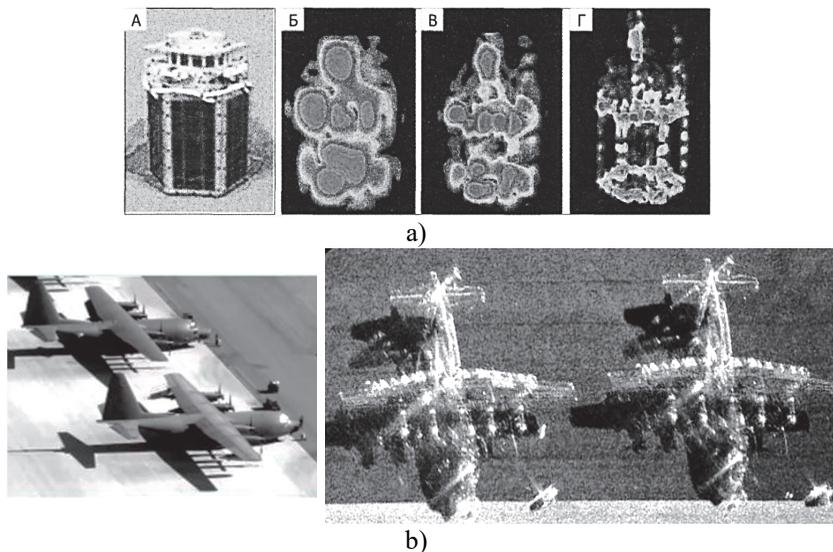


Рис. 5. Примеры представления объектов распознавания точечными полями на трехмерной поверхности: *a)* характерные точки космического аппарата в зависимости от разрешающей способности РЛС «Millimeter Wave Radar» и ширины полосы сигнала: А — внешний вид КА; Б, В и Г — радиолокационные изображения КА при ширине полосы сигнала 1,2 и 4 ГГц и разрешающей способности по дальности 30, 15 и 8 см соответственно [25], *b)* Авиационный PCA: Ка диапазон, С-130 с пространственным разрешением 10 см

Обобщенная последовательность операций в иерархии поэтапного распознавания характеристик, протяженных во времени (и/или пространстве) процессов (и/или объектов) проиллюстрирована на рисунке 6.

При распознавании временных процессов подразумевается, что один и тот же процесс, согласно классическому уравнению наблюдений, отображается m кривыми, и его представление в виде ГТО осуществляется по каждой из m кривых в пространстве ее n однотипных характеристик.

В целом, в настоящей работе иерархия алгоритма распознавания и многоуровневость представления самого объекта распознавания обусловлены тем, что результаты распознавания по координатным (геометрии ГТО) и некоординатным признакам формируют значения признаков ГТО более высокого уровня иерархии, как и показано на рисунке 7.



Рис. 6. Циклическая последовательность многоуровневых процессов распознавания на основе координатных и некоординатных признаков объектов и/или процессов

4. Алгоритм распознавания. Включает три независимых процедуры, результаты, которых объединяются на уровне решений по методу гистограмм:

- 1) Распознавание многоуровневого образца по составу целей образца.
- 2) Распознавание по взаиморасположению целей, то есть по ГТО образца.
- 3) Распознавание по независимому кортежу некоординатных признаков.

Первая и третья процедуры тривиальны и предназначены для компенсации потери достоверности алгоритма при критических значениях искажений образца, поэтому далее подробно рассмотрим вторую процедуру распознавания. Пусть на k -м уровне иерархии каждый l -й элемент ρ_l

алфавита классов $\{\rho_l\}$, $l = \overline{1, L_k}$ распознаваемых многоуровневых объектов представлен шаблоном ГТО, содержащим m_l , $l = \overline{1, L_k}$ точек $\{y'_1, y'_2, \dots, y'_i, \dots, y'_{m_l}\}$ в n_k -мерном пространстве признаков с введенной метрикой, причем одна j -я, $j = \overline{1, n_k}$ или q_k , ($q_k \leq n_k$) осей системы координат ГТО представлены числовой шкалой или шкалой линейного порядка. Это необходимо для того, чтобы результаты распознавания на нижнем $(k-1)$ -м уровне иерархии отображались значением — отметкой на оси системы координат ГТО на k -м уровне. Множество классов $\{\rho_l\}$, $l = \overline{1, L_k}$ конечно и образует полную группу из Θ (разбиение пространства образов Θ), т.е. $\bigcup_{l=1}^{L_k} \rho_l = \Theta$, $\rho_i \cap \rho_j = \emptyset$ для всех $i \neq j$. Дополнительно каждый элемент алфавита классов $\{\rho_l\}$, $l = \overline{1, L_k}$ распознаваемых объектов на k -м уровне описывается вектором S_l , $l = \overline{1, L_k}$. Компоненты данного вектора определены на множестве $\{s\}$ словаря некоординатных признаков, так что образуют таблицу типа «объект-признак», которую можно представить матрицей $[S_{lv}]$:

$$[S_{lv}] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{1v} & S_{1V} \\ S_{21} & S_{22} & S_{2v} & S_{2V} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{l1} & S_{l2} & S_{lv} & S_{lV} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{L_k 1} & S_{L_k 2} & S_{L_k v} & S_{L_k V} \end{bmatrix}, \quad l = \overline{1, L_k}, \quad v = \overline{1, V}, \quad (1)$$

где L_k — число классов на k -м уровне иерархии, V — количество некоординатных признаков.

Описывая уровни «вниз», предположим, что значение по одной j -й, $j = \overline{1, n}$ или q_k , ($q_k \leq n_k$) осям координат каждой i -й точки y'_i , $i = \overline{1, m_l}$, $l = \overline{1, L_k}$ l -го ГТО — есть результат распознавания.

Подобно описанию на $(k-1)$ -м уровне иерархии, здесь результат распознавания определен на одном (в общем случае n_{k-1}) множестве $\{\zeta_h\}$, $h = \overline{1, L_{k-1}}$ алфавита классов нижнего $(k-1)$ -го уровня иерархии, где L_{k-1} — число классов, характеризующих j -ю координату i -й точки l -го ГТО (на рисунке 7 изображены отношения систем абстрактных координат пространств характеристик многоуровневого распознаваемого ГТО на k -м и $(k-1)$ -м уровнях иерархии).

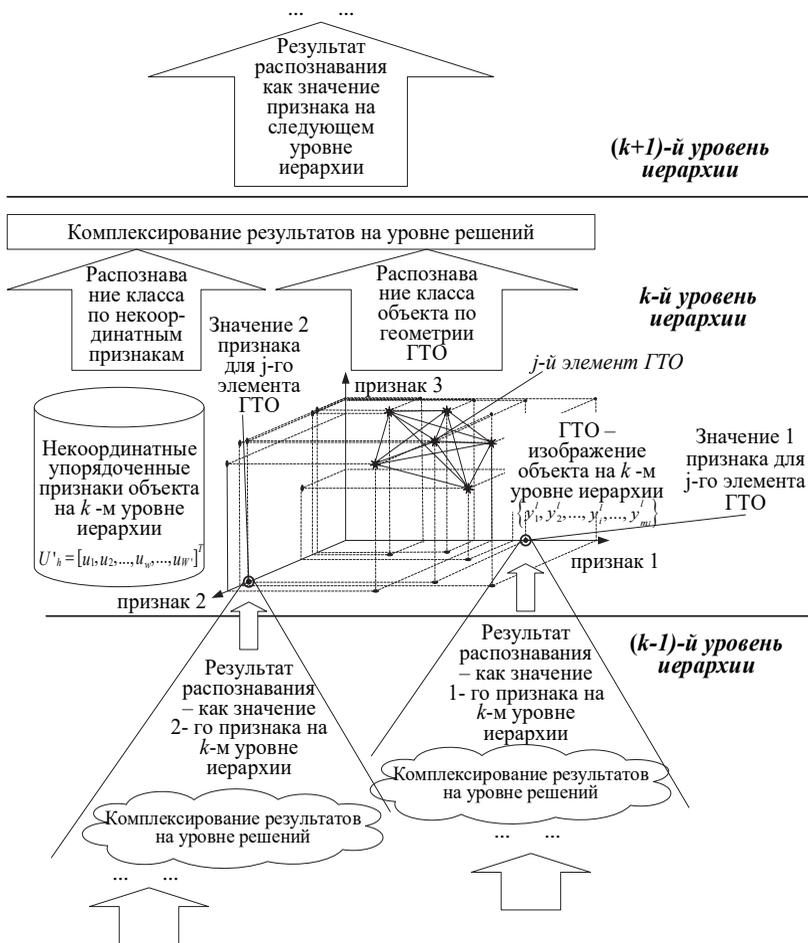


Рис. 7. Результаты распознавания по координатным (геометрии ГТО) и некоординатным признакам формируют значения признаков объекта более высокого уровня иерархии

В результате каждый h -й элемент алфавита классов $\{\zeta_h\}$, $h = \overline{1, L_{k-1}}$, характеризующий j -ю координату i -й точки l -го ГТО, может быть одновременно описан:

– h -м шаблоном ГТО $\left\{ y_1^h, y_2^h, \dots, y_i^h, \dots, y_{m_h}^h \right\}$ в n_{k-1} -мерном евкли-

довом пространстве признаков, содержащим m_h , $h = \overline{1, L_{k-1}}$ точек.

