

# SOME PROBLEMS OF CREATION OF MODERN ASTRONOMICAL TELEVISION MEASURING SYSTEMS

## ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ СОВРЕМЕННЫХ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ТЕЛЕВИЗИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Strygin N.Z.<sup>2</sup>, Prokof'eva V.V.<sup>1</sup>, Sukhov P.P.<sup>2</sup>, Karpenko G.F.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НИИ Крымская Астрофическая обсерватория

<sup>2</sup>НИИ «Астрономическая обсерватория» ОНУ им. И.Мечникова

### Введение

Автоматизация наблюдений в телевизионной астрономии синтезирует развитие и достижения оптико-электронного приборостроения, телевизионной и вычислительной техники, электроники, видеоинформатики.

Возникшие новые технологии автоматизированного анализа изображений изменили содержание некоторых понятий, операций обработки, методов измерений числовых характеристик выделенных космических объектов (КО), в том числе и искусственных спутников Земли (ИСЗ) (Стрыгин и др., 2005), породили новые задачи и требуют методологического обоснования.

Рассмотрим некоторые проблемы создания интерактивных АТВИС для наблюдения ИСЗ на примере чёрно-белой полутоновой ТВИС с цифровой обработкой изображений (ЦОИз).

Создание эффективных прикладных (специализированных) ТВИС требует “оптимального согласования отдельных звеньев и всей системы в целом с изучаемыми объектами и преследуемыми в эксперименте целями” (Гуревич, 1970), а также разработки оптимальных методов извлечения требуемой информации путём цифровой обработки получаемых телевизионных изображений (ТВИз).

Фундаментальный характер астрономии как науки, т.е. отсутствие непосредственной связи её с производством и малый объём возможного спроса, не позволяет организовать разработку и промышленный выпуск АТВИС (Прокофьева и др., 2007).

Проблема решается инициативной разработкой АТВИС или доработкой серийных ТВИС в АТВИС силами и средствами обсерваторий. «Штучный» характер изделия и слабые информационная, конструкторская, технологическая и т.д. базы не позволяют рассчитывать на их достаточные точностные, функциональные, эксплуатационные и технико-экономические показатели (Горелик, 1980; Грязин, 1988).

В настоящей статье продолжается рассмотрение проблем разработки АТВИС, начатое в статьях (Стрыгин и др., 2005; Прокофьева и др., 2007).

### Астрономические телевизионно-измерительные системы (АТВИС)

АТВИС относится к классу информационно-измерительных систем (ИИС); последний совместно с классами вычислительных, передачи информации (СПИ), контроля и управления, хранения и поиска информации систем образует научно-техническое направление «информационные системы» (ИС) (Цапенко, 1985).

По назначению и выполняемым функциям АТВИС близка к радиоинформационным системам извлечения информации – пассивным радиолокационным станциям оптического диапазона (Березин, Вейцель, 1977).

В то же время, уже в 80-е годы XX века основным инструментом в экспериментальных исследованиях физических систем становятся измерительно-вычислительные комплексы (и системы) с развитыми средствами диалога

(Пытьев, Чуличков, 1983; Пытьев, 1989; Задков, Пономарёв, 1988; Виноградов, 1986; Цапенко, 1985). При этом изменились принципы проектирования приборов и задачи технологии (Пытьев, Чуличков, 1983). Если до применения ЭВМ задачей приборостроения было создание приборов, обеспечивающего наименьшее искажение результатов измерения (например, для астрономии – телескопов с высокой разрешающей способностью), то при использовании ЭВМ и математических методов редукции одной из важнейших задач приборостроения стало уменьшение уровня случайных шумов (Пытьев, Чуличков, 1983).

Общие объекты исследования, принципы построения, стимулы развития, и т.д. всех классов ИС позволяют рассчитывать на появление аналогий и взаимное проникновение новых терминов, понятий, алгоритмов, технических решений, требований на разработку систем и т.д. между разными классами ИС.

### Особенности методологии разработки АТВИС

Однако до сих пор нет методологии создания АТВИС (Прокофьева и др., 2007), поскольку она является сложной системной проблемой. А её необходимо иметь для создания конкретной АТВИС.

В качестве первоочередных задач создания такой методологии можно отметить:

а) Уточнение терминологии, например:

1. Точечным объектом в телевидении считают объект, площадь изображения которого сопоставима с площадью пиксела. «Точечный» размер определяет способ выделения объекта из изображения. В астрономии «точечные» объекты имеют площадь изображения в десятки-сотни пикселов; последние в ЦОИЗ называют компактными малоразмерными выпуклыми односвязными.

2. В телевидении фоном называют объекты, находящиеся на заднем плане относительно объекта наблюдения; взаимодействие световых потоков объекта и фона – неаддитивное; в астрономии фон может находиться и на переднем плане (Баканас, 2003), а взаимодействие световых потоков объекта и фона может быть также аддитивным и мультипликативным.

3. Зафиксировав объект в 99 кадрах из 100 или 99 объектов из 100 в одном кадре, в обоих случаях используем термин “вероятность обнаружения равна 0,99”, хотя он в каждом случае имеет свой физический смысл и основан на разных вероятностных моделях: вероятность по множеству и вероятность по времени, соответственно.

б) Обоснованное использование сочетания понятий и методов как непрерывной, так и дискретной математики при измерениях на изображениях, например:

1. В задачах анализа изображений предложено несколько метрик для определения расстояния между точками (Прэртт, 1982):

- евклидово расстояние -  $d_E = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$ ,

- абсолютное расстояние -  $d_A = |x_i - x_j| + |y_i - y_j|$ ,

- максимальное расстояние -  $d_M = \max\{|x_i - x_j|, |y_i - y_j|\}$ ,

но не определено, **как** измерить расстояние между объектами конечных размеров. Видимо, в АТВИС при квадратной форме пиксела следует измерять расстояния евклидовой метрикой и между виртуальными точками – центроидами оптического излучения КО.

2. Выделение объектов при обработке производится за счет связности пикселов его изображения по некоторому признаку. Для пикселов квадратной формы предложено 2 способа учета связности: 4-х связность и 8-ми связность. Учитывая специфику изображений КО, видимо, в ТВ астрономии достаточно использовать 4-х связность, т.е. связность по соседству сторон пикселов; аналогично следует подходить к связности при пикселах другой формы, например, 6-ти угольной.

