

УДК 621.391.266

Я. А. Фурман, А. А. Роженцов, А. Н. Леухин

(Йошкар-Ола)

**ОПТИМАЛЬНЫЕ СИГНАЛЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ
ОРИЕНТАЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ
ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ ЗВЕЗДНОГО НЕБА ***

Рассмотрена задача выбора формы визуального точечного ориентира, оптимизирующего работу системы ориентации летательного аппарата по входному сигналу при распознавании ориентира и оценке его параметров. Показана невозможность решения таких задач при наличии только одного ориентира. Определена форма ориентира, оптимального для распознавания, и найдены вторичные созвездия квазиоптимальной формы. Решена задача выбора формы вторичного созвездия, оптимального для оценки параметров, и найдены вторичные созвездия квазиоптимальной формы, включающие вторичные созвездия, квазиоптимальные для распознавания.

Введение и постановка задачи. В общем виде задача ориентации летательного аппарата (ЛА) по изображениям поверхностных или астрономических ориентиров заключается в нахождении оценки матрицы преобразования \mathbf{D} базовой (географической или экваториальной) системы координат и системы координат базового датчика изображения (СКД) [1–5]:

$$\hat{\mathbf{D}} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \end{bmatrix} = \mathbf{X}^E (\hat{\mathbf{X}}^\delta)^{-1},$$

где \mathbf{X}^δ – матрица координат ориентиров в базовой СКД; \mathbf{X}^E – матрица наблюдаемых координат одноименных ориентиров в СКД, полученная в результате сопоставления оператором $\Psi(\cdot)$ информации из наблюдаемого изображения $K(x, y, t)$ и вектора \mathbf{g} априорных сведений об ориентации и характере изображения: $\mathbf{X}^E = \Psi[K(x, y, t), \mathbf{g}]$.

Группа звезд, изображение которых на небесной сфере может быть использовано в качестве ориентира, назовем вторичным созвездием (ВС). Решение задачи ориентации ЛА по изображению звездного неба обычно разбивается на несколько этапов, главными из которых являются: 1) получение

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 99-01-00186).

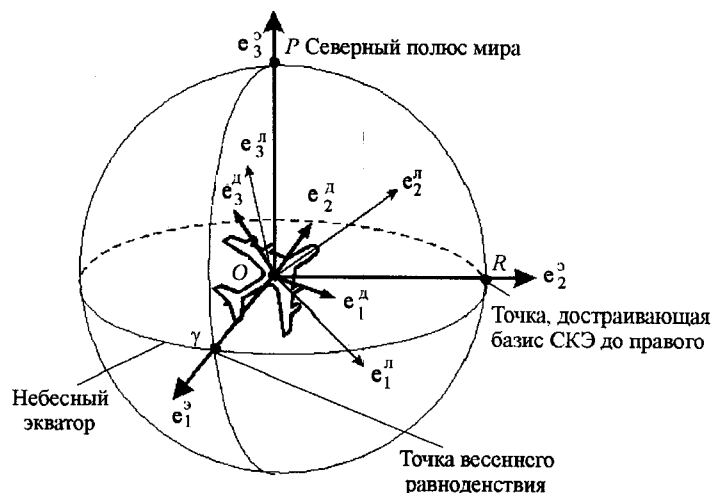


Рис. 1. Системы координат для ориентации летательных аппаратов в инерциальном базисе

изображений участков звездного неба, 2) определение координат звезд в СКД и распознавание ВС, 3) идентификация звезд распознанного ВС, 4) расчет элементов ориентации ЛА.

Для определения положения и ориентации ЛА часто используют следующие три системы координат с совмещенной начальной точкой, расположенной в точке наблюдения O , где и находится летательный аппарат (рис. 1).

Первая из них – СКЭ (экваториальная система координат) с базисными векторами $\{e_1^s, e_2^s, e_3^s\}$. Вектор e_1^s направлен к точке весеннего равноденствия, e_3^s – к Северному полюсу мира. Вторая система с базисными векторами $\{e_1^l, e_2^l, e_3^l\}$ связана с положением ЛА, причем вектор e_1^l ориентирован вдоль правого крыла, e_2^l – вдоль фюзеляжа, e_3^l – вдоль вертикальной плоскости ЛА. Третья система имеет базисные векторы $\{e_1^a, e_2^a, e_3^a\}$ и отражает положение астродатчика и телевизионного кадра. Вектор e_1^a направлен вдоль оптической оси датчика, а векторы e_2^a и e_3^a – вдоль главных осей кадра изображения прямоугольной формы.

Основной подход к распознаванию ВС базируется на совмещении трафарета с эталонным (машинным) кадром изображения, полученным на базе эталонного каталога звезд, с изображением ВС на телевизионном кадре, сформированном по данным астродатчика. В результате одноименные отметки оказываются в непосредственной близости друг от друга, что позволяет выполнить идентификацию отметок с применением того или иного решающего правила [3]. Для реализации подхода необходима априорная информация о положении оптической оси астродатчика.