– вектором $U_h, h = \overline{1, L_{k-1}}$, компоненты которого определены на множестве словаря $\{u\}$ некоординатных признаков, так что сформирована таблица вида «объект-признак», которую можно представить матрицей $[u_{hw}]$:

$$[u_{hw}] = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{1w} & u_{1W} \\ u_{21} & u_{22} & u_{2w} & u_{2W} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{h1} & u_{h2} & u_{hw} & u_{hW} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{L_{k-1}1} & u_{L_{k-1}2} & u_{L_{k-1}w} & u_{L_{k-1}W} \end{bmatrix}, \quad h = \overline{1, L_{k-1}}, \quad w = \overline{1, W}, \quad (2)$$

где L_{k-1} — число классов на $(k-1)$ -м уровне иерархии, W — количество некоординатных признаков на $(k-1)$ -м уровне иерархии.

Приведенное описание представлено для двух соседних уровней иерархии. Предполагается, что структура такого описания неизменна при переходе между уровнями при $k \rightarrow \pm\infty$.

Пусть, в результате наблюдений, поиска или сканирования во времени и/или пространстве на вход алгоритма поступает описание образца в пространстве признаков $(k-1)$ -го уровня иерархии, включающее:

– q_k неупорядоченных подмножеств точек, образующих ГТО $\{y_1^h, y_2^h, \dots, y_i^h, \dots, y_{m'h}^h\}$ в n_{k-1} -мерном евклидовом пространстве признаков, где m'_h — число точек образца, в общем случае отличное от количества точек любого из шаблонов $m_h, h = \overline{1, L_{k-1}}$;

– q_k векторов $U'_h, h = \overline{1, L_{k-1}}$ абсолютных значений некоординатных признаков в классическом представлении системы распознавания $U'_h = [u_1, u_2, \dots, u_w, \dots, u_W]^T$.

То есть на вход алгоритма распознавания поступают координатные и некоординатные описания образца на $(k-1)$ -м уровне его иерархии, представленные q_k ГТО $\{y_1^h, y_2^h, \dots, y_i^h, \dots, y_{m'h}^h\}$ и q_k векторов абсолютных значений некоординатных признаков $U'_h = [u_1, u_2, \dots, u_w, \dots, u_W]^T$. Примем, что предъявляемый образец является неизвестным фрагментом l -го элемента ρ_l алфавита классов $\{\rho_l\}, l = \overline{1, L_k}$ не содержит дополнительных элементов (ложных точек) и образцу присущи все виды искажений, описанные в пункте 2.

Требуется на основе описаний ζ_h элементов алфавита классов $\{\zeta_h\}$, $h = \overline{1, L_{k-1}}$ и описаний ρ_l элементов алфавита классов $\{\rho_l\}$, $l = \overline{1, L_k}$ распознаваемых многоуровневых объектов определить класс принадлежности образца.

Алгоритм классификации образца, представляемого многоуровневым ГТО, предполагает последовательное распознавание координат элементов ГТО по признакам нижнего, $(k-1)$ -го уровня иерархии, затем по координатным (геометрическим характеристикам ГТО) признакам и упорядоченным некоординатным признакам распознается класс принадлежности образца на k -м уровне своей иерархии.

В агрегированном представлении алгоритм декомпозирован на 10 этапов:

1. По каждому из q_k объектов $\{y_1^h, y_2^h, \dots, y_i^h, \dots, y_{m^h}^h\}$, которые представлены ГТО $(k-1)$ -го уровня иерархии, распознается значение одной или q_k ($q_k \leq n_k$) координат каждого i -го элемента (точки) $y_i, i = \overline{1, m}$, представляющего распознаваемый объект (ГТО) на k -м уровне иерархии:

$$C_{k-1} = \underset{h}{\operatorname{argmin}}(E_{k-1}^h), \quad h = \overline{1, L_{k-1}}, \quad (3)$$

где L_{k-1} — число классов на $(k-1)$ -м уровне иерархии, E_{k-1}^h — априорный показатель достоверности метрического распознавания на $(k-1)$ -м уровне иерархии, минимизируемый комбинаторными процедурами на 8 этапе алгоритма по множеству L_{k-1} классов. Показатель E_{k-1}^h для i -й характеристики (оси координат) ГТО на k -м уровне вычисляется как:

$$(E_{k-1}^h)_i = \frac{1/d_i}{\sum_{j=1}^{m_h} 1/d_j}, \quad d(y_l^h, y_p^h) = \sum_{z=1}^J w_z |y_{lz}^h - y_{pz}^h|, \quad i = \overline{1, n_k}, \quad j = \overline{1, m_h}, \quad (4)$$

где w_z — весовой коэффициент z -го признака точек y_l^h и y_p^h ; $d(*)$ — расстояние между точками y_l^h и y_p^h ; J — размерность системы координат ГТО; m_h — количество точек распознаваемого ГТО.

Показатель E_{k-1}^h — пропорционален вероятности правильного распознавания в метрике Хэмминга, и по всем элементам алфавита

классов образует полную группу событий $\sum_{h=1}^{L_{k-1}} E_{k-1}^h = 1$. Физический смысл показателя — степень надежности метрического распознавания всех объектов на $(k-1)$ -м уровне иерархии — как отношение расстояния d от образца к i -му шаблону по сравнению с другими расстояниями.

2. Линейная нормировка компонент вектора координат каждого i -го элемента (точки) y_i , $i = \overline{1, m}$ ГТО путем приведения распознанных значений к единичному масштабу $[0, 1]$:

$$y_i^{norm} = \frac{y_i - y_{i,\min}}{y_{i,\max} - y_{i,\min}}(b - a) + a, \quad (5)$$

в единичный отрезок: $y_i^{norm} \in [0, 1]$, где a и b — границы нормированного диапазона (в нашем случае $a=0$, $b=1$), а $y_{i,\min}$ и $y_{i,\max}$ — минимальные и максимальные значения по шкале q_k , ($q_k \leq n_k$) оси координат, представляющих ГТО на k -м уровне иерархии.

3. Выполняя q_k процедур распознавания и нормировки (п.п.1,2) выстраиваются все точки ГТО $\left\{ y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_m \right\}$, представляющий образец на k -м уровне иерархии в n_k -мерном пространстве признаков.

Одновременно с координатами точек ГТО формируется вектор Ξ , элементы которого имеют физический смысл меры достоверности распознавания каждой из m точек по каждой из n_k осей системы координат признаков ГТО:

$$\Xi = \left\{ \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_i, \dots, \xi_m \right\}, \quad \xi_i = \frac{1}{n_k} \sum_{j=1}^{n_k} E_j^h, \quad i = 1, m, \quad (6)$$

то есть достоверность распознавания i -й точки есть среднеарифметическое вероятности правильного определения ее n_k координат. Далее, вектор вычисленных априорных показателей достоверности распознавания классов на $(k-1)$ -м уровне иерархии Ξ правомерно рассматривать как вектор весов при вычислении метрического сходства ГТО с шаблонами на k -м уровне иерархии.

4. В рамках зонно-комбинаторного подхода к идентификации точечных изображений [24] фиксируется тип интегрального геометрического инварианта n -угольника, построенного на n точках образца

ГТО. Это необходимо для поиска совпадения неориентированного образца ГТО с шаблонами на множестве алфавита классов методом перебора инварианта, идентичного этому n - угольнику по геометрии. В численных экспериментах по распознаванию использовались такие инварианты, как матрица попарных расстояний между точками образца ГТО и матрица углов на плоскости, проведенной через три точки образца ГТО. Оба интегральных описания инвариантны к поворотам, изменениям масштаба ГТО. Выбор матрицы расстояний или углов не меняет методологии алгоритма, но влияет на достоверность распознавания при фиксированной точности измерений углов, расстояний и на вычислительные затраты алгоритма. Так, число признаков при использовании матрицы попарных расстояний в пространстве ГТО произвольной размерности:

$$n = \frac{m!}{2!(m-2)!}, \quad (7)$$

а при использовании в качестве признаков углов и расстояний от произвольной заданной начальной точки для образца ГТО на плоскости ($n_k = 2$):

$$n = 2m - 3, \quad (8)$$

в пространстве ($n_k = 3$):

$$n = (m-1) + \frac{(m-1)!}{3!((m-1)-3)!}, \quad (9)$$

где m — число точек образца ГТО (рисунок 8).

Система геометрических инвариантов при определении пространства признаков должна обеспечивать однозначные условия поиска минимального расстояния между шаблоном и образцом.