3. Существует произвол в определении площадей объектов на цифровых изображениях. На конференции ICASSP'89 Ian T. Young (Young, 1989) показал, что площадь треугольника (половины 16-пиксельного квадрата) может составлять 10, 8 или 4.5 пиксела в зависимости от способа измерения или вычисления:

10 пикселов - при вычислении площади по количеству покрытых пикселов раstra,

8 пикселов - при вычислении площади треугольника по известной формуле,

4.5 пиксела – при измерении расстояний между пикселами (точками конечных размеров) и вычислении площади треугольника по формуле.

в) Формирование классов (моделей) изображений (Из) с учётом как типов наблюдаемых объектов и их композиций, так и условий наблюдения: типов мешающих фонов, помех и искажений внешней средой и изображающими системами.

Задача это сложная. Поэтому подробно рассмотрим ее в следующем разделе

### Особенности цифровой обработки изображений (ЦОИз) в АТВИС

В ЦОИз, как разделе видеоинформатики, до сих пор не создана классификация моделей; это обусловлено как неоднозначностью целей и критериев классификации, так и непрерывно увеличивающимся (в связи с развитием науки, техники и производства) множеством сюжетов (объектов изображения), областей приложения и условий наблюдения.

ЦОИз имеет 3 направления: *машинную графику (точнее – синтез Из), собственно обработку и анализ Из* (Павлидис, 1986).

Машинная графика занимается воспроизведением изображений в тех случаях, когда исходной является *информация неизобразительного характера*, например, аналитические выражения, алгоритмы, графические примитивы.

Под *собственно обработкой Из* понимается применение к нему системы преобразований, приводящих его к виду, удобному для представления, хранения, передачи и анализа, или улучшающему его качество. *Собственно обработка изображений* занимается решением таких задач, в которых и входные, и выходные данные являются *изображениями*, например, устранение шумов и искажений в системах формирования изображений, реставрация (восстановление) изображений, «смазанных» движением наблюдаемого объекта или движением телевизионного датчика.

Под *анализом Из* понимается применение к нему системы преобразований, обеспечивающей извлечение из него полезной информации, например, о свойствах изображаемого объекта, о наличии искомого объекта, о динамике изменений наблюдаемого сюжета (Гуревич, 1986). Задачей *анализа изображений* является получение некоторого описания входного изображения, по которому его можно было бы отнести к некоторому определённому классу Из (Павлидис, 1986; Гуревич, 1986).

При решении задач ОИз «возникает ряд общих вопросов:

1. Как описать или охарактеризовать изображения?
2. Какие математические операции желательно применять при ОИз?
3. Как реализовать (аппаратурно) эти математические операции?
4. Каким образом оценивать качество изображений?» (Хуанг и др., 1973).

При создании АТВИС возникают дополнительно следующие вопросы: как описать естественные фоны, шумы, искажения изображений КО и ИСЗ за счёт турбулентности атмосферы и проникающей способности её в момент регистрации ТВ кадра, а также фоны, шумы и искажения изображений, добавляемые самой изображающей системой.

На рис. 1 приведены основные модели двумерных полей излучения. На рис. 2, 3, 4 приведены структурные схемы изображающих систем, соответственно, в вещательном ТВ, в телевизионной астрономии, в оптико-электронных системах исследования природных ресурсов Земли (ОЭС ИПРЗ).

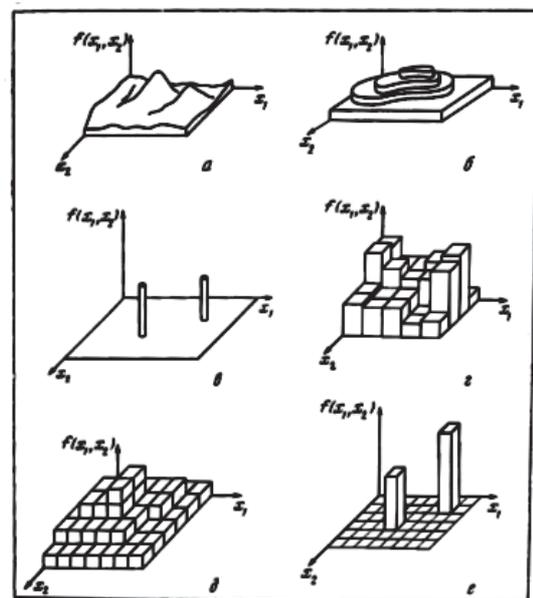


Рис. 1: Основные модели двумерных полей излучения (Здор, Широков, 1973):

*a* – непрерывно–непрерывное; *б* – непрерывно–дискретное; *в* – непрерывно–импульсное; *г* – дискретно–непрерывное; *д* – дискретно–дискретное; *е* – дискретно–импульсное.

(нет модели квантованной (дискретной) импульсной функции яркости изображения).



Рис. 2: Изражающая система в вещательном ТВ.



Рис. 3: Изражающая система в телевизионной астрономии.

Рис. 4: Изражающая система в ОЭС ИПРЗ  
(буквой А обозначена разделяющая среда – атмосфера)

Их сравнение показывает, что сложность задач анализа Из в двух последних схемах (естественные условия наблюдения через случайно изменяющуюся неустойчивую среду – атмосферу) существенно выше, чем в первой (стационарные условия наблюдения), причём, во второй схеме значительно выше, чем в третьей (за счёт недоступности объектов наблюдения для непосредственного измерения).

Рассмотрим специфику задачи наблюдения ИСЗ в ТВ астрономии:

1. естественные физическая среда, внешний мир, условия освещения;

2. краткосрочность и невоспроизводимость условий наблюдения;

3. недоступность КО и ИСЗ для непосредственных измерений, в результате чего приходится пользоваться оценками их характеристик, а процесс наблюдения за ИСЗ сводится к регистрации реализаций многомерных случайных процессов;

4. двойственный характер изображений КО: они могут быть фоновыми помехами в виде световых пятен, затрудняющими выделение ИСЗ из изображения, и могут быть сопутствующими объектами, выделение и

определение числовых характеристик которых необходимы для определения последних у ИСЗ;

5. фоновое свечение ночного неба может происходить за счёт рассеянного излучения как КО (находящихся на заднем плане), так и облачных покровов и неоднородностей атмосферы, находящихся на переднем плане.

Потоки излучения от КО, проходя через земную атмосферу, искажаются за счёт случайных процессов рассеяния, поглощения, дифракции, рефракции, турбулентности и т. д. Это не позволяет полностью автоматизировать процессы обработки и анализа изображений, поэтому АТВИС будут и далее системами *полуавтоматическими*.