Существующие системы ориентации ЛА по изображениям ориентиров являются неоптимизированными по входному сигналу главным образом из-за того, что форма ориентира как природного объекта обычно от нас не зависит. Поэтому такая система обработки сигналов, в принципе, менее эффективна, чем, например, радиолокационная, сигналы для которой выбираются при заданном критерии качества наилучшим образом. Целесообразность поиска оптимальных форм визуальных ориентиров объясняется, по крайней

мере, двумя факторами: такой ориентир обеспечивает наибольшую эффективность его распознавания и оценки параметров, а также устраняет необходимость поиска других, более эффективных форм для ориентации ЛА. В данной работе с теоретических и экспериментальных позиций рассматривается решение задачи определения формы вторичных созвездий для их оптимального распознавания и оценки параметров в условиях априорной неопределенности положения оптической оси астродатчика ЛА.

По сути дела, мы дадим ответ на один из основных вопросов, связанных с ориентацией летательных аппаратов по визуальным ориентирам, – форма какого ориентира считается хорошей для этой задачи?

Осуществление ориентации в условиях априорной неопределенности оптической оси астродатчика требует определения форм ориентиров, свойства которых настолько отличаются от свойств формы любых других ВС, что их распознавание возможно с очень высокой вероятностью и сравнительно невысокой трудоемкостью при поиске ВС в пределах полусферы или всей сферы.

1. Форма изображения как сигнал. Математическое представление понятия формы изображения позволяет рассматривать ее как разновидность сигнала и применять методы теории сигналов для определения формы оптимальных ориентиров.

Пусть $\Gamma = \{\gamma(n)\}_{0, k-1}$ – контур произвольного изображения, где k – количество составляющих его элементарных векторов (ЭВ) $\gamma(n), n = 0, 1, \dots, k-1$, (рис. 2, а).

В дальнейшем будем пользоваться определением формы, принятым в работе [6]. Если Γ – контур произвольного изображения K , а Π – контур тестового изображения, то форма Φ изображения K определена как аналитическое описание нормированного по масштабу контура Γ , у которого начальная точка смещена, а сам контур повернут таким образом, что расстояние между ним и контуром Π минимально. В качестве Π выбран дельтовидный контур

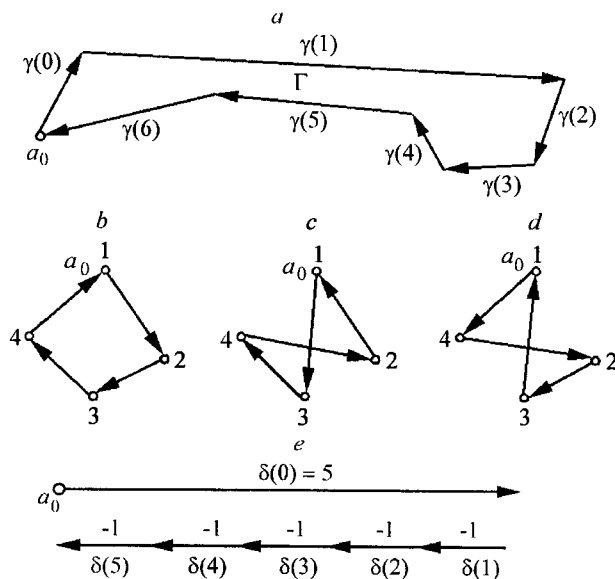


Рис. 2. Контур силуэтного изображения (а), контуры, задаваемые групповыми точечными объектами (b – d), и дельтовидный контур размерности $k = 6$ (e)

$\Delta = \{\delta(n)\}_{0, k-1}$, причем $\delta(0) = k - 1$, а $\delta(1) = \delta(2) = \dots = \delta(k - 1) = -1$ (рис. 2, e) [7].

Такой контур обладает равномерным спектром Фурье, дельтовидной автокорреляционной функцией (АКФ) $\{\eta(m)\}_{0, k-1}$ и является в классе замкнутых контуров наиболее сложным по форме при данном значении k . Последнее свойство понимается как возможность пренебречь взаимной энергией связи ЭВ-контра, задаваемой отсчетами $\eta(m)$, $m = 1, 2, \dots, k - 1$, по сравнению с энергией контра, равной $\eta(0) = k^2 - k$. В этом случае аналитическое представление формы изображения в классе преобразований (поворот, растяжение, сдвиг начальной точки) совпадает с аналитическим описанием нормированного контра Γ , у которого начальная точка совпадает с началом максимального по длине ЭВ, $\gamma(s_0)$ расположен горизонтально и направлен вправо.

Одной из задач, которую можно решить на основе введенного понятия формы, является количественная оценка степени простоты формы.

2. Требования к форме вторичного созвездия, используемого для ориентации летательного аппарата. При отсутствии априорной информации о положении ориентира определение положения его точек осуществляется перебором всех звезд в заданном диапазоне их светимости. Для каждой звезды в пределах стереоугла, не превышающего определенной величины θ , производится подбор $(k - 1)$ соседей в качестве вершин k -угольника Γ . Формирование контра осуществляется путем соединения выбранного количества звезд элементарными векторами. Очевидно, что ВС может иметь много контуров, а следовательно, много форм (рис. 2, b - d).