Для произвольных замкнутых ограниченных множеств \mathcal{G} справедливо изопараметрическое неравенство вида [24]:

$$F(\mathcal{G}) \geq n_k \sqrt[n_k]{W_{n_k}} V(\mathcal{G})^{(nk-1)/nk}, \quad (10)$$

где $F(\mathcal{G})$ — поверхность множества \mathcal{G} ; $V(\mathcal{G})$ — объем множества \mathcal{G} ; W_{n_k} — объем n_k -мерного единичного шара.

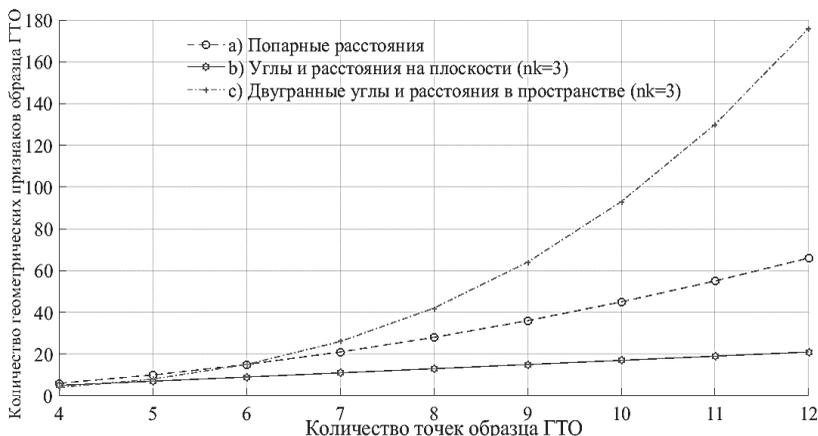


Рис. 8. Зависимости количества геометрических признаков, в совокупности однозначно идентифицирующих образец от числа m точек ГТО при использовании в качестве геометрического инварианта попарные расстояния между m точками ГТО, расстояния от заданной точки до оставшихся и углы с вершиной в заданной точке на плоскости, расстояния от заданной точки до оставшихся и двугранные углы в пространстве образованных числом сочетаний из m по 3 точки

Для шара это неравенство обращается в равенство - шар имеет минимальную поверхность из всех тел равного объема. Так как минимум среднего расстояния между точками множества при его линейных преобразованиях с сохранением объема достигается для минимальной поверхности множества, то, приняв в качестве разделяющих классы поверхностей гиперсферы, целесообразно решать задачу распознавания путем вычислений матрицы $[D_{ij}]$ попарных расстояний между точками $\{y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_m\}$ образца ГТО:

$$[D_{ij}] = \begin{bmatrix} 0 & D(y_2/y_1) & D(y_j/y_1) & D(y_m/y_1) \\ D(y_1/y_2) & 0 & D(y_j/y_2) & D(y_m/y_2) \\ \hline D(y_1/y_i) & D(y_2/y_i) & 0 & D(y_m/y_i) \\ \hline D(y_1/y_m) & D(y_2/y_m) & D(y_j/y_m) & 0 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

где расстояние между точками i, j :

$$D(y_j / y_i) = \left(\frac{1}{\xi_i} \sum_{r=1}^{n_k} |y_{ir} - y_{jr}|^q \right)^{\frac{1}{q}}, \quad (12)$$

ξ_i — достоверность распознавания i -й точки образца, n_k — размерность пространства признаков ГТО на k -м уровне иерархии, в алгоритме варьировалось значение q , от 2 (евклидовое расстояние) до 6, когда расстояние приближается к наибольшему отклонению по какой-либо из координат.

5. На основе $[D_{ij}]$ формируется вектор $[X]$ элементов треугольной полуматрицы попарных расстояний образца ГТО [29]:

$$X = [D(y_2 / y_1), \dots, D(y_j / y_1), \dots, D(y_m / y_1), D(y_j / y_2), \dots, D(y_m / y_2), \dots, D(y_m / y_1), \dots, D(y_m / y_{m-1})] = [x_1, \dots, x_n], \quad (13)$$

где n — число попарных расстояний между точками образца ГТО, $n = \frac{m!}{2!(m-2)!}$, m — число точек образца ГТО.

Вектор $[X]$ является вектором вторичных признаков образца ГТО, по которому вычисляются метрические показатели сходства с каждым из L_k векторов $X_l, l = \overline{1, L_k}$ шаблонов алфавита классов. Так как число точек ГТО всегда меньше матриц интегрального геометрического инварианта n -угольника, построенного на n точках ГТО (рисунок 8), то комбинаторные процедуры (перестановки и/или сочетания) проводятся над индексами точек ГТО шаблонов алфавита классов, а операции вычисления показателей сходства — над векторами, образованными из полуматриц попарных расстояний между точками образца ГТО и соразмерных (по числу точек) фрагментов шаблонов алфавитов классов $[X]$ (13).

6. Создание двумерного массива индексов для формирования r фрагментов каждого из L_k векторов попарных расстояний $X_l, l = \overline{1, L_k}$ шаблонов алфавита классов, вычисленных по количеству точек — равному количеству точек образца ГТО. Каждый столбец массива индексов содержит $P_{ml} = m_l!$ или $C_{ml}^m = \frac{m_l!}{((m_1 - m)!m!)}$ строк образованных, соответственно, в результате перестановок компонент векторов $X_l, l = \overline{1, L_k}$ или их сочетаний по числу m компонент вектора попарных расстояний между точками образца ГТО. Выбор использования перестановок или сочетаний из m_l по m определяется количеством точек распознаваемого образца ГТО (например, при $m_l \geq 15$ число перестановок

$C_{mj}^m \geq 10^{13}$). Каждая строка массива индексов образована вектором парных расстояний $[X_l^r]$ для одной r -й реализации сочетания (перестановки) порядка перечисления точек l -го шаблона $X_l, l = \overline{1, L_k}$ шаблонов алфавита классов.

7. В зависимости от требований по быстродействию и достоверности распознавания вычислить

$$Z = \sum_{l=1}^{L_k} n_l! / ((n_l - n)!n!) \text{ или } Z = \sum_{l=1}^{L_k} n_l, l = \overline{1, L_k}. \quad (14)$$

показателей сходства E_k^l , где L_k — количество классов (шаблонов), к которому может быть отнесен образец, n_l — число попарных расстояний между точками l -го шаблона ГТО на k -м уровне иерархии, то есть длина вектора $X_l, l = \overline{1, L_k}$.

8. Принятие решения C об индексе искомого класса принадлежности, соответствующего искаженному образцу по критерию минимума показателя $(E_k^l)^r$ по множеству шаблонов L_k и множеству сочетаний (перестановок) точек каждого шаблона R :

$$\begin{aligned} (E_k^l)^r &= \sqrt{\left((x^r)_{k1} - (x^r)_{k1}^l\right)^2 + \left((x^r)_{k2} - (x^r)_{k2}^l\right)^2 + \dots +} \\ &+ \left((x^r)_{kn} - (x^r)_{kn}^l\right)^2 = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left((x^r)_{ki} - (x^r)_{ki}^l\right)^2}, \end{aligned} \quad (15)$$

где R — количество комбинаций точек l -го шаблона ГТО соразмерного распознаваемому образцу, L_k — количество классов (шаблонов) на k -м уровне представления объекта.

9. С целью повышения вероятности правильного распознавания образца путем использования информации, которая содержится в комбинациях вычисленных на этапе 1 показателей E_{k-1}^h алгоритма, осуществляется:

– ранжирование вычисленных индексов C по убыванию показателей $(E_{k-1}^h)_i, i = \overline{1, m'_h}, h = \overline{1, L_{k-1}}$, вычисленных в результате распознавания координат точек y_i ГТО $\{y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_m\}$ $C_{k-1} = \underset{h}{\operatorname{argmin}}(E_{k-1}^h), h = \overline{1, L_{k-1}}$, где L_{k-1} — число классов на $(k-1)$ -м уровне иерархии;

– начиная с результатов, следующих после $\operatorname{argmin}_h(E_{k-1}^h)$, $h = \overline{1, L_{k-1}}$, по убыванию, выполнение шагов 1-8 с принятием решения об индексе искомого класса принадлежности образца по всем $h = \overline{1, L_{k-1}}$.

10. Поскольку пространственные объекты могут быть достаточно сложными, а ракурс их наблюдения — случайным и «малоинформативным», то для надежности выделения признаков на реализациях и распознавания приходится использовать несколько реализаций наблюдений распознаваемых объектов или процессов. Следовательно, на завершающем этапе алгоритма осуществляется комплексирование по методу гистограмм результатов выполнения трех процедур распознавания и всех G реализаций наблюдений. В результате многократного (или многокурсного) распознавания на уровне решений совместно с результатами многоуровневой процедуры распознавания по q_k векторам $U'_h, h = \overline{1, L_{k-1}}$ упорядоченных значений некоординатных признаков $U'_h = [u_1, u_2, \dots, u_n, \dots, u_m]^T$ в классическом представлении системы распознавания вычисляется показатель достоверности распознавания вида:

$$\mu_G = G \frac{(E_k^l)^2}{\sigma_E^2} = G \mu_1, \quad (16)$$

где G — количество реализаций 1-9 этапов алгоритма распознавания (или количество ракурсов, с которых одновременно и независимо друг от друга регистрируется и распознается образец при выполнении 1-9 этапов), $\mu_1 = \frac{(E_k^l)^2}{\sigma_E^2}$ — отношение показателя достоверности распознавания по классу, принятому в качестве распознанного к среднеквадратическому отклонению σ_E^2 показателей достоверности, вычисленным по всем остальным элементам алфавита классов $\{p_l\}, l = \overline{1, L_k}$ при однократном измерении.