Площадь отражающей поверхности ИСЗ, его блеск, воспринимаемые наблюдателем на Земле в приборной системе координат, являются случайными функциями времени. ИСЗ воспринимается АТВИС в каждом телевизионном кадре как световой импульс, заданный в компактной односвязной области плоскости кадра площадью от нескольких пикселей до нескольких сотен пикселей.

Звёздное небо воспринимается как световое двумерное импульсное параметрическое поле (ДИПП), наблюдаемое на фоне естественных двумерных случайных динамических полей (или совместно с ними) и в присутствии естественных пространственно распределённых шумов и помех. При этом, изображение звёзд из-за атмосферной турбулентности имеют размер в несколько раз больше теоретического и размытую форму. Уровень естественных шумов в обычных условиях достаточно мал.

Поскольку от типа фона и характера взаимодействия световых потоков КО и фона зависит способ выделения КО на изображении, необходимо разработать классификацию фонов с позиций ЦОИЗ и определить для известных алгоритмов выделения объектов область применимости их на классах фонов и предельное качество выделения. Последнее обусловлено тем, что числовые характеристики (модель) КО, наблюдаемого на сложном фоне, выделенного, например, методом пороговой обработки, будут зависеть от выбранного порога  $\Delta$ .

В процессе наблюдения за ИСЗ измеряют их и КО фотометрические и координатные характеристики. Поскольку условия текущего наблюдения (опыта) *не воспроизводимы* и существуют в ограниченном интервале времени,

возникает проблема *достоверности и надёжности* результатов измерений АТВИС, как сложной технической системы.

По аналогии с системами передачи информации (СПИ) (Смирнов, 1979; Красильников, 1976; Красильников, 1986; Зубов, Глориозов, 1989) для АТВИС необходимо наполнить своим содержанием понятия «качество изображения», «качество измерения на изображении», «качество АТВИС». Качество АТВИС будет определяться качеством измерения на изображениях и качеством интересующих потребителя показателей (функциональных, эксплуатационных, технико-экономических) системы.

Качество измерения на изображениях принято определять среднеквадратичной ошибкой измерения (некоторой величины, например сигнала или яркости (Красильников, 1976)). Такой критерий качества пригоден для ТВИС, измеряющих одну величину. В АТВИС измеряются три величины: линейные расстояния между КО, площади КО, величины сигналов пикселей изображения КО.

Возникают методологические трудности с обоснованием интегрального критерия качества измерений на изображении и выбора метрик для каждой измеряемой величины, а также методов их измерения.

Качество изображений в вещательном телевидении определяется на основании статистики субъективных визуальных оценок группой потребителей заметности искажений на изображении (Кривошеев, 1989, ч. II).

В связи с отсутствием единого интегрального критерия качества ТВ изображения, однозначно связанного с субъективным восприятием изображения пользователем, качество изображений оценивают совокупностью частных критериев, представляющих собой параметры ТВ изображения. Существует тесная связь между параметрами ТВ изображения и его зрительным восприятием (что и используется при визуальной оценке ТВ изображения по испытательным таблицам (Хесин, 1969)).

Оценка качества изображения в АТВИС должна производиться с позиций её функционального назначения – выделения информации, т.е. должна быть объективной и может охватывать не всё поле изображения, а только его рабочий фрагмент, содержащий локальные окрестности выделяемых КО.

Критерием качества изображения, очевидно, должна служить суммарная сложность алгоритмов ЦОИЗ (вычислительная или временная) (Юдин Д.Б., Юдин А.Д., 1985), использованных для выделения и определения числовых характеристик (моделей) ИСЗ и опорных звёзд с заданной достоверностью и надёжностью (Прокофьева и др., 2007).

Наиболее масштабное применение ЦОИЗ находит сегодня в системах технического зрения (СТЗ), выпускаемых промышленностью для систем визуального технологического контроля и робототехники.

По сравнению с АТВИС СТЗ работают в более лёгких условиях: искусственная и стабильная среда, внешний мир, освещение и т.д. Но даже и в этих условиях «в большинстве случаев задачи ОИЗ не могут быть полностью формализованы, поэтому методы и алгоритмы их решения носят эвристический характер» (Путятин, Аверин, 1990).

В развитии СТЗ существует два направления.

Первое ориентируется на создание универсальных исследовательских комплексов (УИК) ОИЗ в различных технологических ситуациях. Такие комплексы снабжаются набором видеодатчиков, интерфейсами ввода/вывода, мощными компьютерами, развитой системой специального программного обеспечения. Назначение таких систем – исследование и испытание алгоритмов ОИЗ для различных технологических ситуаций, а также, автоматизированное проектирование архитектур и схемотехники спецвычислителей, реализующих полученные алгоритмы.

Второе направление ориентируется на создание специализированных СТЗ для конкретных приложений. Исходными данными могут служить результаты предварительного моделирования системы на УИК, либо априорные сведения о характере (особенностях) входных изображений и эвристические соображения об алгоритмах их обработки (Путятин, Аверин, 1990). Как правило, специализированные СТЗ работают в реальном, задаваемом ТВ датчиком масштабе времени.

Опыт разработки СТЗ для роботов показывает, что алгоритмы ЦОИЗ (например, выделения объектов) эффективны только на тех классах изображений, для которых они разрабатывались (Путятин, Аверин, 1990).

Специализированные системы анализа Из (к

которым относится АТВИС), рассчитаны на обработку только своих специфических классов изображений (Розенфельд, Дейвис, 1979), выделяемых из возможного множества их определённой совокупностью предположений об их структуре. «Эти предположения, зачастую не формулируемые в явном виде, могут рассматриваться как (возможно, неформальные) модели классов изображений» (Розенфельд, Дейвис, 1979).

г) Оптимизация технологии цифровой обработки изображений в АТВИС

Оптимизация цифровой обработки изображений зарегистрированных космических объектов в АТВИС предлагается осуществлять в следующей последовательности решений функционально связанных задач:

- 1) регистрация Из;
- 2) улучшение Из;
- 3) реставрация (восстановление) Из;
- 4) выделение (сегментация) изображений КО и ИСЗ;
- 5) измерение их количественных характеристик  $V_i$ ,  $S_i$ ,  $(x_0, y_0)_i$ , где  $i = 1, \dots, k$ ,  $k$  – число выделенных КО,  $V_i$  – суммарная яркость площади  $S_i$   $i$ -го КО,  $(x_0, y_0)_i$  – координаты центра оптического излучения площади  $S_i$ ;
- 6) выбор опорных звёзд;
- 7) представление и описание фрагментов ЗН, содержащих опорные звёзды и ИСЗ;
- 8) отождествление опорных звёзд на последовательности ТВ изображений звёздам каталога;
- 9) определение небесных координат ИСЗ;
- 10) вычисление элементов орбиты.

