

# ПРИРОДА

№ 4 - 1999 г.

**Я.А. Фурман**

## **Микромир форм изображений**

© Природа

*Использование или распространение этого материала  
в коммерческих целях  
возможно лишь с разрешения редакции*



Образовательный сетевой выпуск  
**VIVOS VOCO! - ЗОВУ ЖИВЫХ!**

<http://www.techno.ru/vivovoco>

# Микромир форм изображений

Я. А. Фурман

*Яков Абрамович Фурман, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехнических систем Марийского государственного технического университета (Йошкар-Ола). Область научных интересов — цифровая обработка сигналов и изображений, системы искусственного интеллекта. Автор более 60 статей и двух монографий.*

**М**ИР, в котором мы живем, наполнен объектами самых разнообразных форм — яркими точками звезд, диском восходящего солнца, извилистой лесной тропинкой, летящим реактивным лайнером, изящным профилем Нефертити. С раннего детства мы хорошо ориентируемся в нем, узнаем и восхищаемся одними формами, расстраиваемся и огорчаемся из-за других, не испытываем интереса к третьим.

Как только появилась возможность использовать вычислительные машины для визуального восприятия объектов, инженеры столкнулись с массой сложных задач, многие из которых пока далеки от решения. Попытки справиться с ними дали новые научные результаты, нашедшие применение не только в области обработки изображений.

## ДОРОГА В МИКРОМИР ФОРМ

Основная проблема, связанная с созданием интеллектуальных систем технического зрения, заключается в необходимости обработки огромных объемов данных, что затрудняет получение результатов в реальном масштабе времени, т.е. в темпе поступления визуальной информации. Изображение хранится в виде мозаики, причем количество зерен (пикселей) мозаики достигает  $10^6$  и даже более. Если предположить, что над каждым пикселем следует выполнить 100 операций, каждая из которых займет 100 тактов, то общее количество машинных тактов, необходимых для обработки одного кадра, будет  $10^{10}$ . При скорости принятия решения по одному кадру в 0.1 с требуемая тактовая частота ви-

деопроецессора составит более 100 ГГц, что абсолютно нереально для нынешнего уровня массовой вычислительной техники.

Такая высокая производительность видеопроецессора вызвана не только большим числом обрабатываемых пикселей кадра. Мы воспринимаем изображение объекта независимо от его положения в кадре, ракурса и масштаба, как говорят, инвариантно к параметрам преобразования переноса, поворота и масштабирования. Машина же формирует математическое описание изображения объекта в зависимости от этих параметров, и необходимы значительные ресурсы машинного времени для получения такого описания в стандартном нормированном виде.

По мнению некоторых специалистов, современный этап развития систем машинного зрения характеризуется разработкой преимущественно специализированных алгоритмов и систем для конкретных задач при отсутствии общих принципов и методологии. Отмечается заметное снижение энтузиазма исследователей в отношении этих систем; более того, часто утверждают, что машинное зрение не имеет, в полном смысле этого слова, научной основы из-за широкого применения слабо проверенных методов.

В связи с этим представляют интерес подходы, базирующиеся на строгих теоретических проработках и обеспечивающие заметный практический эффект. Один такой подход основан на отказе от обработки каждого пиксела изображения и переходе к обработке только небольшой части тех из них, которые наиболее информативны. Связанные с этим потери должны быть незначительными для широкого класса изображений и могут компенсироваться выигрышем от снижения общего количества требуемых операций.

Концентраторами информации в изображении, слабо зависящей от цвета и яркости, являются его контурные

точки. Контурные как совокупность отрезков линий, задающих границы изображений, привлекли внимание специалистов уже в самом начале исследований. Интерес к ним вызван целым рядом причин, из которых главные — значительное уменьшение требуемого объема обрабатываемой информации за счет того, что контурные составляют небольшую часть всех точек изображения, и возможность создания методов обработки контуров, инвариантных к преобразованиям переноса, поворота и масштабирования.

Контурные задают форму изображений, а также их масштабы и углы поворотов. Обработка контуров и распознавание изображений по их форме характерны для начальной стадии обычного зрительного восприятия. Данный факт косвенно подтверждает целесообразность выбранного пути к созданию систем технического зрения, работающих в реальном масштабе времени, который в свое время был пройден природой при формировании зрительных рецепторов и алгоритмов обработки изображений мозгом человека.