Некоррелированные на множестве различных классов значения показателя достоверности описываются в виде стационарного случайного процесса, у которого математическое ожидание $M[E_k^l] = 0$, дисперсия $D[E_k^l] = \sigma_E^2$, (σ_E^2 — среднеквадратическое отклонение показателей достоверности на множестве алфавита классов $\{p_l\}, l = \overline{1, L_k}$).

Вид показателя достоверности многократного распознавания обусловлен предположением о том, что координатные шумы элементов ГТО и случайные искажения некоординатных признаков при многократном распознавании формируют случайные E_k^l , представимы различными значениями и полярностью, следовательно, складываются алгебраически. Показатели достоверности по классу E_k^l , принятому в качестве истинного — вещественны и однополярны, следовательно, складываются арифметически. Таким образом, процесс накопления значений «ложных» показателей достоверности происходит медленнее, чем «истинных», что увеличивает достоверность распознавания за G реализаций 1-9 этапов алгоритма как $\mu_G = G \frac{(E_k^l)^2}{\sigma_E^2} = G\mu_1$.

4. Экспериментальное исследование алгоритма. Для исследования описанных процедур алгоритма использована следующая последовательность программных операций, в комплексе реализующая полунатурное моделирование процесса распознавания (рисунок 9).

При экспериментальном исследовании характеристик достоверности комбинаторно-метрического алгоритма распознавания использовались данные двух типов. Данные первого типа — двухуровневое описание войсковых формирований различных стран мира, где алфавит классов $\{\rho_l^i\}$, $l=1, L_k$ содержал $L_k = 50$ шаблонов. Типовое описание каждого порядка принятого в качестве шаблона (класса) на k -м уровне иерархии представлено двумя типами признаков: пространственными ГТО $\{y_1^l, y_2^l, \dots, y_i^l, \dots, y_m^l\}$, $m_l, l=1, L_k$ — от 2 до 15 целей (точек) в каждом ГТО и упорядоченным вектором 14 некоординатных признаков $U^l_h = [u_1, u_2, \dots, u_w, \dots, u_w]^T$. На $(k-1)$ -м уровне иерархии каждый элемент (цель) ГТО описывается вектором (словарем признаков) из 54 бинарных признаков. Данные второго типа представляют собой результаты вычислений статистических характеристик кривых блеска КА по базе данных Многоканального мониторингового телескопа, на основе которых распознаются событийные признаки при пролете КА [27]. Количество спектральных кривых соответствует числу точек (целей) ГТО, а количество рассчитанных с различной погрешностью статистических характеристик — числу осей системы координат ГТО. Шаблоны в алфавите классов сформированы на основе приведенных кривых блеска групп КА сходной компоновки конструктива, покрытий с учетом состояния фазового угла и типа стабилизации КА. Априорными показателями достоверности распознавания на $(k-1)$ -м уровне иерархии параметров целей (точек) ГТО являются нормированные оценки ошибок вычисленных статистических показателей кривых блеска.

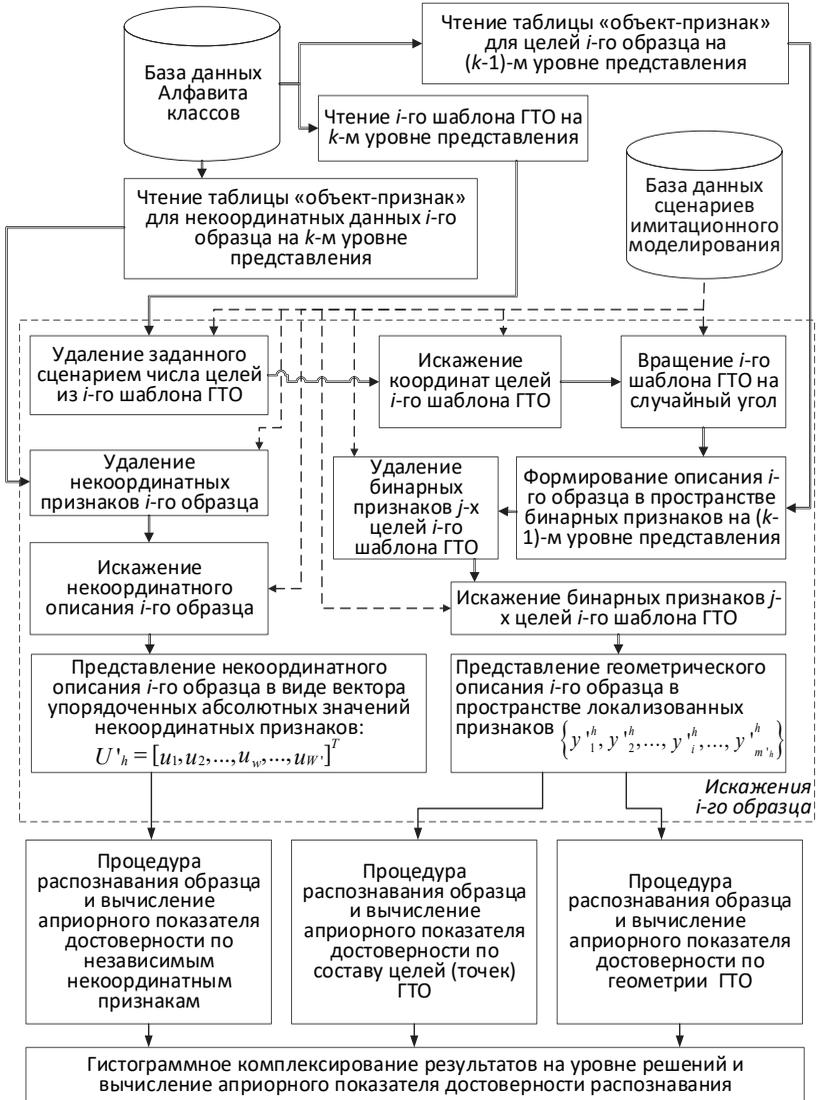


Рис. 9. Схема имитационного моделирования для исследования достоверности процедур комбинаторно-метрического алгоритма распознавания многомерных групповых точечных объектов в иерархическом пространстве признаков предметной области

Алфавит классов $\{\rho_l\}$, $l = \overline{1, L_k}$ содержал $L_k = 20$ шаблонов. На рисунке 10 представлен КА-шаблон как центроид кластерной группы нормированных статистических характеристик 5 КА сходной компоновки и покрытий в виде четырех точечного ГТО в трехмерном пространстве фотометрической системы (*UBVR*). Совокупная выборка распознаваемых объектов с априорно известными классами по каждому типу данных содержала 1000 примеров. Соответственно, в каждой точке графиков (рисунки 12-14) осуществлялось распознавание и усреднение результатов по всем 1000 примерам. Предъявляемые образцы в части описания ГТО на k -м уровне иерархии обладали неизвестной ориентацией на плоскости (x, y), неполнотой точек ГТО (относительно шаблонов), случайным разбросом координат точек, неизвестным масштабом области ГТО, на $(k-1)$ -м уровне — неполным, искаженным составом бинарных признаков целей и недостоверной процедурой их измерений.

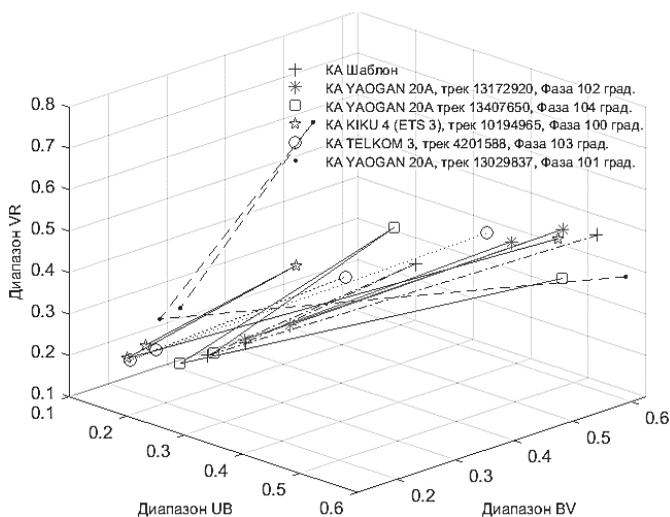


Рис. 10. Представление КА-шаблона и его кластерной группы КА по совокупности нормированных статистических характеристик в виде четырех точечных ГТО в трехмерном пространстве фотометрической системы (*UBVR*)

На рисунке 11 представлен типовой пример результатов распознавания образца (гистограмма, рисунок 11*a*) и построения его недостающих элементов (точек) в соответствии с геометрией соответствующего шаблона на k -м уровне иерархии (рисунок 11*b*). По составу целей образец отнесен к шаблону № 2, но вклад распределений априорных показателей по геометрическим и независимым некоординатным признакам обеспечивают правильное распознавание образца как шаблона № 5.