Первая и последняя задачи не имеют непосредственного отношения к обработке изображений.

Может возникнуть также задача эффективного кодирования изображений с целью их передачи или хранения.

Решаемые АТВИС задачи относятся и к собственно обработке Из (улучшение, реставрация Из), и к анализу Из (выделение КО и ИСЗ из изображений, измерение их количественных характеристик, представление и описание фрагментов ЗН, содержащих ИСЗ, отождествление опорных звёзд на последовательности ТВ Из по звёздам каталога).

Технологическая схема ЦОИЗ в АТВИС при наблюдениях ИСЗ приведена на рис. 5.

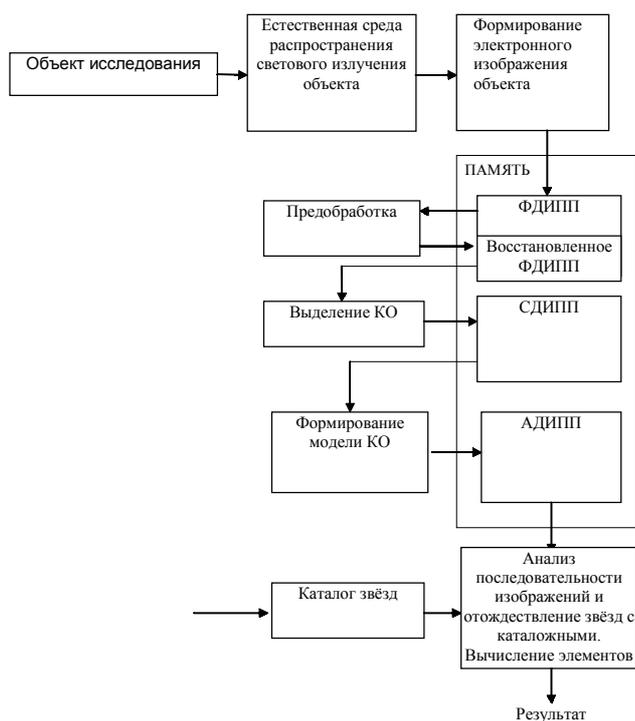


Рис. 5: Технологическая схема ЦОИз в АТВИС при наблюдениях ИСЗ.

Улучшение изображения – такая обработка его, чтобы результат оказался более приемлемым для конкретного применения (Гонсалес, Вудс, 2005). При улучшении Из не делается попытка приблизить воспроизводимое Из к некоторому идеализированному оригиналу (такая задача решается при реставрации Из) (Прэтт, 1982). В ряде случаев искажённое Из субъективно воспринимается лучше, чем неискажённый оригинал (например, при подчёркивании границ (контуров)) (Прэтт, 1982).

Общей теории улучшения изображений не существует (Гонсалес, Вудс, 2005; Прэтт, 1982). Одна из причин – нет общепринятого стандарта качества Из, который мог бы служить критерием при создании систем улучшения Из (Прэтт, 1982).

Большинство методов улучшения изображений являются эвристическими и проблемно-ориентированными (Гонсалес, Вудс, 2005; Алексеев и др., 1988), и успех приложения метода к конкретному Из зависит от субъективного суждения пользователя (при визуальной интерпретации Из) (Гонсалес, Вудс, 2005; Алексеев и др., 1988), или от значения количественного критерия конечного результата (при машинном восприятии), например, в системе распознавания – повышения надёжности распознавания (Гонсалес, Вудс, 2005).

Улучшение изображений достигается посредством их обработки с помощью операторов (Алексеев и др., 1988). Исходя из свойств последних, существующие методы можно разделить на классы по:

1) размеру области, покрываемой оператором (локальный и глобальный);

2) чувствительности оператора к контексту (позиционно-инвариантный – с фиксированными параметрами – и адаптивный, в котором параметры изменяются в соответствии с локальными характеристиками изображений);

3) цели обработки (устранение шума и улучшение признаков, представляющих интерес для потребителя; на практике часто используются комбинированные операторы, одновременно, устраняющие шум и улучшающие признаки);

4) типу привлечённых методов (а – пространственное сглаживание; б – преобразование градаций яркости; в – улучшение контуров; г – фильтрация в частотной области).

Чёткого различия между улучшением Из и реставрацией Из нет; в 70-е годы ряд авторов даже рассматривал улучшение Из как проблему реставрации Из (Алексеев и др., 1988).

### Восстановление (реставрация) изображений

Восстановление изображений – это научное направление по разработке методов и средств компенсации искажений, вносимых в изображения в процессе их формирования различными системами (Василенко, Тараторин, 1986).

Восстановление изображений имеет конечной целью повышение качества (т.е. и улучшение) изображений в некотором заранее предопределённом смысле (Гонсалес, Вудс, 2005); отсюда следует, что «улучшение изображений» является родовым понятием по отношению к понятию «восстановление изображений», хотя и высказывалось противоположное мнение, например, в (Алексеев и др., 1988).

При восстановлении, используя априорную информацию о явлениях и процессах, которые вызвали ухудшение изображения, пытаются воссоздать исходное изображение из искажённого. Методы восстановления основаны на моделировании процессов искажения, оценки параметров искажения, и применении обратных процедур и оценок для воссоздания исходного изображения (Гонсалес, Вудс, 2005; Бейтс, Мак-Доннел, 1989).

Этот подход обычно включает разработку критериев качества восстановления, которые дают возможность объективно оценить полученный результат (Гонсалес, Вудс, 2005).

В АТВИС разработка таких критериев качества затруднена, т.к. искажаются несколько параметров (числовых характеристик) исходной функции изображения  $f(x, y)$  – распределение интенсивности  $f(x, y)$  по её области задания, форма и площадь области задания, – и действительные значения параметров неизвестны и недоступны.

При формировании Из происходит свертка сигнала Из с импульсным откликом изображающей системы. В результате этого Из изменяется. Восстановление Из связано с устранением недостатков его, вызванных ненулевой шириной импульсного отклика изображающей системы. Конечная ширина импульсного отклика приводит к неизбежному снижению разрешающей способности (Хант, 1980). Задача восстановления не имеет единственного решения и усложняется присутствия шумов. Кроме того, изображающая система, формирующая (и одновременно ухудшающая) Из в АТВИС, имеет не постоянные, а изменяющиеся случайным образом параметры. (Хант, 1980).