Отметим, что подобный подход не применим к изображениям с большим количеством значимых деталей, т.е. имеющим сложную внутреннюю структуру. Трудоемкость обработки внешних и внутренних контуров этих деталей может превысить таковую при поточечной обработке из-за необходимости учета пространственной взаимосвязи контуров.

Можно констатировать, что в настоящее время завершено прохождение первого витка спирали от контура как типичного абстрактного математического объекта к вполне реальному объекту, задающему форму изображения, и далее снова к абстрактному объекту в виде особого сигнала, обработка которого в принципе не требует привлечения эвристических методов. В последнем случае контурные начинают играть самостоятельную роль, дополняя давно су-

шествующую и хорошо развитую теорию сигналов эффективными подходами из теории обработки изображений<sup>1</sup>.

#### “АТОМЫ” ФОРМЫ

Форму изображения, задаваемую контуром, можно представить как сигнал, т.е. как некоторую функцию, содержащую информацию о самой форме, и в то же время как абстрактный математический объект, который можно преобразовывать аналитическим путем<sup>2</sup>. Очень часто сигнал рассматривается как вектор, и преобразования сигнала связаны с преобразованием векторов. Эти преобразования состоят в переходе от задания вектора в одной системе отсчета (системе координат) к заданию в другой. Выбор той или иной системы координат направлен на наилучшее выявление интересующих нас искомым свойством сигнала. Проекция вектора сигнала на оси системы координат, которые выбираются ортогональными друг другу, называются спектром сигнала и дают возможность выяснить его внутреннюю структуру.

Кроме известной со школьных времен декартовой системы координат с осями в виде прямых линий в теории сигналов применяются и другие системы, “осями” в которых являются более сложные, чем линейные, функции, называемые базисными. Широко используются в качестве базисных функций синусоиды с кратными значениями своих периодов. Такой базис известен как базис Фурье.

Взятые с различными весовыми соотношениями базисные функции образуют интересующий нас конкретный сигнал. Весами в такой комбинации служат составляющие спектра сигнала. Таким образом, базисные

функции представляют собой набор простейших сигналов, создающих в совокупности (в зависимости от вида спектра) исходный сигнал.

Если выбрать базис Фурье, то любой произвольный контур может быть составлен из правильных многоугольников<sup>3</sup>. Число сторон многоугольников равно размерности  $k$  контура, т.е. числу отрезков, образующих этот контур. Такие многоугольники называют элементарными контурами<sup>4</sup>. На рис.1 приведены семейства элементарных контуров  $\Gamma$  размерностью от четырех до семи. Все многоугольники элементарных контуров состоят из одинаковых по величине элементарных векторов. В пределах одного семейства элементарные контуры различаются своим порядком — от нулевого до  $k-1$  (на рисунке порядок указан цифрой нижнего индекса в обозначении контура). В каждом из них последующий элементарный вектор повернут относительно предыдущего на один и тот же угол, и векторы периодически занимают исходную позицию.

Исключением являются контуры нулевого порядка  $\Gamma_0$ : составляющие их векторы не повернуты относительно друг друга, и поэтому такие контуры представляют собой вытянутую в одну прямую линию цепочку векторов. Элементарные контуры всех остальных порядков — замкнутые фигуры. Контур первого и последнего, т.е.  $k-1$ , порядков имеют вид правильных выпуклых  $k$ -угольников и отличаются направлением составляющих их элементарных векторов. Затем следуют контуры в виде правильных звездчатых многоугольников.

Среди элементарных контуров встречаются вложенные друг в друга многоугольники (например,  $\Gamma_2$  для  $k=6$ ) и вырожденные многоугольники (напри-

<sup>1</sup> Фурман Я.А. Основы теории обработки контуров изображений: Учебное пособие для вузов. Йошкар-Ола, 1997.

<sup>2</sup> Фурман Я.А. // Автометрия. 1992. № 5. С.113-120.

<sup>3</sup> Бахман Ф., Шмидт Р. N-угольники. М., 1973; Furman Ya.A., Yanshin V.V. // Pattern Recognition and Image Analysis. 1994. V.4. № 2. P.146-166.

<sup>4</sup> Фурман Я.А. // ЭЭ. 1993. Т.38. № 6. С.1054-1061.