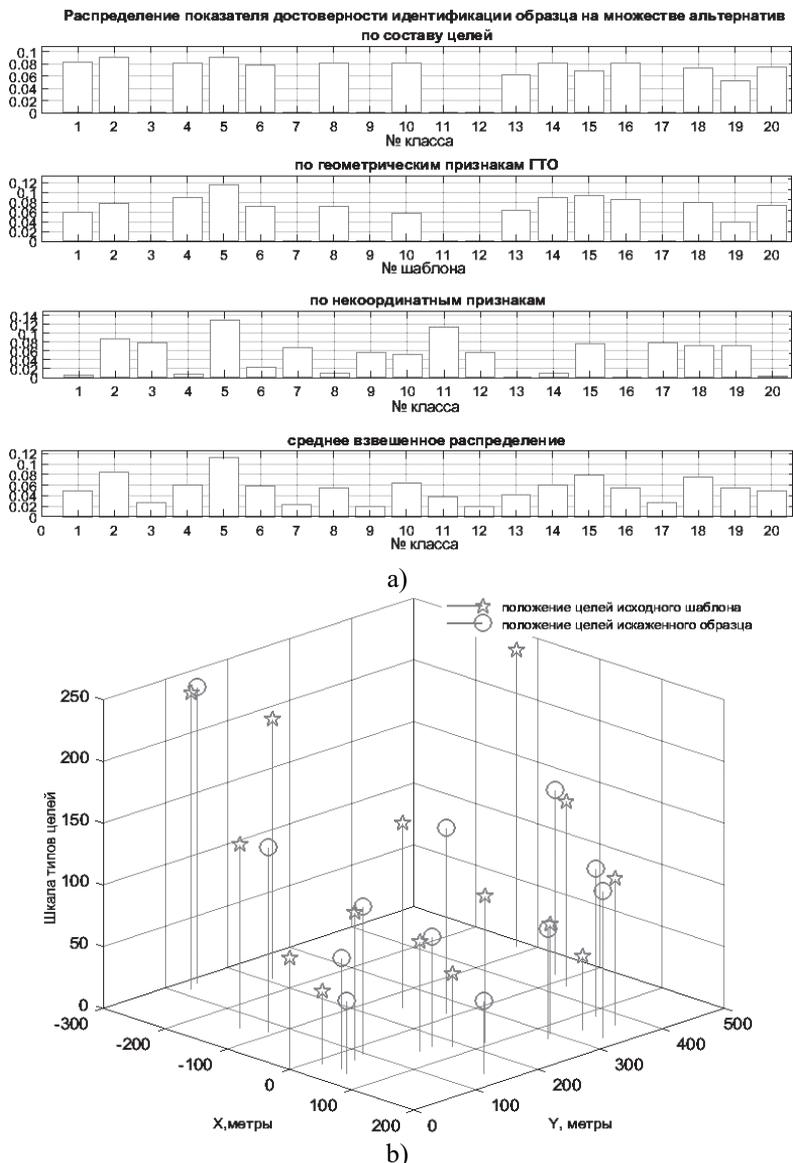


Рис.11. Пример результатов распознавания образца и определения его недостающих элементов (точек): *а)* Распределение априорных показателей достоверности на множестве классов (истинный шаблон № 5); *б)* Образец ГТО, представленный к распознаванию и его исходный шаблон на *k*-м уровне иерархии

Площадь столбцов дискретного распределения каждого априорного показателя нормирована по формуле численного интегрирования с равноотстоящими узлами (трапеций):

$$\int_a^b f(x)dx \approx h \left(\frac{y_0 + y_n}{2} + y_1 + y_2 + \dots + y_{n-1} \right), \quad (17)$$

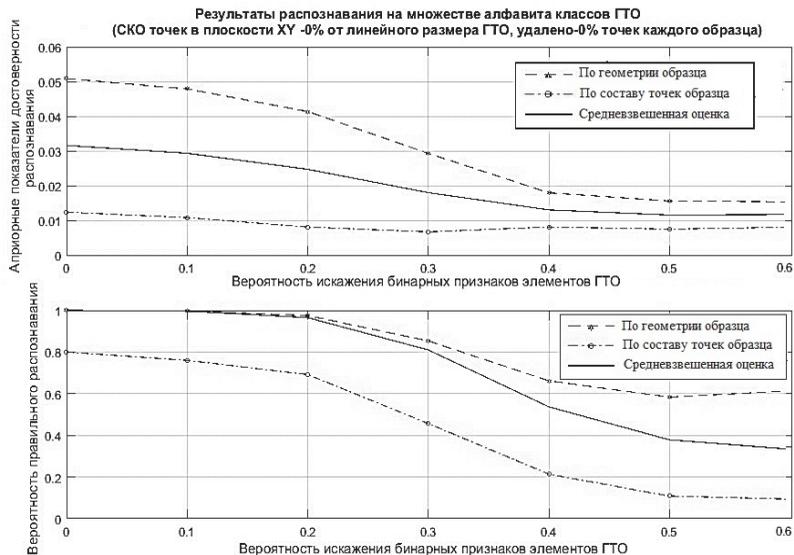
где $y_i = f(x_i)$, $i = \overline{1, n}$, $h = (b - a) / n$, для случая (рисунок 11) $n = 20$.

На рисунке 12 представлены зависимости показателей достоверности от вероятности искажения на $(k-1)$ -м уровне иерархии бинарных признаков элементов образца ГТО.

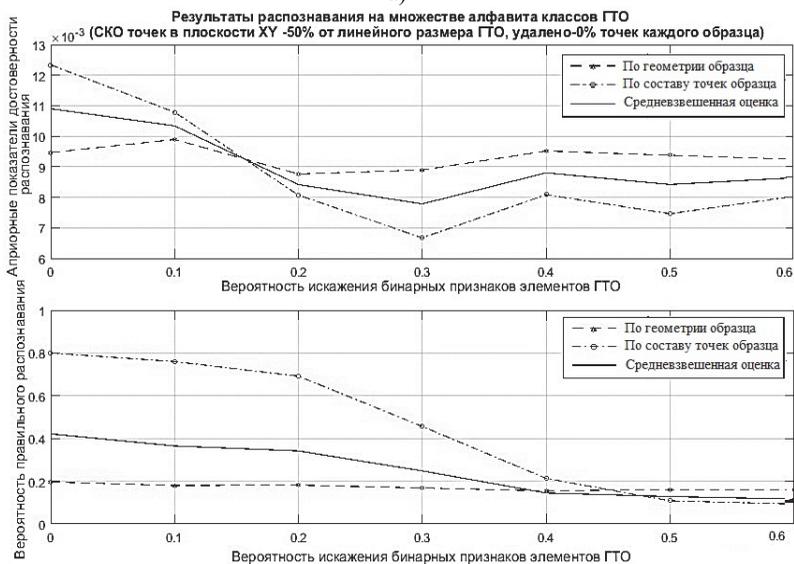
Соседние уровни априорных показателей достоверности E_i^h , $i = \overline{1, m'_h}$, $h = \overline{1, L_{k-1}}$, по геометрии ГТО и его составу свидетельствуют о большей достоверности процедуры распознавания по составу точек по сравнению с процедурой комбинаторного поиска фрагментов ГТО (рисунок 12b). В экспериментах при варьировании процентами удаленных целей, вероятностями искажения или недостоверного измерения бинарных признаков достоверность процедуры распознавания по составу целей становятся наилучшей при СКО точек 12% от линейного размера ГТО и более (рисунки 13 и 14).

Это может свидетельствовать о некой критичности уровня для описанных условий численных экспериментов с данными моделирования радиолокационного распознавания и распознавания состояний КА по спектрофотометрическим реализациям.