Восстановление изображений – это одновременно и наука, и искусство, считают Р. Бейтс и М. МакДоннел (Бейтс, МакДоннел, 1989).

Наиболее изучены и широко используются для приближённого описания многих типов искажений линейные пространственно (трансляционно) – инвариантные модели с аддитивным шумом.

Модель процесса искажения/восстановления изображений приведена на рис. 6 (Гонсалес, Вудс, 2005).

$$(1) \quad g(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(\alpha, \beta) h(x - \alpha, y - \beta) d\alpha d\beta + n(x, y),$$

(Гонсалес, Вудс, 2005)

где:  $f(\alpha, \beta)$  – входное (исходное), а  $g(x, y)$  – выходное (искажённое) Из изображающей системы;  $n(x, y)$  – пространственный некоррелированный шум, описываемый независимыми от точки пространства случайными величинами; считается, что шум не коррелирует с функцией изображения  $f(x, y)$ ;

$h(x - \alpha, y - \beta) = H[\delta(x - \alpha, y - \beta)]$  (Гонсалес, Вудс, 2005) – импульсный отклик (аппаратная

функция, функция рассеяния точки (ФРТ)) всей изображающей системы – ядро искажающего оператора  $H$  (Гонсалес, Вудс, 2005); т.о., функция  $h(x, \alpha, y, \beta)$  представляет собой отклик оператора  $H$  на  $\delta$ -функцию, локализованную в точке  $(x, y)$ ;  $\delta(x - \alpha, y - \beta)$  –  $\delta$ -функция Дирака.

Структура искажающего оператора бывает достаточно сложной. Можно считать, что в общем случае оператор  $H$  эквивалентен нескольким последовательным операторам, каждый из которых соответствует различным стадиям формирования Из изображающей системой (см. рис. 3):

$$H = H_{сч} H_p H_{кв} H_d H_{пу} H_{пр} H_{ос} H_{атм.}$$

(Василенко, Тараторин, 1986),

где

$H_{атм.}$  – оператор искажения атмосферой,

$H_{ос}$  – оператор искажения оптической системой,

$H_{пр.}$  – оператор искажения преобразователем свет-сигнал,

$H_{пу}$  – оператор искажения предварительным усилителем,

$H_d$  – оператор искажения при дискретизации Из,

$H_{кв.}$  – оператор искажения при квантовании Из,

$H_p$  – оператор искажения при регистрации оцифрованного сигнала Из,

$H_{сч}$  – оператор искажения при считывании оцифрованного сигнала Из.

При этом операторы могут быть линейными ( $H_{ос}$ ), нелинейными ( $H_{пр.}$ ,  $H_{пу}$ ), случайными ( $H_{сч}$ ,  $H_p$ ,  $H_{кв.}$ ,  $H_d$ ), нелинейными случайными и зависящими от времени ( $H_{атм.}$ ).

Уравнение (1) представлено в пространственной области; обычно свёртка обозначается (Гонсалес, Вудс, 2005):

$$(2) \quad g(x, y) = h(x, y) \otimes f(x, y) + n(x, y)$$

что, при переходе в частотную область, даст, согласно теореме о свёртке:

$$(3) \quad G(u, v) = H(u, v)F(u, v) + N(u, v),$$

где  $G(u, v)$ ,  $H(u, v)$ ,  $F(u, v)$ ,  $N(u, v)$  – Фурье-образы соответствующих функций формулы (2).

Простейшим способом восстановления Из является инверсная фильтрация, которая предполагает получение оценки  $\hat{F}(u, v)$  Фурье-преобразования исходной функции изображения  $f(x, y)$  делением Фурье-преобразования

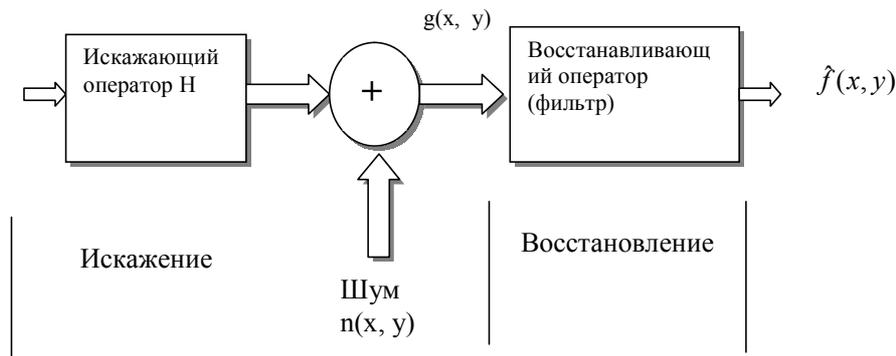


Рис. 6:

искажённой функции изображения  $G(u, v)$  на частотное представление искажающего оператора  $H(u, v)$ :

$$(4) \hat{F}(u, v) = G(u, v) H(u, v)^{-1} = F(u, v) + N(u, v) H(u, v)^{-1}$$

Из (4) видно, что даже при известном операторе  $H(u, v)$  невозможно точно восстановить исходную функцию Из (обратное Фурье-преобразование функции  $F(u, v)$ ), поскольку функция  $N(u, v)$  является Фурье-преобразованием случайной величины и неизвестна. Кроме того, если оператор  $H(u, v)$  принимает нулевые (или близкие к нулевым) значения в некоторых интервалах частот  $u, v$  пространства  $U \times V$ ,  $(u, v) \in U \times V$ , то вклад второго слагаемого в правой части формулы (4) может стать доминирующим. Возможным способом устранения отмеченной сингулярности является применение полосовых фильтров с  $H(u, v)^{-1} = 0$  в этих интервалах, срезающих спектральные компоненты в опасных интервалах частот (Сондхи, 1973; Гонсалес, Вудс, 2005).

Обычно оператор  $H(u, v)$  к моменту наблюдения неизвестен. Аппаратурные операторы искажений  $H_{\text{сч}}$ ,  $H_{\text{р}}$ ,  $H_{\text{кв}}$ ,  $H_{\text{д}}$ ,  $H_{\text{пу}}$ ,  $H_{\text{пр}}$ ,  $H_{\text{ос}}$  могут быть предварительно измерены при тестировании аппаратуры. Оператор  $H_{\text{атм}}$  может быть представлен моделью (Hufnagel, Stanley, 1964), но необходимо оперативно определять её параметр:

$$H_{\text{атм}}(u, v) = \exp(-k(u^2 + v^2)^{5/6}), \text{ (Гонсалес, Вудс, 2005)}$$

где константа  $k$  описывает турбулентные свойства атмосферы.