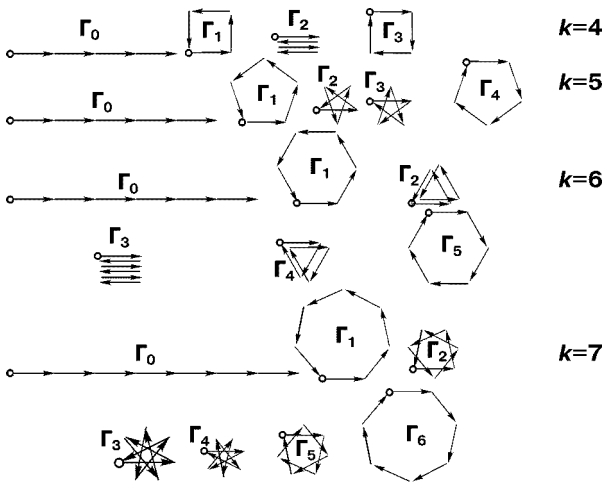


Рис.1. Семейства элементарных контуров ("атомов" формы) с размерностями  $k=4, 5, 6, 7$ .

мер,  $\Gamma_2$  для  $k=4$  и  $\Gamma_3$  для  $k=6$ ). В последних угол поворота между соседними элементарными векторами равен  $180^\circ$ , поэтому векторы попарно направлены друг против друга и меняют каждый раз свое направление на противоположное.

Важным свойством элементарных контуров является "монохроматичность" их спектра. Спектр такого контура состоит из одной не равной нулю составляющей на "частоте", равной порядку контура.

На рис.2 показана фигура в виде замкнутого неправильного пятиугольника и приведены элементарные контуры (их можно назвать "атомами" формы), из которых построена эта фигура. Элементарные контуры  $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4$  взяты с весами  $\rho(1), \rho(2), \rho(3), \rho(4)$ , равными составляющим спектра Фурье контура  $\Gamma$ . На этом рисунке через  $\gamma_m(n)$  обозначены  $n$ -е элементарные векторы элементарных контуров порядка  $m$ . Например,  $\gamma_2(3)$  — это второй элементарный вектор контура третьего порядка. Фигура  $\Gamma$  состоит только из четырех элементарных контуров.

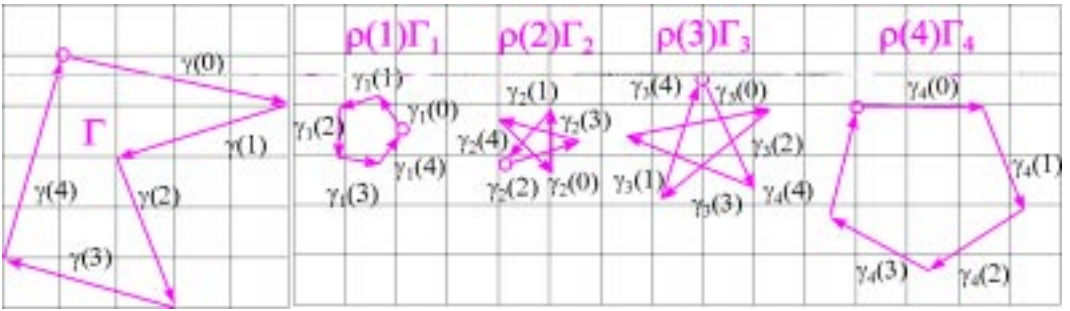
Следующий рисунок поясняет, каким образом из контуров  $\rho(1)\Gamma_1, \rho(2)\Gamma_2, \rho(3)\Gamma_3, \rho(4)\Gamma_4$  образуется фигура  $\Gamma$ . Для получения ее элементарного вектора складываются соответствующие элементарные векторы перечисленных выше

контуров. Например, для формирования элементарного вектора  $\gamma(0)$  производится сложение элементарных векторов  $\gamma_1(0), \gamma_2(0), \gamma_3(0), \gamma_4(0)$ .

Таким образом, форма контура изображения определяется его спектром и набором элементарных контуров. Если какие-либо спектральные компоненты подавлены по сравнению с другими, то соответствующие им элементарные контуры при составлении контура изображения будут иметь малые размеры и окажут незначительное влияние на общую форму. Когда контур изображения имеет плавные очертания, в нем преобладают правильные выпуклые многоугольники. Если же форма имеет угловатый, сильно изрезанный вид, то в контуре преобладают звездчатые многоугольники.