Повышение достоверности распознавания, обусловленное исключительно иерархией системы признаков образца, обеспечивается включением в комбинаторное множество индексов показателей E_{k-1}^h , $h = \overline{1, L_{k-1}}$ не только тех, которые вычислены на $(k-1)$ -м уровне иерархии и имеют максимальные значения, но и L следующих по убыванию (рисунок 15). Величина L ограничивается вычислительными ресурсами вычислителя и максимальным временем решения задачи распознавания.



a)



b)

Рис. 12. Априорные и апостериорные показатели распознавания иерархически организованных образцов в зависимости от вероятности искажения бинарных признаков элементов ГТО при различных СКО

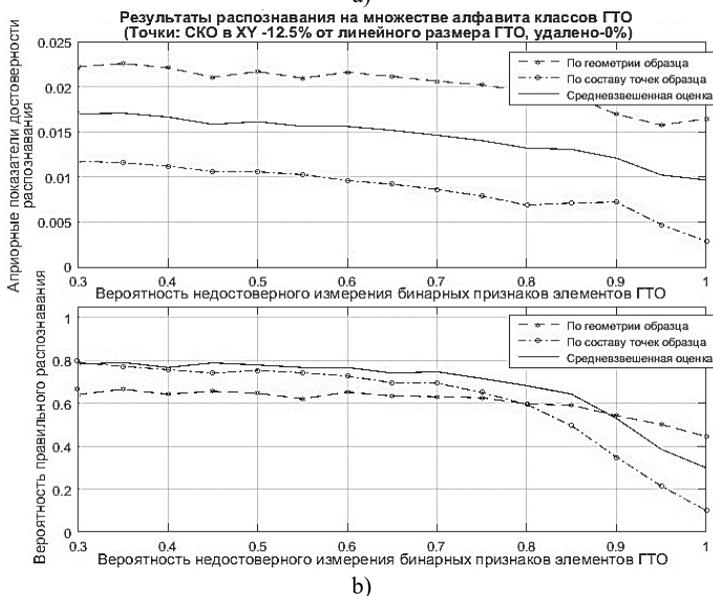
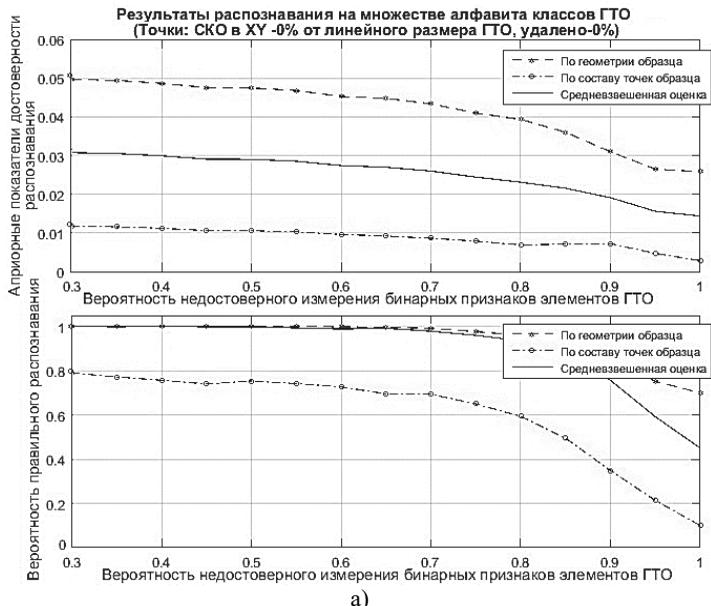


Рис. 13. Зависимости априорных и апостериорных показателей распознавания от вероятности недостоверных измерений бинарных признаков элементов ГТО на $(k-1)$ -м уровне иерархии

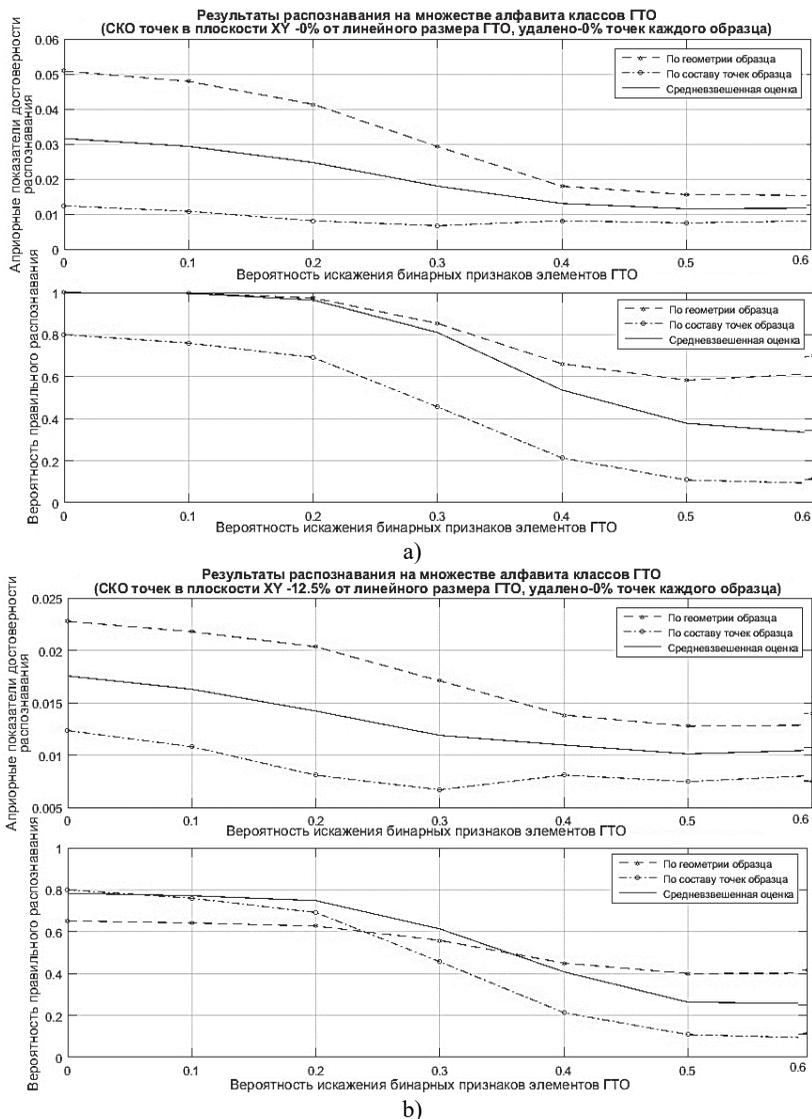


Рис. 14. Зависимости показателей распознавания от вероятности искажений бинарных признаков элементов ГТО на $(k-1)$ -м уровне иерархии

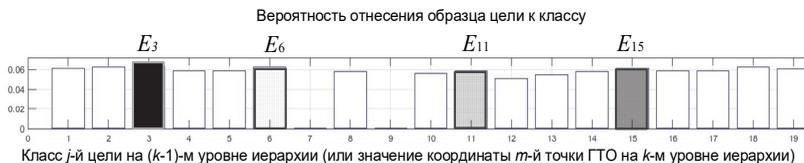


Рис. 15. Пример перебора фрагментов ГТО, где включаются не только тип цели, распознанный по максимуму показателя E_3 на $(k-1)$ -м уровне иерархии, но и следующие по порядку убывания показателей классы целей: $E_{15}, E_{11}, \dots, E_6$

5. Заключение. Особенностью алгоритма является работа с многомерными масштабируемыми представлениями многоуровневых объектов распознавания, которые представлены как классическим параметрическим описанием, так и ГТО, используя при этом пространство той минимальной мерности, которая позволяет с достаточной для предметных областей уровнем достоверности классифицировать зашумлённые и искаженные образцы.

В основе распознавания лежит подход, базирующийся на метрическом сличении полуматриц всех попарных расстояний между точками образца ГТО с шаблонами. Неопределенность ракурса сличаемых ГТО обуславливает введение комбинаторных процедур и соответствующие ограничения подхода. Если известно, что в распознаваемом образце ГТО присутствуют «ложные» точки, то при размерах ГТО $m \geq 13$ использование перебора точек при сличении R фрагментов в алгоритме становится нецелесообразным (число альтернатив $6,2 \times 10^9$). В этом случае в алгоритме вместо перебора используется сочетание числа точек шаблона по количеству точек образца, что, в свою очередь, является ограничением, несколько снижающим общую достоверность распознавания.

Переход от процедуры распознавания с фиксированными индексами признаков к процедуре распознавания по ГТО позволяет использовать дополнительные признаки формы и повышать достоверность распознавания в той мере, насколько информативность одномерного вектора признаков (одномерного изображения) размером $[n \times 1]$ отличается от многомерного изображения свойств объекта размером $[n \times n \times \dots]$. Исходные описания алфавита классов одновременно представлены вектором признаков в классическом представлении систем распознавания и словарем признаков формы в относительной системе координат ГТО, представляющего образец. Благодаря чему реализована взаимодополняемость процедур распознавания по априорным показателям (по составу целей (точек) образца и/или геометрии ГТО, представляющего образец). Система признаков обуславливает многоуровневость алгоритма и возможность повышения достоверности распознавания за счет учета

менее вероятных исходов на нижних уровнях иерархии как источника дополнительной информации.

Полученные результаты могут представлять интерес для разработки систем технического зрения, радиовидения и технической диагностики, в которых решаются близкие задачи распознавания.