Трансляционно-неинвариантные модели можно свести к набору трансляционно-инвариантных моделей, справедливых для соответствующих фрагментов, на которые разбивается область Из.

Линейные методы имеют практически пределом расстояние разрешения  $x_0 \sim R/2$ , где  $R$  – рэлеевское расстояние (Фриден, 1979).

Нелинейные и трансляционно-неинвариантные методы являются более общими (и обычно более точными), например, нелинейные методы позволяют уменьшить предельное расстояние разрешения  $x_0$  до  $R/4$  (Фриден, 1979), но их использование часто приводит к непреодолимым или очень трудно решаемым численными методами проблемам (Гонсалес, Вудс, 2005).

«Пригодной для практических целей общей теории нелинейной обработки не существует, как не существует общей классификации нелинейных интегральных уравнений (Краснов, 1975); когда такие операции встречаются в конкретных приложениях, каждую из них приходится рассматривать в отдельности» (Хуанг, 1979).

«В то же время, главной областью применения нелинейных методов является реставрация таких импульсных объектов, как звёзды, линейчатые спектры, и т.п.» (Фриден, 1979).

Нелинейные методы реализуются, как правило, итеративными алгоритмами. Необходима разработка алгоритмов, обеспечивающих получение решения в замкнутой форме (Фриден, 1979).

### Сегментация (выделение) изображений КО и ИСЗ

Сегментация заключается в автоматическом разбиении Из на содержательно интерпретируемые области; её важным частным случаем является задача выделения (обнаружения) объектов, различных как по своим яркостным и геометрическим свойствам, так и по физической интерпретации (Денисов, Низовкин, 1985).

Автоматическое выделение (сегментация) некоторых объектов из изображений (если эти изображения не являются тривиальными), принадлежит к числу самых трудных и сложных задач ОИЗ (Гонсалес, Вудс, 2005).

В идеальном случае разработка методов сегментации для некоторой модели (класса) изображений должна опираться на специальные знания о сюжете и на знания аппаратуры и технологических процессов изображающей системы (Розенфельд, Дейвис, 1979).

Разработанный для определённой модели (класса) изображений метод сегментации обладает, тем не менее, некоторой универсальностью, то есть, применимостью и к некоторому множеству классов изображений. Однако, применимость какого-либо из стандартных методов сегментации к некоторому новому классу изображений не всегда очевидна – она определяется соотношением модели этого класса и моделей, лежащих в основе стандартных методов сегментации (Розенфельд, Дейвис, 1979).

*«Как правило, алгоритмы сегментации изображений основываются на одном из двух базовых свойств сигнала яркости: разрывности и однородности.*

*В первом случае подход состоит в разбиении Из на основании резких изменений сигнала – перепадов яркости на Из. Во втором случае используется разбиение Из на области, однородные в смысле предварительно выбранных критериев»* (Гонсалес, Вудс, 2005; Денисов, Низовкин, 1985).

В задаче сегментации можно выделить *содержательный, формальный, алгоритмический и вычислительный аспекты* (Денисов, Низовкин, 1985).

*Содержательный аспект* предполагает правильное понимание задачи сегментации, которое (несмотря на приведенные выше лаконичное определение) допускает в ряде случаев неоднозначное толкование.

*Формальный аспект* затрагивает математическую формулировку задачи и, естественно, должен предопределять подходы и методы её решения.

*Алгоритмический аспект* отражает конкретное воплощение теоретического метода в последовательность алгоритмических процедур, обеспечивающих достижение конечного результата.

*Вычислительный аспект* рассматривает специфические особенности реализации алгоритмов: выбор структур данных для представления исходных, промежуточных и окончательных результатов вычислений, требований к объёму памяти вычислительных средств, возможности распараллеливания вычислений и т.п. (Денисов, Низовкин, 1985).

### Алгоритм выделения изображений КО и ИСЗ в поле звезд, разработанный в ОАО

Ввиду сложных условий выделения КО простейшие одношаговые алгоритмы работают недостаточно эффективно. Для АТВИС необходима разработка многошаговых адаптивных алгоритмов, учитывающих пространственную корреляцию сигналов пикселей ТВ кадра и их межкадровую (временную) корреляцию. Такой алгоритм разрабатывается в ОАО. Результаты некоторых предварительных сравнительных испытания его с простейшими алгоритмами выделения (локальным порогом и градиентным методом) приведены ниже.

*Результаты сравнительных испытаний алгоритма ОАО выделения КО с простейшими алгоритмами*



Рис. 7: Исходное изображение  
Здесь рамкой выделен фрагмент ЗН, содержащий 5 ИСЗ (обозначены цифрами 1–5 на рис. 9).



Рис. 8: Фрагмент рис. 7.

Ниже приведены распечатки модельных файлов (АДИПП), исходного фрагмента на рис. 7, соответствующие разным СДИПП.

Рис. 9 (а):

\*\*\* Опорных звёзд: 3  
 \*\*\* Спутников: 5  
 \*\*\* спутник: №1:  $x = 492, y = 472$ , площадь: 2, яркость: 750  
 \*\*\* спутник: №2:  $x = 497, y = 477$ , площадь: 3, яркость: 592  
 \*\*\* спутник: №3:  $x = 509, y = 463$ , площадь: 3, яркость: 655  
 \*\*\* спутник: №4:  $x = 493, y = 456$ , площадь: 4, яркость: 884  
 \*\*\* спутник: №5:  $x = 489, y = 444$ , площадь: 6, яркость: 835  
 Оп. звезда №1:  $x = 583, y = 427$ , площадь: 10, яркость: 2540  
 Оп. звезда №2:  $x = 517, y = 486$ , площадь: 44, яркость: 10797  
 Оп. звезда №3:  $x = 478, y = 566$ , площадь: 20, яркость: 5080

Рис. 9 (б):