КОНСТРУКЦИИ ИЗ "АТОМОВ" ФОРМЫ

Визуально различимые символы, используемые для передачи сообщений — буквы, цифры и другие знаки, — формировались в течение длительного времени эвристически. Освоение проводного и радиоканалов в результате технологий последних десятилетий на основе разных научных подходов (теория статистических решений и др.) позволило создать оптимальные с по-



**Рис.2.** Фигура многоугольника и составляющие его элементарные контуры.

зийши заданных критериев качества устройства передачи и обработки информации. Таким критерием относительно качества букв, цифр и других знаков служит критерий совместного наилучшего разрешения (отделения) символов и наилучшего распознавания каждого из них в заданном алфавите.

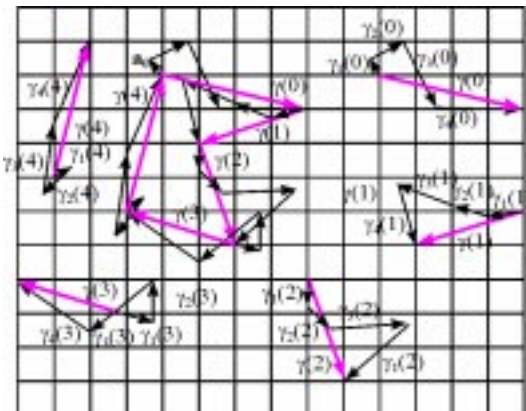
Отметим, что требования к сигналам для решения каждой из упомянутых задач противоречивы. Для достоверного распознавания спектры Фурье каждого из символов алфавита не должны содержать общих составляющих. В этом плане визуальные символы должны иметь вид элементарных контуров, взятых из одного семейства (рис.4).

Данные символы максимально не похожи друг на друга и при наличии

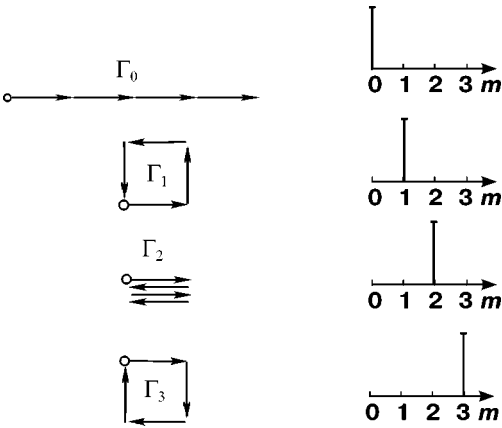
помех распознаются надежнее, чем применяемые на практике визуальные символы. Что же касается задачи разрешения перекрывающихся символов, то здесь наиболее эффективными будут те, которые имеют абсолютно равномерный спектр. С этих позиций алфавит символов в виде элементарных контуров будет обладать наилучшими свойствами.

Подойти к созданию алфавита визуальных символов со столь противоречивыми свойствами можно, например, используя композиционные контуры. Такой контур получается в результате соединения друг с другом всех элементарных контуров одного семейства (рис.5), причем каждый элементарный контур участвует в композиции только один раз, но встречаться может в разной последовательности с другими. Различных комбинаций (в комбинаторике их называют перестановками) набирается  $k!$  штук. Некоторые комбинации при этом обладают уникальным свойством: их спектры оказываются абсолютно равномерными. Спектральный анализ контуров показывает, что таких композиций будет  $\varepsilon \cdot k$  штук, где  $\varepsilon$  — количество целых чисел, меньших размерности контура  $k$  и взаимно простых с  $k$  (т.е. не имеющих общих делителей).

Алфавит из таких контуров обладает максимально возможной разрешающей способностью и высокой эффек-



**Рис.3.** Синтез контура Γ и его элементарных векторов.



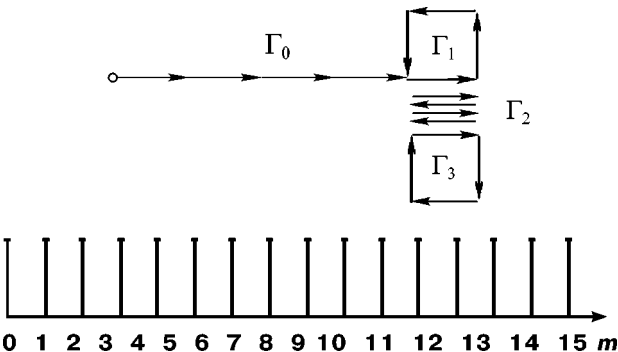
**Рис. 4. Семейство элементарных контуров размерности четыре и их спектры.**

тивностью при распознавании. Последнее свойство объясняется тем, что композиционный контур скомпонован из элементарных контуров. Для получения алфавита приличного размера достаточно выбрать композиционные контуры, составленные из элементарных контуров размерности девять. В этом случае из 362880 возможных перестановок 54 композиционных контура будут иметь равномерный спектр (поскольку с числом 9 взаимнопросто числа 1, 2, 4, 5, 7, 8 – их шесть, а  $6 \cdot 9=54$ ) и дадут высокую эффективность как при разрешении, так и при распознавании сигналов.