Литература

1. *Фурман Я.А.* Точечные поля и групповые объекты // М.: Физматлит. 2015. 440 с.
2. *Хафизов Р.Г., Роженцов А.А., Хафизов Д.Г., Охотников С.А.* Основы теории обработки непрерывных контуров изображений // Йошкар-Ола: ПГТУ. 2015. 172 с.
3. *He K., Zhang X., Ren S., Sun J.* Deep Residual Learning for Image Recognition // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2015. pp. 770–778.
4. *Вениаминов С.С.* Выявление скрытых структурных закономерностей в процессах и сигналах: От космических исследований до анализа трендов рынка // М.: Изд-во URSS. 2014. 216 с.
5. *Анцев Г.В.* Оптико-электронные системы самонаведения высокоточного оружия. Введение в теорию // Радиотехника. 2017. 720 с.
6. *Тихонов Э.П.* Разладка, гомеостазис, измерение в рамках компенсационного принципа равновесия в динамических системах. Часть 2: Исследование конкретного алгоритма // Информационно-управляющие системы. 2012. № 3(58). С. 77–83.
7. *Хафизов Р.Г., Охотников С.А., Яранцева Т.В.* Модели контуров изображений объектов при наличии геометрических искажений // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40. № 3. С. 404–409.
8. *Хурдушов А.А., Марков В.Н.* Спонтанное выделение иерархии двумерных признаков для классификации изображений // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2014. № 6(210). С. 58–69.
9. *Beaudet P.* Rationally Invariant Image Operations // International Joint Conference on Pattern Recognition. 1978. pp. 579–583.
10. *Förstner W.* A feature based correspondence algorithm for image matching // ISPRS Commission III. 1986. pp. 150–166.
11. *Rad A.A., Faez K., Qaragozlu N.* Fast Circle Detection Using Gradient Pair Vectors // International Conference on Digital Image Computing (DICTA). 2003. pp. 879–887.
12. *Baker S., Nayar S.K., Murase H.* Parametric feature detection // International Journal of Computer Vision. 1998. vol. 27. no. 1. pp. 27–50.
13. *Ecabert O., Thiran J.* Adaptive Hough transform for the detection of natural shapes under weak affine transformation // Pattern Recognition Letters. 2004. vol. 25. no. 12. pp. 1411–1419.
14. *Ткачев С.С.* О перспективных задачах динамики космического полета // ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 2015. 40 р.
15. *Тужилкин А.С.* Разработка и исследование алгоритма поиска положения особых точек в системах технического зрения летательных аппаратов // Вестник Центра ВКО «Алмаз-Антей». 2018. № 1. С. 86–92.
16. *Rublee E., Rabaut V., Konolige K., Bradski G.R.* ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF // IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). 2011. pp. 2564–2571.
17. Галерея PCA изображений Sandia National Laboratories. URL: <http://www.sandia.gov/RADAR/imagery.html> (дата обращения: 06.05.2019).
18. *Колесниченко Г.Н., Миронов А.В., Васютин А.А., Логунов С.В.* Применение многоспектральных фотометрических данных в задаче распознавания космических

- объектов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2010. Т. 8. № 5. С. 86–91.
19. *Novikov A.I., Sablina V.A., Efimov A.I.* Image Superimposition and the Problem of Selecting the Set of Corresponding Point Pairs // 2015 4th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). 2015. pp. 139–142.
 20. *Lanczi E.R.* Photometry of precessing torsers // Journal of the Optical Society of America. 1966. vol. 56. no. 7. pp. 873–877.
 21. *Wang. L., Chen Y., Han Y.* Impact of field of view configuration of Cross-track infrared Sounder on clear-sky observation // Applied Optics. 2016. vol. 55. no. 25. pp. 7113–7119.
 22. *Li Z. et al.* Simple transfer calibration method for a Cimel Sun-Moon photometer: calculation lunar calibration coefficients from Sun calibration constans // Applied optics. 2016. vol. 55(27). pp. 7624–7630.
 23. *Catalano S., McCrosky R., Milani A., Nobili A.M.* Optical tracking of synchronous Earth's satellites for geophysical purposes // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1983. vol. 88. no. B1. pp. 669–676.
 24. *Анисимов Б.В., Курганов В.Д., Злобин В.К.* Распознавание и цифровая обработка изображений: Учеб. пособие для вузов // Высшая школа. 1983. 295 с.
 25. *Михайленко К., Грицулин С.* Американская широкополосная РЛС миллиметрового диапазона «ММВ» // Зарубежное военное обозрение. 2017. № 4 С. 60–62.
 26. *Цветков О.В., Тананыкина Л.В.* Метод предварительного кодирования изображений в корреляционно-экстремальных системах // Компьютерная оптика. 2015. Т. 39. № 5. С. 738–743.
 27. База данных фотометрии искусственных спутников Земли многоканального мониторингового телескопа. URL: <http://astroguard.ru/satellites> (дата обращения: 08.05.2019).
 28. *Ежов А.А., Шульский С.А.* Нейрокомпьютинг и его применения в экономике и бизнесе. Серия «Учебники экономико-аналитического института МИФИ» // М.: МИФИ. 1998. 224 с.
 29. *Каплин А.Ю., Коротин А.А., Назаров А.В., Якимов В.Л.* Алгоритм классификации и восстановления искаженных n-мерных групповых точечных объектов на основе комбинаторного поиска фрагментов // Труды СПИИРАН. 2016. Вып. 6(49). С. 167–189.
 30. *Колесник Д.Ю., Логунов С.В., Евенко А.В.* Способ обработки и анализа результатов некоординатных измерений для распознавания вращающихся геостационарных спутников // НТЦ оборонного комплекса «Компас». 2018. № 3. С. 37–42.
 31. *Montenbruck O., Gill E.* Satellite Orbits: Models, Methods and Applications // Springer Science & Business Media. 2012. 369 p.
 32. *Hernandez C., Jehn R.* Classification of geostationary objects. 2000. URL: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1013399804776> (дата обращения: 08.05.2019).

Коротин Андрей Анатольевич — канд. техн. наук, директор научно-исследовательского центра, ОАО «Радиоавионика. Область научных интересов: системы управления и связи специального назначения, человеко-машинные системы, аппаратно-программные комплексы, защита космических аппаратов от радиации. Число научных публикаций — 40. kaa2805@mail.ru; Троицкий пр., 4, лит. Б, 190103, Санкт-Петербург, Российская Федерация; р.т.: +79119107595; факс: +7(812) 251-2743.

Козырев Геннадий Иванович — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: идентификация, техническая диагностика, методология испытаний сложных систем, метрология.

Число научных публикаций — 100. kozirev2004@yandex.ru; Ждановская, 13, 197198, Санкт-Петербург, Российская Федерация; р.т.: (812) 347-95-34.

Назаров Андрей Вячеславович — д-р техн. наук, доцент, начальник кафедры, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: распознавание образов, нейросетевые технологии, моделирование распределенных систем, обработка сигналов в оптико-электронных информационных системах. Число научных публикаций — 100. naz-av@mail.ru; Ждановская, 13, 197198, Санкт-Петербург, Российская Федерация; р.т.: (812) 347-95-33.

Благодыренко Евгений Васильевич — адъюнкт, Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: распознавание образов, моделирование информационных процессов в радиотехнических системах, обработка сигналов в оптико-электронных информационных системах. Число научных публикаций — 10. blagodyrenkoev@mail.ru; Ждановская, 13, 197198, Санкт-Петербург, Российская Федерация; р.т.: (812) 347-95-33.

A.A. KOROTIN, G.I. KOZYREV, A.V. NAZAROV, E.V. BLAGODYRENKO
**INVESTIGATION OF RELIABILITY OF COMBINATORIAL-
METRIC ALGORITHM FOR RECOGNITION OF N-
DIMENSIONAL GROUP POINT OBJECTS IN HIERARCHY
FEATURES SPACE**

Korotin A.A., Kozyrev G.I., Nazarov A.V., Blagodyrenko E.V. Investigation of Reliability of Combinatorial-Metric Algorithm for Recognition of N-Dimensional Group Point Object in Hierarchy Features Space.

Abstract. The scientific research of reliability of combinatorial-metric algorithm for multidimensional group point objects recognition in hierarchically organized features space is considered in the paper. The nature of reliability indicator change is examined, as an example, using multilevel descriptions of simulated and real objects under the condition that recognition results obtained at one hierarchy level are used as input data at next level.

A priori uncertainty of a view angle, composition incompleteness and coordinate noise of objects determine the combinatorial procedures of quantifiable estimation of proximity of multidimensional GPO, presenting the object of recognition to a particular class.

The stability of the recognition algorithm is achieved by the possibility of changing strategy of making a classification decision. For this purpose, we use the representation of a group point object at the lowest level of the hierarchy in the form of: sample, composition of sample elements or a complex a priori indicator. In order to increase the recognition accuracy, it was proposed to use the search of recognition results at low levels of the hierarchy. The experimental dependences of a priori and a posteriori reliability indicators for various conditions for measurements and states of recognition objects are provided in the paper.