\*\*\* Опорных звёзд: 3  
 \*\*\* Спутников: 5  
 \*\*\* спутник: №1:  $x = 493, y = 476$ , площадь: 6, яркость: 905  
 \*\*\* спутник: №2:  $x = 499, y = 474$ , площадь: 7, яркость: 735  
 \*\*\* спутник: №3:  $x = 510, y = 465$ , площадь: 8, яркость: 916  
 \*\*\* спутник: №4:  $x = 502, y = 457$ , площадь: 5, яркость: 568  
 \*\*\* спутник: №5:  $x = 496, y = 445$ , площадь: 4, яркость: 798  
 Оп. звезда №1:  $x = 579, y = 426$ , площадь: 52, яркость: 6971

Оп. звезда №2:  $x = 517, y = 486$ , площадь: 63, яркость: 10710

Оп. звезда №3:  $x = 477, y = 565$ , площадь: 48, яркость: 8786

Рис. 9 (в):

\*\*\* Опорных звёзд: 3  
 \*\*\* Спутников: 5  
 \*\*\* спутник: №1:  $x = 497, y = 474$ , площадь: 6, яркость: 918  
 \*\*\* спутник: №2:  $x = 502, y = 471$ , площадь: 6, яркость: 967  
 \*\*\* спутник: №3:  $x = 508, y = 465$ , площадь: 7, яркость: 1033  
 \*\*\* спутник: №4:  $x = 502, y = 458$ , площадь: 6, яркость: 918  
 \*\*\* спутник: №5:  $x = 496, y = 446$ , площадь: 6, яркость: 869  
 Оп. звезда №1:  $x = 581, y = 427$ , площадь: 13, яркость: 3048  
 Оп. звезда №2:  $x = 517, y = 486$ , площадь: 44, яркость: 10790  
 Оп. звезда №3:  $x = 478, y = 566$ , площадь: 21, яркость: 5080

### Отождествление опорных звёзд на последовательности ТВ изображений по звёздам каталога

Отождествление звёзд некоторого фрагмента ЗН по звёздам каталога – рутинная задача астрономических наблюдений.

Автоматизация её производилась многими исследователями, но предлагавшиеся алгоритмы были недостаточно эффективными ввиду неполного учёта условий задачи:

а) поисковых признаков, в т.ч. меток и их смысла;

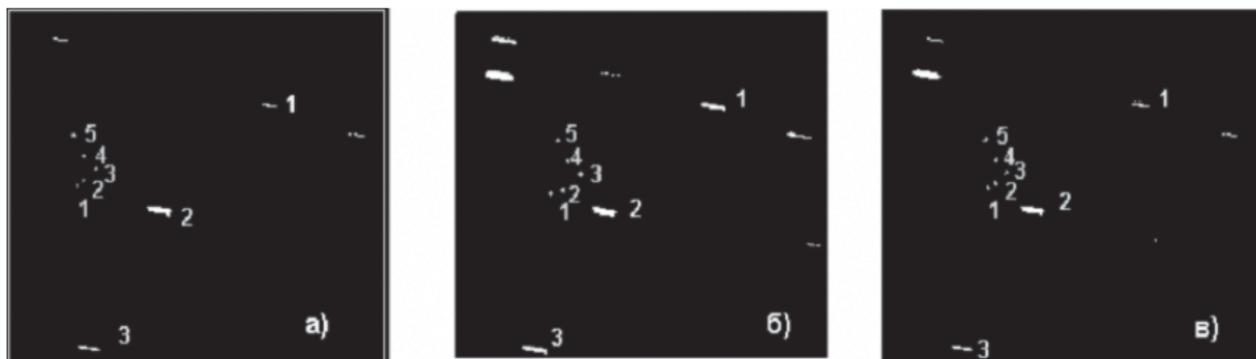


Рис. 9: Фрагмент на рис. 7

Здесь: а) Градиентная сегментация (апертура  $5 \times 5$ ); б) сегментация адаптивным локальным порогом (апертура  $63 \times 63$ ); в) алгоритм ОАО. Результаты приведены для исходного фрагмента на рис. 7.

б) наличия функциональных связей между метками;

в) одношаговости алгоритмов отождествления (применимых только для фотоснимков фрагментов ЗН);

г) избыточности описания.

Задача отождествления звёзд на последовательности ТВ изображений по звёздам каталога может быть сведена к последовательности задач определения изоморфизма подграфа (Рейнгольд и др., 1980) графа с помеченными вершинами и рёбрами, причём метки являются случайными величинами с разными законами распределения для вершинных и рёберных меток, и последние являются евклидовыми метриками.

В ОАО разрабатывается алгоритм, свободный от указанных недостатков, работающий на последовательности ТВ изображений как при неподвижном, так и подвижном телескопе. Проведены его сравнительные испытания с алгоритмом (Valdes et al., 1995) – модернизированным алгоритмом E. J. Groth (Groth, 1986).

### Сравнительное испытание алгоритмов F. G. Valdes et al. и ОАО отождествления звёзд с каталогом:

Звёзды на снимке рис. 7 алгоритмом (Valdes et al., 1995) отождествить не удалось (по видимому, из-за большой дисперсии положений звёзд и большой чувствительности алгоритма к изменению масштаба Из). Алгоритм ОАО отождествил все 8 автоматически выбранных им опорных звёзд и определил небесные координаты всех 5 ИСЗ, присутствующих во фрагменте рис. 8.

Ниже приведена распечатка файла результата отождествления звёзд рис. 7.

Координаты спутников:

Спутник №1:

RA:  $01^{\text{h}} 43^{\text{m}} 55^{\text{s}}.100$

DE:  $-06^{\circ} 54' 41.40''$

Спутник №2:

RA:  $01^{\text{h}} 43^{\text{m}} 44^{\text{s}}.277$

DE:  $-06^{\circ} 57' 41.84''$

Спутник №3:

RA:  $01^{\text{h}} 43^{\text{m}} 33^{\text{s}}.642$

DE:  $-06^{\circ} 59' 17.17''$

Спутник №4:

RA:  $01^{\text{h}} 43^{\text{m}} 41^{\text{s}}.806$

DE:  $-07^{\circ} 01' 18.56''$

Спутник №5:

RA:  $01^{\text{h}} 43^{\text{m}} 33^{\text{s}}.642$

DE:  $-06^{\circ} 59' 17.17''$

### Заключение

Поскольку по вышеприведенным причинам разработка специализированных информационно-вычислительных комплексов (ИВК) для обработки изображений ЗН вряд ли возможна в ближайшее время, рядовым обсерваториям придётся ориентироваться на использование ИВК общего назначения и разрабатывать специализированные программные комплексы. Следует, очевидно, при подготовке астрономов ориентировать их на автоматизированные технологии наблюдения и цифровую обработку изображений ЗН, что является **насущной необходимостью** в наступившую эпоху информатизации общества.