Вследствие хаотического расположения звезд подавляющее количество контуров будут иметь произвольные длины ЭВ и значения углов между соседними ЭВ. Такие контуры характеризуются широким энергетическим спектром, и, следовательно, задаваемые ими формы по сложности слабо отличаются от формы контра Δ , спектр которого в классе замкнутых контуров абсолютно равномерен [7]. Поэтому форму ориентира следует искать в классе форм, максимально удаленных от формы контра Δ , т. е. максимально простых форм. Расстояние между векторами, задаваемыми нормированными по энергии контурами Δ_n и Γ_n , в этом случае должно быть максимально возможным, т. е. $R_n^2 = \|\Delta_n - \Gamma_n\|^2 \rightarrow \max$, что эквивалентно условию минимума реальной части скалярного произведения этих контуров, т. е. $\text{Re}(\Delta_n, \Gamma_n) \rightarrow \min$. Для нормированного скалярного произведения контуров Δ_n и Γ_n с учетом определения контра Δ получим

$$\eta_n = (\Delta_n, \Gamma_n) = \left(\frac{\Delta}{\|\Delta\|}, \frac{\Gamma}{\|\Gamma\|} \right) = \frac{1}{\|\Gamma\| \sqrt{k(k-1)}} \left[k\gamma^*(0) - \sum_{n=0}^{k-1} \gamma^*(n) \right].$$

Контур Γ замкнут, и поэтому сумма в квадратных скобках равна нулю. Тогда $\eta_n = \frac{k\gamma^*(0)}{\|\Gamma\| \sqrt{k(k-1)}}$ и выражение для квадрата нормированного расстояния станет равным

$$R_{n, \Delta, \Gamma}^2 = 2 \left[1 - \frac{|\gamma(n_0)|}{\|\Gamma\|} \sqrt{\frac{k}{k-1}} \right].$$

Эта величина не только характеризует различие задаваемых контурами форм, но и зависит еще от взаимного поворота $\Delta\phi$ и смещения d начальных точек контуров. Если использовать выражение для расстояния между двумя контурами, учитывающее только различие форм [8], то последняя формула примет вид

$$R_{\text{н}}^2 = 2 \left[1 - \frac{|\gamma(s_0)|}{\|\Gamma\|} \sqrt{\frac{k}{k-1}} \right], \quad (1)$$

где $\gamma(s_0)$ – максимальный по модулю ЭВ контура Γ . В результате условие минимума скалярного произведения становится эквивалентным условию

$$\lambda = |\gamma(s_0)| / \|\Gamma\| \rightarrow \min. \quad (2)$$

Таким образом, замкнутый контур ВС с максимальной по простоте формой характеризуется наибольшей величиной отношения квадрата модуля преобладающего по длине ЭВ к сумме квадратов модулей всех ЭВ контура, что возможно лишь для случая равенства всех ЭВ контура, т. е.

$$|\gamma(0)| = |\gamma(1)| = \dots = |\gamma(k-1)|. \quad (3)$$

Свойством (3) обладают элементарные контуры (ЭК) [7]

$$\Gamma_j = \left\{ \exp \left\{ i \frac{2\pi}{k} jn \right\} \right\}_{0, k-1}, \quad j=1, 2, \dots, k-1, \quad (4)$$

где j – порядок ЭК. Они имеют равномерную АКФ и монохроматический спектр. Значащая компонента спектра расположена на частоте, равной порядку j ЭК. Выражение (1) для контуров этого вида будет равно

$$R_{\text{н}}^2 = 2 \left(1 - \lambda \sqrt{\frac{k}{k-1}} \right) = 2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{k-1}} \right).$$

Отсюда видно, что расстояние увеличивается с ростом k , т. е. рост размерности ЭК приводит к упрощению формы, причем порядок j ЭК не играет роли. Максимальное значение расстояния равно $\sqrt{2}$, но при $k > 3$ увеличение размерности ЭК слабо влияет на степень упрощения формы. Поэтому с точки зрения получения простейшей формы требование высокой размерности k не является важным. Однако чем выше k , тем ниже вероятность образования ВС с таким контуром.

3. Коэффициент монохроматичности формы ВС. Событие, заключающееся в существовании k звезд в заданном диапазоне их светимостей и ограниченном по угловому размеру телесном угле, точно лежащих в вершинах правильного k -угольника, маловероятно. Поэтому можно говорить лишь о поиске ВС квазиправильной формы. Вершины k -угольников, задающих элементарный контур Γ_j любого порядка j , $j \neq 0$, совпадают. Поэтому с позиции минимальных вычислительных затрат при поиске ВС целесообразно остановиться на элементарном контуре Γ_1 или Γ_{k-1} , представляющих собой правильные выпуклые k -угольники с обходом против и по часовой стрелке.