Keywords: Multilevel Group Point Object, Pattern Recognition, Features Hierarchy, Recognition Reliability.

Korotin Andrey Anatolyevich — Ph.D., Head of the Research Center, Radioavionica JSC. Research interests: Special Purpose Control and Communication Systems, Man-Machine Systems, Hardware and Software Systems, Protection of Spacecraft from Radiation. The number of publications — 40. kaa2805@mail.ru; 4, let. B, Troickij pr., 190103, St. Petersburg, Russian Federation; office phone: +79119107595; fax: +7(812) 251-2743.

Kozyrev Gennadiy Ivanovich — Ph.D., Dr.Sci., Professor, Professor of Department, Mozhaysky Military Space Academy. Research interests: Identification, Technical Diagnostics, Complex Systems Testing Methodology, Metrology. The number of publications — 100. koziyrev2004@yandex.ru; 13, Zhdanovskaya st., 197198, St. Petersburg, Russian Federation; office phone: (812) 347-95-34.

Nazarov Andrey Vyacheslavovich — Ph.D., Dr.Sci., Associate Professor, the Chief of Department, Mozhaysky Military-Space Academy. Research interests: Pattern Recognition, Neural Nets, Modeling of Distributed Systems, Signal Processing in Optical-Electronic Information Systems. The number of publications — 100. naz-av@mail.ru; 13, Zhdanovskaya st., 197198, St. Petersburg, Russian Federation; office phone: (812) 347-95-33.

Blagodyrenko Evgeniy Vasilyevich — Associate of Department, Mozhaysky Military-Space Academy. Research interests: Pattern Recognition, Neural Nets, Modeling of Distributed Systems, Signal Processing in Optical-Electronic Information Systems. The number of publications — 10. blagodyrenkoev@mail.ru; 13, Zhdanovskaya str., 197198, St. Petersburg, Russian Federation; office phone: (812) 347-95-33.

References

1. Furman Ja.A. *Tochechnye polja i gruppovye ob'ekty* [Point field and group objects]. M.: Fizmatlit. 2015. 440 p. (In Russ.).
2. Hafizov R.G., Rozhencov A.A., Hafizov D.G., Ohotnikov S.A. *Osnovy teorii obrabotki nepreryvnykh konturov izobrazhenij* [Bases continuous contour image processing theory]. Yoshkar-Ola: PGTU. 2015. 172 p. (In Russ.).
3. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep Residual Learning for Image Recognition. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2015. pp. 770–778.
4. Veniaminov S.S. *Vyjavlenie skrytykh strukturnykh zakonomernostej v processah i signalah: Ot kosmicheskikh issledovanij do analiza trendov rynka* [Revealing the hidden structural patterns in the signals and processes: from space research to the analysis of market trends]. M.: Izd-vo URSS. 2014. 216 p. (In Russ.).
5. Aneev G. V. *Optiko-jelektronnye sistemy samonavedenija vysokotochnogo oruzhija. Vvedenie v teoriju* [Optoelectronic homing precision weapons. Introduction to the theory]. M.: Radiotekhnika. 2017. 720 p. (In Russ.).
6. Tihonov E.P. [Discord, homeostasis, the measurement of the compensation under the principle of balance in dynamic systems. Part 2: A study of a particular algorithm]. *Informacionno-upravljajushhie sistemy – Information and Control Systems*. 2012. vol. 3. pp. 77–83. (In Russ.).
7. Hafizov R.G., Ohotnikov S.A., Jaranceva T.V. [Models contour images of objects in the presence of geometric distortion]. *Komp'yuternaja optika – Computer optics*. 2016. Issue 40. vol. 3. pp. 404–409. (In Russ.).
8. Markov V.N., Hurshudov A.A. [Spontaneous release hierarchy dimensional characteristics]. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SpbGU. Informatika. Telekommunikacii. Upravlenie – Scientific and technical SPSU statements. Computer science. Telecommunications. Control*. 2015. vol. 6(210). pp. 58–69. (In Russ.).
9. Beaudet P. Rationally Invariant Image Operations. International Joint Conference on Pattern Recognition. 1978. pp. 579–583.
10. Förstner W. A feature based correspondence algorithm for image matching. ISPRS Commission III. 1986. pp. 150–166.
11. Rad A.A., Faez K., Qaragozlou N. Fast Circle Detection Using Gradient Pair Vectors // International Conference on Digital Image Computing (DICTA). 2003. pp. 879–887.
12. Baker S., Nayar S.K., Murase H. Parametric feature detection. *International Journal of Computer Vision*. 1998. vol. 27. no. 1. pp. 27–50.
13. Ecabert O., Thiran J. Adaptive Hough transform for the detection of natural shapes under weak affine transformation. *Pattern Recognition Letters*. 2004. vol. 25. no. 12. pp. 1411–1419.
14. Tkachev S.S. *O perspektivnykh zadachah dinamiki kosmicheskogo poleta* [About prospective problems of space flight dynamics]. IPM im. M.V.Keldasha RAN. 2015. (In Russ.).
15. Tuzhilkin A.S. [Development and research of algorithm of search positions of special points in the vision of aircraft engines]. *Vestnik Koncerna VKO «Almaz-Antey» – Bulletin Concern EKR "Almaz-Antey"*. 2018. vol. 1. pp. 86–92. (In Russ.).
16. Rublee E., Rabaut V., Konolige K., Bradski G.R. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF. IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). 2011. pp. 2564–2571.
17. Galereja RSA izobrazhenij Sandia National Laboratories [Gallery SAR images Sandia National Laboratories]. Available at: <http://www.sandia.gov/RADAR/imagery.html> (accessed: 06.05.2019). (In Russ.).
18. Kolesnichenko G.N., Mironov A.V., Vasjutin A.A., Logunov S.V. [The use of multi-spectral data in the problem space objects identification]. *Informacionno-izmeritel'nye i upravljajushhie sistemy – Information-measuring and operating systems*. 2010. Issue 8. vol. 5. pp. 86–91. (In Russ.).

19. Novikov A.I., Sablina V.A., Efimov A.I. Image Superimposition and the Problem of Selecting the Set of Corresponding Point Pairs. 2015 4th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). 2015. pp. 139–142.
20. Lanczi E.R. Photometry of precessing torses. *Journal of the Optical Society of America*. 1966. vol. 56. no. 7. pp. 873–877.
21. Wang. L., Chen Y., Han Y. Impact of field of view configuration of Cross-track infrared Sounder on clear-sky observation. *Applied Optics*. 2016. vol. 55. no. 25. pp. 7113–7119.
22. Li Z. et al. Simple transfer calibration method for a Cimel Sun-Moon photometer: calculation lunar calibration coefficients from Sun calibration constants. *Applied optics*. 2016. vol. 55(27). pp. 7624–7630.
23. Catalano S., McCrosky R., Milani A., Nobili A.M. Optical tracking of synchronous Earth's satellites for geophysical purposes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1983. vol. 88. no. B1. pp. 669–676.
24. Anisimov B.V., Kurganov V.D., Zlobin V.K. *Raspoznavanie i cifrovaja obrabotka izobrazhenij* [Recognition and processing digital images]. Vysshaya shkola. 1983. 295 p. (In Russ.).
25. Mihajlenko K., Grishulin S. [US broadband millimeter-wave radar "MMW"]. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie – Foreign Military Review*. 2017. vol. 4. pp. 60–62. (In Russ.).
26. Cvetkov O.V., Tananykina L.V. [Method precoding images in correlation-extreme systems]. *Komp'yuternaja optika – Computer optics*. 2015. Issue 39. vol. 5. pp. 738–743. (In Russ.).
27. Baza dannyh fotometrii iskusstvennyh sputnikov Zemli mnogokanal'nogo monitoringovogo teleskopa [Database photometry of satellites monitoring the multichannel telescope Earth]. Available at: <http://astroguard.ru/satellites> (accessed: 08.05.2019) (In Russ.).
28. Ezhov A.A., Shumskij S.A.; pod obshh. red. prof. Haritonova V.V. *Nejrokomputing i ego primeneniya v jekonomike i biznese* [Neurocomputing and its application in economics and business]. M.: MIFI. 1998. 224 p. (In Russ.).
29. Kaplin A.Ju., Korotin A.A., Nazarov A.V., Jakimov V.L. [Classification algorithm and restore corrupted n-dimensional point group objects based on combinatorial search of fragments]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2016. vol 6(49). pp. 167–189. (In Russ.).
30. Kolesnik D.Ju., Logunov S.V., Evenko A.V. [Results processing and analysis method for the measurement noncoordinate recognition rotating geostationary satellites]. *Oboronnyj kompleks "Kompas" — Defense industry "Compass"*. 2018. vol. 3. pp. 37–42. (In Russ.).
31. Montenbruck O., Gill E. *Satellite Orbits: Models, Methods and Applications*. Springer Science & Business Media. 2012. 369 p.
32. Hernandez C., Jehn R. Classification of geostationary objects. 2000. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1013399804776> (accessed: 08.05.2019).