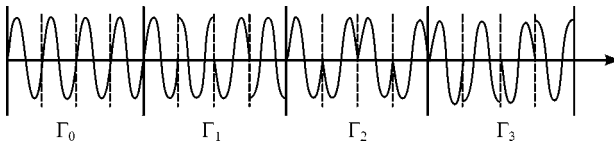
Сигналы подобного типа могут успешно использоваться в системах связи и радиолокации. Применяемые

для обнаружения, разрешения и других радиолокационных задач сигналы были предложены и изучены в 50–60-х годах; в этот же период сложились алгоритмы их обработки. Появление на современном этапе принципиально новых видов сигналов и методов их обработки – в общем-то редкое событие. Основное внимание разработчиков направлено на реализацию уже известных видов сигналов, оценку их эффективности при воздействии помех, развитие цифровых методов обработки, обеспечивающих функционирование аппаратуры в реальном и близком к нему масштабе времени, а также на выбор сигнала для совместного решения нескольких задач и т.п.

Среди широко используемых радиолокационных сигналов следует в первую очередь отметить так называемые сложные. Это энергоемкие сигналы, обладающие повышенной разрешающей способностью в случаях, когда несколько отраженных от цели сигналов перекрываются. При приеме они сжимаются по длительности, и в результате каждой из близко расположенных друг относительно друга целей соответствует эхо-сигнал, не перекрывающийся с другими. Неидеальность процедуры сжатия принятого сигнала проявляется в том, что кроме его плавного, пикового, лепестка имеется еще целый ряд побочных отсчетов, образующих так называемый корреляционный шум. Если близко расположенные цели характеризуются похожими отражающи-



**Рис. 5. Композиционный контур из полного семейства элементарных контуров размерности четыре (каждый следующий элементарный контур присоединяется к концу предыдущего) и его спектр.**



**Рис. 6.** Сложный радиолокационный сигнал, полученный на основе композиционного контура, показанного на рис.5.

ми свойствами, корреляционный шум не оказывает большого отрицательного влияния. Однако в реальных случаях часто бывает необходимо обнаружить слабоотражающую цель на фоне недалеко расположенной цели с интенсивным отражением. Тогда сигнал от слабой цели маскируется боковыми лепестками от сильной, и поэтому использование традиционных сложных сигналов неоправдано. Сложные радиолокационные сигналы могут быть получены по-другому – на базе композиционных контуров. В этом случае каждый элементарный вектор контура кодирует определенный участок синусоидального сигнала: длина вектора задает амплитуду, а его аргумент – начальную фазу отрезка синусоиды (рис.6).

В отличие от известных и применяемых сложных сигналов код данного сигнала, заданный композиционным контуром на базе полного семейства элементарных контуров, имеет абсолютно равномерный спектр. Поэтому данный сигнал допускает идеальное сжатие и обеспечивает значительно более высокую разрешающую способность при приеме слабых сигналов на фоне сильных, чем привычные сложные сигналы<sup>5</sup>.

Благодаря тому, что композиционные контуры образуют многоэлементные алфавиты эффективно распознаваемых сигналов, становится реальным создание радиолокационных станций с более широкими возможностями, чем существующие. Такие станции в каждом периоде излучения вырабатывают новый

сигнал и при приеме эффективно распознают его. В результате расширяется диапазон однозначно измеряемых расстояний, повышается помехоустойчивость и скрытность работы станции, улучшается электромагнитная совместимость с другими близко расположенными станциями.

#### “АТОМЫ” ФОРМ В КОСМОСЕ

Задача ориентации летательного аппарата решается путем обработки сигналов, получаемых от ориентиров. Однако в отличие от других информационных систем систему ориентации нельзя оптимизировать по входному сигналу, так как форма ориентира как природного объекта от нас не зависит. Поэтому подобная система обработки сигналов имеет меньшую эффективность, чем, например, радиолокационная, сигналы для которой могут быть выбраны наилучшим образом в соответствии с заданным критерием качества.