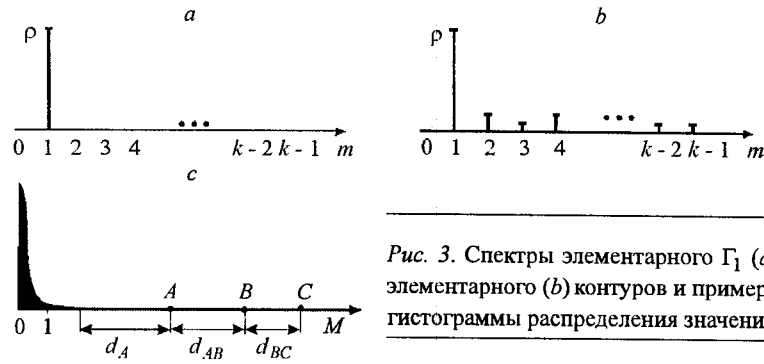


Рис. 3. Спектры элементарного Γ_1 (a) и квази-элементарного (b) контуров и примерный вид гистограммы распределения значений КМФ (c)

Для определенности выберем элементарный контур Γ_1 . При таком подходе упрощается процедура нумерации точек, принимаемых при поиске за вершины фигуры. Контур обходится по часовой стрелке, элементарные векторы соединяют между собой ближайшие точки, и получившийся k -угольник должен быть выпуклым. Амплитудный спектр ЭК Γ_1 состоит из одной ненулевой компоненты $\rho(1) = k$ (рис. 3, a). Поскольку форма ВС, выбранного в качестве ориентира, описывается квазиравильным контуром Γ_1 с немонахроматическим спектром (рис. 3, b), целесообразно ввести количественную меру степени превалирования компоненты $\rho(1)$ над другими компонентами спектра.

В качестве такой меры примем коэффициент $M = |\rho(1)|/|\rho(m_0)|$, определяемый в виде отношения модуля составляющей $\rho(1)$ к модулю наиболее интенсивной составляющей в оставшейся части спектра k -угольника. Наиболее распространены ВС, у которых обычно коэффициент монохроматичности формы (КМФ) M меньше единицы. На рис. 3, c показан примерный вид гистограммы распределения значений M . Площадь распределения сосредоточена в основном в области значений M , не превышающих единицы. Только некоторые, претендующие на уникальность ВС будут иметь величины, обозначенные буквами A , B и C . В области этих значений M наблюдается наличие обширных «мертвых зон» d_A , d_{AB} и d_{BC} , в которых отсчеты КМФ каких-либо ВС отсутствуют.

4. Результаты экспериментальных исследований по поиску и распознаванию уникальных вторичных созвездий. В качестве ориентиров в условиях априорной неопределенности их расположения в заданной области небесной полусферы или всей сферы выберем уникальные вторичные созвездия (УВС) с особыми по сравнению со всеми другими ВС свойствами формы. При поиске УВС накладываются ограничения на размерность k его контура, величину стереоугла θ и диапазон светимости звезд до четвертой звездной величины. УВС имеет максимальное значение КМФ M_y . В качестве количественных характеристик уникальности ВС на основании введенного КМФ M примем величины $q = M_y/\sigma$ и $p = M_y/d$. Здесь σ – среднее квадратическое отклонение КМФ, вычисленное по всем рассмотренным в процессе поиска ВС, d – ширина «мертвой зоны» между значением M_y и ближайшим к нему. Величина q является статистической характеристикой уникальности ВС, характеризую степень аномальности значения M_y для выборки КМФ всех ВС. Величина p детерминированно определяет ширину «мертвой зоны» вокруг M_y , т. е. степень изолированности этого параметра. Как следует из

Таблица 1

Уникальные вторичные созвездия Северного полушария небесной сферы

УВС	Состав	k	θ , град	M	d	q	p
МарГТУ 3/1	ζ , σ , α Геркулеса	3	20	503,8	208,5	70,3	2,4
« 3/2	ζ Лебеда, α М. Медведицы, α Треугольника	3	60	2205,8	927,6	381,3	2,37
« 4/1	β Волопаса, τ , ζ Геркулеса, α Сев. Короны	4	40	146,8	100,8	206,4	1,45

экспериментальных данных, для уверенного распознавания УВС на фоне остальных ВС необходимо, чтобы

$$q > 10, \quad p < 3. \quad (5)$$

Явление уникальной монохроматичности формы ВС проверялось на множестве из 519 звезд со светимостью от $-1,5m$ до $4m$ звездной величины, взятых из каталога [9] в экваториальной системе координат. Упорядочивание светил по критерию максимума расстояния при построении графа «минимального дерева» показало, что максимальный угловой размер ребра графа не превышает 23° , причем угловые размеры ребер практически не превышают 12° . Поэтому при стереоугле $\theta = 20^\circ$ в телевизионном кадре с высокой вероятностью будут находиться компактные группы звезд, причем среднее количество звезд в кадре порядка 40. Данного количества звезд достаточно как для проявления с высокой вероятностью монохроматичности формы ВС и возможности обеспечения высокой точности определения угловых координат звезд в кадре, хранящемся в ОЗУ видеопроцессора, так и для получения разумных значений времени поиска УВС. Поэтому минимальный размер стереоугла, в пределах которого проводился поиск УВС, был выбран равным $\theta = 20^\circ$. Кроме того, учитывались результаты и при $\theta = 40$ и 60° . ВС с уникальной монохроматичностью формы условно названы созвездиями МарГТУ [10, 11]. Название также содержит числовую часть в виде дроби, числитель которой равен размерности k , а знаменатель – порядковому номеру УВС. В табл. 1, 2 приводятся экспериментальные данные, подтверждающие существование УВС в соответствии с условиями (5). На рис. 4 представлены изображения данных УВС.

Таблица 2

Уникальные вторичные созвездия Южного полушария небесной сферы

УВС	Состав	k	θ , град	M	d	q	p
МарГТУ 3/3	δ Голубя, α Киля, HD 64440 Кормы	3	20	1405,3	1227,4	169,0	1,14
« 3/4	υ Весов, σ Центавра, η Павлина	3	60	2915,6	1510,1	563,2	1,93
« 4/2	HD 94510 Киля, ω Киля, γ Мухи, ϵ Юж. Креста	4	20	33,6	13,9	50	2,4

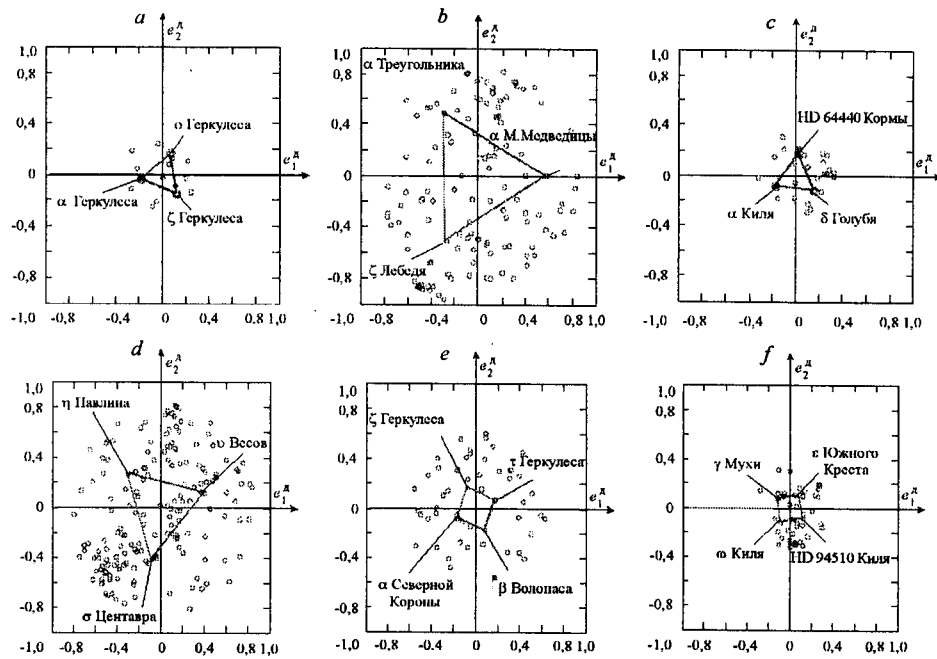


Рис. 4. Изображения вторичных созвездий с уникальной монохроматичностью формы: МарГТУ 3/1 (a), 3/2 (b), 3/3 (c), 3/4 (d), 4/1 (e), 4/2 (f)

Несмотря на огромное количество форм (порядка $2 \cdot 10^7$), образуемых ВС различной размерности, количество УВС равно всего лишь шести, т. е. составляет миллионные доли процента. При этом они имеют очень низкую размерность. Интерпретация формы изображения в виде одной из разновидностей сигнала позволяет рассматривать форму УВС как сигнал с высокой степенью помехоустойчивости.

5. Идентификация звезд в составе УВС. Как показано выше, форма оптимального для распознавания ВС должна задаваться правильным k -угольником. Эти фигуры обладают поворотной симметрией. Поэтому однозначно определить угол поворота и сдвиг начальной точки одного k -угольника относительно другого невозможно. Сохраняется лишь положение центра фигуры. На рис. 5 поясняется процесс ориентации ЛА по изображению УВС 123,

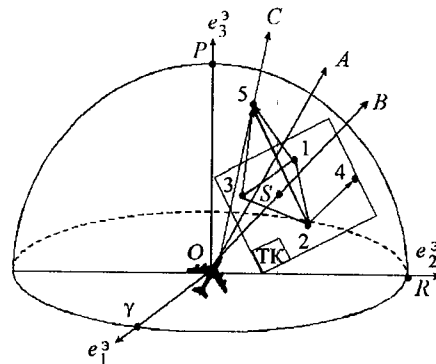


Рис. 5. Ориентация летательного аппарата по УВС

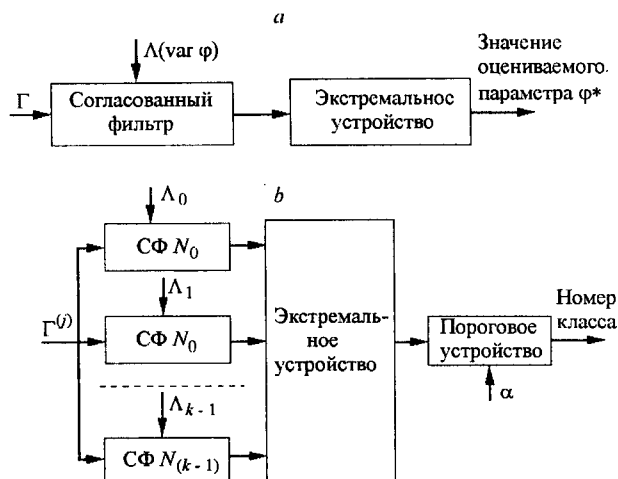


Рис. 6. Структуры устройств оптимальной по критерию максимальной близости обработки сигналов: *a* – оценки параметров, *b* – распознавания