Оптимальный сигнал для системы ориентации по данным радиолокационной станции может быть получен, если отражатели расположить на земной поверхности в вершинах многоугольника, составляющего композиционный контур.

При ориентации летательного аппарата может быть поставлена задача выбора группы звезд, образующих вершины фигуры заданной формы, – созвездий, но не обязательно совпадающих с общепринятыми. Если первоначальный этап задачи ориентации заключается в правильном распознавании с очень высокой вероятностью данного эталонного созвездия на фоне других созвездий с таким же количеством

<sup>5</sup> Фурман Я.А., Роженцов А.А., Леухин А.Н. // Вестн. Верхне-Волжского отделения АПН. Сер. “Высокие технологии в радиоэлектрон., информатике и связи”. 1998. № 1(5). С.19–26.



## Таблица

**Вторичные созвездия, удобные для использования в качестве ориентиров для летательных аппаратов**

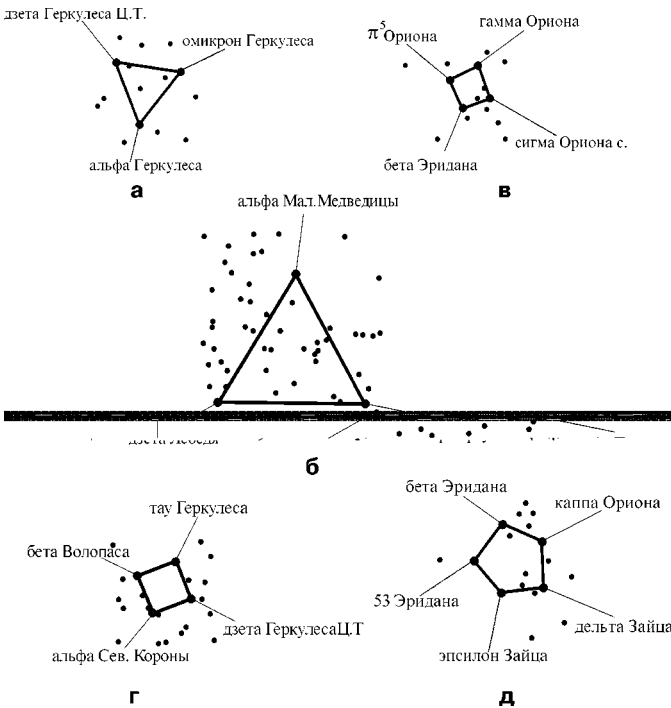
Название	Состав созвездия	Кол-во звезд	Координаты центра	Диаметр	$M$
МарГТУ 3/1	альфа Геркулеса пр., дзета Геркулеса ЦГ, омикрон Геркулеса	3	17 ч 20'50" 25° 14'49"	21.8°	500.6
МарГТУ 3/2	альфа Малой Медведицы, альфа Треугольника, дзета Лебеда	3	23 ч 34'28" 54° 21'16"	70.2°	2215.8
МарГТУ 4/1	бета Эридана, $\pi^3$ Ориона, сигма Ориона С, гамма Ориона	4	5 ч 15'57" 0° 37'6"	12.2°	41.5
МарГТУ 4/2	альфа Северной Короны, бета Волопаса, тау Геркулеса, дзета Геркулеса	4	15 ч 53'9" 36° 40'24"	21.9°	146.01
МарГТУ 5/1	эпсилон Зайца, 53 Эридана, бета Эридана, каппа Ориона, дельта Зайца	5	5 ч 17'37" 13° 37'28"	19.4°	14.6

звезд, то форма этого созвездия должна задавать элементарный контур, т.е. быть атомом формы. Элементарные контуры характеризуются только одной ненулевой спектральной линией, и поэтому система ориентации, настроенная на такой контур, будет обладать высокой избирательностью по отношению к другим созвездиям. Серьезными помехами в данном случае могут быть лишь другие созвездия, образующие элементарные контуры той же размерности. Прочие имеют с высокой вероятностью спектр из большого числа спектральных линий, т.е. "размазаны" в широком "частотном" диапазоне. При чем чем выше размерность многоугольника, задающего созвездие, тем меньше информации несет в среднем одна спектральная линия его формы.