находящегося в пределах телевизионного кадра (ТК). Летательный аппарат находится в точке O – начале отсчета в экваториальной системе координат. Оптическая ось астродатчика направлена по линии OA , причем ее угловые координаты неизвестны. Необходимо переориентировать ее в направлении OC , на котором находится звезда 5. Если было бы известно соответствие звезд 1–3 звездам в машинном кадре, то с помощью векторов 1,5 и 3,5 возможно определение звезды 5 и задание направления ориентации ЛА. Однако так как угол поворота правильного треугольника известен с точностью $\pm 120^\circ$, то однозначная ориентация становится невозможной. Единственно полезная информация по результатам распознавания УВС заключается в возможности определения угла между осью астродатчика OA и линией визирования OB центра УВС.

Таким образом, кроме распознавания УВС необходима процедура идентификации входящих в его состав звезд. Выполнить ее по результатам распознавания невозможно. Данная ситуация является следствием некорректности постановки задачи оптимального распознавания и оценки параметров при использовании одного и того же сигнала [12]. На рис. 6 представлены структуры устройства оптимальной по методу максимального правдоподобия оценки параметров и устройства распознавания сигналов в виде векторов размерности k из алфавита объемом k , оптимальных по критерию максимальной близости к эталону. Фильтр (СФ – согласованный фильтр) первого из них согласован с точностью до оцениваемого параметра φ с эталонным сигналом Λ . На вход фильтра поступает зашумленный сигнал Γ , параметр φ которого следует оценить. Для этого происходит варьирование параметра φ эталонного сигнала Λ и образование меры схожести сигналов Γ и Λ . Экстремальное устройство фиксирует, при каком значении варьируемого параметра φ достигается пиковый выходной сигнал фильтра, и выдает это значение в качестве оценки параметра φ^* сигнала Γ . Чем уже АКФ $\eta(n)$ эталонного сигнала по оцениваемому параметру φ , тем точнее фиксируется момент появления пикового сигнала на выходе. Поэтому оптимальный для оценки параметров сигнал должен иметь дельтовидную АКФ и, следовательно, равномерный амплитудный спектр (рис. 7, *a*).

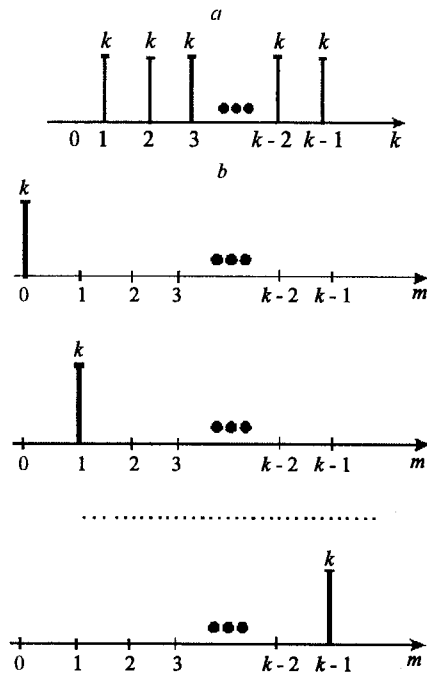


Рис. 7. Амплитудные спектры сигналов, эффективных для оценки параметров (а) и распознавания (б)

Совершенно противоположным требованиям удовлетворяет оптимальный сигнал из алфавита объемом k при распознавании по критерию максимальной близости к эталонному [13]. Каждый сигнал из такого алфавита должен иметь монохроматический спектр, причем ненулевые компоненты этого спектра расположены на разных частотах. Все сигналы алфавита задаются взаимно ортогональными векторами, т. е. максимально отличны друг от друга (рис. 7, б). Базовым элементом устройства является согласованный фильтр (см. рис. 6, б). Каждый v -й канал устройства содержит фильтр, согласованный с эталонным сигналом Λ_v v -го класса, $v=0,1,\dots$

$\dots, k-1$. Экстремальное устройство определяет номер фильтра с пиковым выходным сигналом, а пороговое – сравнивает его с порогом α .

Таким образом, сигнал, одновременно оптимальный для решения задач оценки параметров и разрешения, должен обладать противоречивыми свойствами: иметь одновременно максимально узкий и максимально широкий спектры (максимально широкую и максимально узкую АКФ). Если потери в эффективности решения каждой из задач недопустимы, то необходимо использовать разные сигналы: один с дельтовидным спектром – для распознавания, другой с дельтовидной АКФ – для оценки параметров (в нашем случае для идентификации звезд в распознанном УВС). Поскольку вначале решается задача распознавания, то ее результаты должны быть использованы для идентификации звезд. В итоге приходим к композиционному сигналу: весь сигнал имеет дельтовидную АКФ и позволяет эффективно произвести оценку параметров, а составные части этого сигнала, имеющие дельтовидный спектр, эффективны для решения задачи распознавания.

Вторичное созвездие на базе УВС, форма которого характеризуется дельтовидной АКФ (равномерным спектром), назовем уникальным композиционным ВС (УКВС). Желательно, чтобы УКВС включало минимальное по отношению к базовому УВС дополнительное количество звезд (в идеале только одну). В качестве контура, определяющего его форму при $k=3$, выберем векторную диаграмму многофазного линейно-частотно-модулированного сигнала третьего порядка. Аргументы ЭВ его контура Γ задаются выражением [14] $\varphi(n) = \frac{\pi}{k}(n^2 + n)$, $n=0,1,\dots,k-1$. Такие контуры, как и композицион-

ные контуры, рассмотренные в [13], обладают характеристиками, нужными для оценки угла поворота распознаваемого УВС по отношению к УВС в бор-

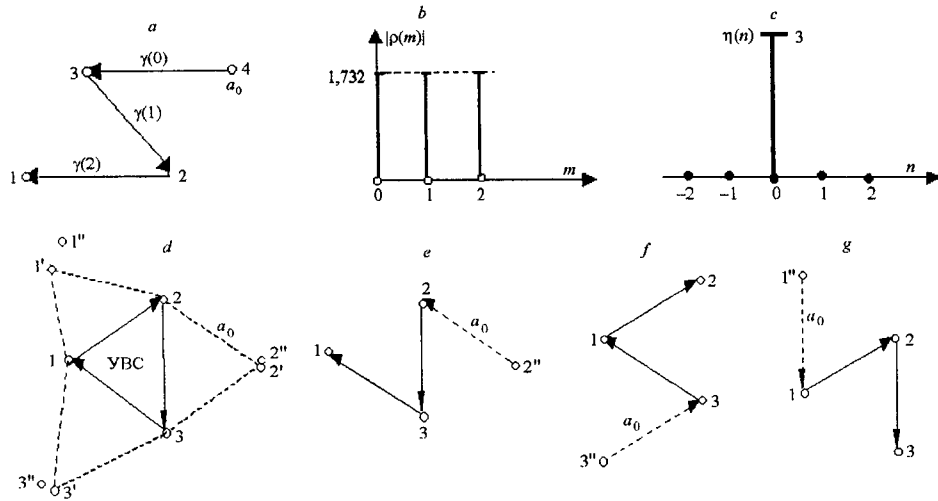


Рис. 8. Контур УКВС при $k = 3$: a – вид контура, b – амплитудный спектр, c – АКФ, d – g – возможные вторичные созвездия для выбора УКВС

товом каталоге. При $k = 3$ контур и его спектр соответственно равны $\Gamma = \{-1; 0,5 - 0,866i; -1\}$; $P = \{-1,5 - 0,866i; -1,5 - 0,866i; 1,732i\}$ (рис. 8, a – c).

Существование УКВС обусловлено действием следующих факторов: 1) наличием УВС, 2) присутствием четвертой звезды, образующей с заданной точностью контур с необходимыми свойствами, и 3) отсутствием других звезд, образующих со звездами того же УВС с близкой точностью контур с аналогичными свойствами. Рассмотрим методику идентификации вершин УВС с $k = 3$, образующего на сфере квазиправильный сферический треугольник 1–3 (рис. 8, d – g). Образует три правильных сферических треугольника 121', 232', 313', каждый из которых включает одну из сторон треугольника УВС. Для каждой из вершин 1', 2', 3' этих треугольников найдем ближайшие по угловому расстоянию звезды. ВС, задаваемые контурами 2''231 (см. рис. 8, e), 3''312 (f) и 1''123 (g), а также с не показанными на рис. 8 контурами 1322'', 2313'' и 3121'', являются кандидатами в качестве УКВС.

Для оценки степени дельтовидности АКФ контура УКВС введем коэффициент дельтовидности АКФ формы (КДФ) контура как отношение модуля

Т а б л и ц а 3

Уникальные композиционные вторичные созвездия

УВС	Состав	КДФ
МарГТУ 3/1	γ Змеи, ζ , \omicron , α Геркулеса	162,5
« 3/2	ϵ Близнецов, α Треугольника, α М. Медведицы, ζ Лебеда	9,8
« 3/3	ϵ , α Киля, HD 64440 Кормы, δ Голубя	50,1
« 3/4	γ_2 Рыбы, σ Центавра, η Павлина, υ Весов	117,6
« 4/1	θ , ζ , τ Геркулеса, β Волопаса, α Сев. Короны	311,8
« 4/2	σ Центавра, ϵ Юж. Креста, γ Мухи, ω и HD 94510 Киля	36,3