Принятие решения при распознавании будем производить по величине  $M$ , которая есть отношение амплитуд спектральной линии на "частоте", равной порядку элементарного контура, и самой интенсивной спектральной линии из оставшейся части спектра. Для созвездия, точно задающего элементар-

ный контур, величина  $M$  равна бесконечности; для всех остальных групп звезд, объединяемых в созвездия,  $M$  будет небольшой, редко превышающей несколько единиц. Очевидно, что на небесной сфере при поиске среди звезд, светимость которых превышает некоторый пороговый уровень, не найдется звезд, абсолютно точно расположенных в вершинах многоугольника, образующего элементарный контур. Кроме того, следует ожидать, что при разумных ограничениях на отклонения звезд от вершин такого многоугольника маловероятно получить элементарный контур высокой размерности. Поэтому принятые в качестве ориентиров созвездия, условно называемые вторичными, будут задавать элементарные контуры размерностей  $k=3,4,5,6$ , характеризующиеся параметрами  $M$ , уже не бесконечными, а превышающими по крайней мере на порядок значение  $M$  для других созвездий, т.е.  $M \approx 10 \dots 100$ .

Отметим также, что элементарные контуры одной размерности, за исключением элементарного контура нулево-



**Рис. 7. Изображения созвездий — квазиоптимальных ориентиров: а — МарГТУ 3/1, б — МарГТУ 3/2, в — МарГТУ 4/1, г — МарГТУ 4/2, д — МарГТУ 5/1.**

го порядка, имеют совпадающие вершины. Поэтому, располагая лишь множеством точек, необходимо оговорить, какой порядок контура является предпочтительным. С точки зрения простоты операции поиска вторичных созвездий целесообразно остановиться на элементарном контуре первого порядка, представляющем собой правильный  $k$ -угольник с направлением обхода против часовой стрелки.

Точечные фигуры на небесной сфере, ассоциированные с сигналами в виде элементарных контуров первого порядка, мы выбирали из множества 320 звезд Северного полушария каталога<sup>6</sup> с яркостью до 4-й звездной величины в экваториальной системе координат, центр которой совмещен с точкой наблюдения. Угловые координаты произвольной звезды — прямое восхождение и склонение. В результате мы нашли ряд вторичных созвездий,

которые назвали созвездиями МарГТУ (см. табл.). Название содержит дробный числовой индекс: первое число равно размерности элементарного контура, второе — порядковому номеру созвездия.

На рис. 7. представлен вид вторичных созвездий, которые целесообразно использовать в качестве наиболее помехоустойчивых ориентиров для летательных аппаратов. Характерная особенность выбранных ориентиров заключается в том, что кроме большого значения коэффициента монохроматичности  $M$  эти созвездия обладают высокой степенью изолированности, т.е. все другие созвездия имеют значительно меньшую величину  $M$ .

\*\*\*

Контурный анализ является сравнительно новым направлением исследований, возникшим на стыке теории обработки изображений и теории сигналов. Главное его достоинство, на наш

<sup>6</sup> Астрономический календарь на 1989 год / Под ред. Д.Н.Пономарева. М., 1988.

взгляд, заключается в том, что обработка изображений в приграничной области объект/фон, отличающейся высокой концентрацией полезной информации, стала проводиться по общей методологии обработки сигнала и отпала необходимость в эвристических подходах.

Атомарная структура любого контура позволяет целенаправленно воздействовать на исходную форму, приводя ее к заданному виду или образу

количественную меру схожести двух форм, и решать на основе этой меры задачи обнаружения, разрешения, оценки параметров и распознавания в реальном масштабе времени.

**Работа поддержана грантами РФФИ (проект 97-01-00906) и Министерства общего и профессионального образования (Программа по фундаментальным исследованиям в области авиационной и ракетно-космической техники).**

## ОБЪЯВЛЕНИЯ

---

Дорогие читатели!

Подписывайтесь на "Природу" в редакции журнала! Это обойдется вам намного дешевле. Цена льготной подписки ( в редакции ) на II полугодие 1999 г. - 30 руб. за номер или 180 руб. за полугодие. Иногородние могут выслать деньги за подписку почтовым переводом, добавив стоимость пересылки шести бандеролей весом 200 г.

Наш адрес: 117049, Москва, Мароновский пер., 26, "Природа", И.Ф.Александровой (тел. 095-238-24-56).

Если вы намерены подписаться на почте, ищите сведения о "Природе" в Объединенном каталоге "Подписка - 99", т. 1, с. 184. Базовая цена подписки - 78 руб. за номер или 468 руб. за полугодие