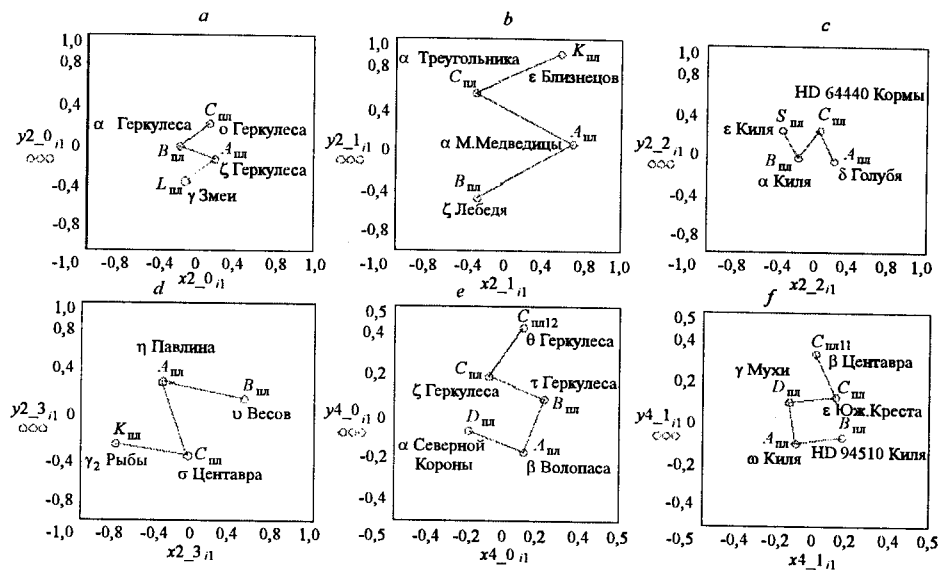


Рис. 9. Изображения УКВС

отсчета циклической АКФ к модулю максимального бокового отсчета АКФ: $V = |\eta(0)| / \max[|\eta(1), \eta(2)|]$.

После выбора контура с максимальным КДФ порядок чередования вершин УКВС однозначно идентифицирует все вершины УКВС. Данная методика может быть использована для получения УКВС (если они существуют) на базе УВС произвольных размерностей. В табл. 3 приведены экспериментально полученные УКВС для ранее найденных УВС, а на рис. 9 показаны их изображения.

Заключение. Объединение ряда звезд в созвездия является, по-видимому, одной из первых решенных специалистами классификационных задач. Задача ориентации летательного аппарата в условиях неопределенности углового положения оптической оси его астродатчика, характерная для нестандартных на его борту ситуаций, выдвигает новый набор признаков для объединения ряда звезд в созвездия.

В теоретическом плане данная работа имеет две особенности. Первая заключается в том, что в качестве практически полезного сигнала рассматривается такая сущность, как форма точечного изображения. Вторая состоит в том, что показана некорректность постановки задачи оптимального распознавания формы и оценки параметров задаваемого ею контура по одному и тому же сигналу и рассмотрены с учетом этого пути решения поставленных задач.

Что касается самого объекта обработки, то необходимо отметить, что точечная сцена звездного неба слабо исследована с позиций задач обработки изображений, хотя в этом плане имеется целый ряд практически полезных задач.

Основной результат данной статьи заключается в том, что в качестве ориентиров, оптимизирующих работу системы ориентации ЛА в условиях полного отсутствия априорной информации об их расположении, предложены шесть уникальных вторичных созвездий МарГТУЗ/1, 3/2, 3/3, 3/4, 4/1 и 4/2 и связанные с ними уникальные композиционные вторичные созвездия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кочетков В. И. Системы астрономической ориентации космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1980.
2. Бурый А. С., Михайлов С. Н. Методы идентификации астроориентиров в задачах ориентации и навигации космического аппарата по изображениям звездного неба // Зарубеж. радиоэлектрон. 1994. № 7–8. С. 44.
3. Анисимов В. Б., Курганов В. Д., Злобин В. К. Распознавание и цифровая обработка изображений: Учеб. пособие для студентов вузов. М.: Высш. шк., 1983.
4. Белоглазов И. Н., Тарасенко В. П. Корреляционно-экстремальные системы. М.: Сов. радио, 1974.
5. Кревецкий А. В. Обработка изображений в системах ориентации летательных аппаратов: Учеб. пособие. Йошкар-Ола: МарГТУ, 1998.
6. Фурман Я. А. О понятии формы плоского изображения // Автометрия. 1992. № 5. С. 113.
7. Фурман Я. А. О двух замечательных видах замкнутых контуров изображений // Радиотехника и электроника. 1993. № 6. С. 1054.
8. Егошина И. Л., Михайлов А. И., Фурман Я. А. Оценка степени сходства двух плоских форм // Автометрия. 1995. № 4. С. 19.
9. Астрономический календарь /Под ред. О. С. Угольникова. М.: Звездочет, 1998.
10. Фурман Я. А., Смирнов Д. Л., Роженцов А. А., Леухин А. Н. Уникальные звездные образования на небесной сфере северного полушария. Йошкар-Ола: МарГТУ, 1998. Деп. в ВИНТИ 29.12.98. № 3803-В98.
11. Фурман Я. А. Микромир форм изображений // Природа. 1999. № 4. С. 64.
12. Фурман Я. А., Смирнов Д. Л., Роженцов А. А., Леухин А. Н. Некорректность задачи поиска ориентиров оптимальной формы и пути перехода к корректной задаче // Телекоммуникационно-информационные системы: Материалы Всерос. научн. конф. Йошкар-Ола: МарГТУ, 1998. С. 63.
13. Фурман Я. А. Основы теории обработки контуров изображений: Учеб. пособие для вузов. Йошкар-Ола: Изд-во МарГТУ, 1998.
14. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985.

*Марийский государственный
технический университет,
E-mail: rts@marstu.mari.ru*

*Поступила в редакцию
14 февраля 2000 г.*