### Литература

- Алексеев А.Б., Пяткин В.П., Дементьев В.Н. и др. Автоматизированная обработка изображений природных комплексов Сибири.–Новосибирск, «Наука», 1988.–224 с.
- Баканас В.В. // Сб. «Околоземная астрономия. 2003» Труды конф., Т-2. Терскол, 8–13 сент. 2003 г. Изд. Ин-т Астрономии РАН. С-П: 2003, с. 276–283.
- Бейтс Р., Мак-Доннел М. Восстановление и реконструкция изображений.– М.: «Мир», 1989.–336 с.
- Березин Л.В., Вейцель В.А. Теория и проектирование радиосистем. Под ред. В.Н. Типугина.–М.: «Сов. Радио», 1977.–448 с.
- Василенко Г.И., Тараторин А.М. Восстановление изображений.– М.: Радио и Связь, 1986.–304 с.
- Виноградов В.И. Информационно-вычислительные системы: распределённые модульные системы автоматизации.– 2-е изд.–М.: Энергоатомиздат, 1986.– 336 с.
- Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений.–М.: Техносфера, 2005.–1073 с.
- Горелик С.Л. и др. //Телевизионные измерительные системы. М: «Связь», 1980. 168 с.
- Грязин Г.Н. // Оптико-электронные системы для обзора пространства: системы телевидения. Л.: Машиностроение, Л.О., 1988, 224 с.
- Гуревич С.Б. //Теория и расчёт не вещательных систем телевидения. Л: «Энергия» ЛО, 1970. 236с.
- Гуревич И.Б. Анализ изображений как математическая задача, в кн. (Павлидис, 1986).
- Денисов Д.А., Низовкин В.А. Сегментация изображений на ЭВМ, «Зарубежная радиоэлектроника», №10, 1985, с. 5–30.
- Задков В.Н., Пономарёв Ю.В. Компьютер в эксперименте: Архитектура и программные средства систем автоматизации.–М.: Наука, Гл. Ред. Физ-Мат. лит., 1988.– 376 с.
- Здор С.Е., Широков В.Б. Оптический поиск и распознавание.–М.: Наука, 1973.–240 с.

- Зубов Ю.Б., Глориозов Г.П. // Передача изображений. – 2-е изд.–М.: Радио и Связь, 1989.– 336 с.
- Красильников Н.Н. // Статистическая теория передачи изображений. М. Связь, 1976. 184 с.
- Красильников Н.Н. // Теория передачи и восприятия изображений. Теория передачи изображений и её приложения.–М.: Радио и Связь, 1986.– 248 с.
- Краснов М.Л. Интегральные уравнения. Введение в теорию. – Гл. ред. Физ.-мат. лит. изд-ва «Наука», 1975. – 304 с.
- Кривошеев М.И. // Основы телевизионных измерений. 3-е изд. М Радио и Связь,. 1989. 608 с.
- Павлидис Т. Алгоритмы машинной графики и обработки изображений.–М.: Радио и Связь, 1986.–400 с.
- Прокофьева-Михайловская В.В., Стрыгин Н.З., Сухов П.П., Карпенко Г.Ф. Некоторые современные проблемы создания астрономических телевизионно-измерительных систем (АТВИС) для наблюдений за ИСЗ. Известия КрАО. Т. 103, №3, 2007, с. 238.
- Прэтт У. // Цифровая обработка изображений. М. Мир. 1982. Кн.2. 480 с.
- Путятин Е.П., Аверин С.И. // Обработка изображений в робототехнике. М., Машиностроение, 1990. 320 с.
- Пытьев Ю.П., Чуличков А.И. Прибор+ЭВМ = Новые возможности.–М.: «Знание», 1983.–64 с.– (сер. «Математика, кибернетика», №3).
- Пытьев Ю.П. Математические методы интерпретации эксперимента.– М.: Высш. Шк, 1989.– 351 с.
- Рейнгольд Э., Нивергельт Ю., Део Н. Комбинаторные алгоритмы. Теория и практика.–М.: «Мир», 1980.–498 с.
- Розенфельд А., Дейвис Л.С. Сегментация и модели изображений, ТИИЭР, т. 67, №5, май 1979, с. 71–81.
- Смирнов А.Я. // Математические модели передачи изображений. М. Связь, 1979. 96 с.
- Сондхи. Реставрация изображения: устранение пространственно-инвариантных искажений, «Обработка изображений при помощи цифровых вычислительных машин». Под ред. Г.Эндрюса и Л.Инло, М.: «Мир», 1973, сс. 137-152.
- Стрыгин Н.З., Сухов П.П., Карпенко Г.Ф. О корректности задач телевизионных измерений при наблюдениях ИСЗ, «Околоземная астрономия–2005», РАН ИНАСАН, Казань, 2005, с. 301–305.
- Фриден Б., Улучшение и реставрация изображений, сб. «Обработка изображений и цифровая фильтрация».– М.: «Мир», 1979.–320 с.
- Хант Б. Р. Цифровая обработка изображений, сб. «Применение цифровой обработки сигналов». Под ред. Э. Оппенгейма.–М.: «Мир», 1980.–552 с.
- Хесин А. Я. // Автоматический анализ качества телевизионного изображения. Рига. Зинатне. 1969. –164 с.
- Хуанг, Шрейбер, Третьяк. Обработка изображений, «Обработка изображений при помощи цифровых вычислительных машин». Под ред. Г.Эндрюса и Л.Инло, М.: «Мир», 1973, сс. 17–47.
- Хуанг Т. Введение /сб.: «Обработка изображений и цифровая фильтрация». Под ред. Т. Хуанга.–М.: «Мир», 1979.–320 с.
- Цапенко М.П. // Измерительные информационные системы. Структуры и алгоритмы, системотехническое проектирование. 2-е изд. М.: Энергоатомиздат. 1985. 440 с.
- Юдин Д.Б., Юдин А.Д. // Число и мысль. Вып. 8 (Математики измеряют сложность). М., Знание, 1985. 192 с.
- Groth E.J. A Pattern Matching Algorithm for Two-Dimensional Coordinate Lists, “The Astronomical Journal”, v. 91, № 5, May, 1986, p.p. 1244–1248.
- Hufnagel R.E. and Stanley N.R. “Modulation Transfer Function Associated with Image Transmission through Turbulent Media”, Journ. Opt. Soc. Amer.; Vol. 54, pp. 52-61, Jan. 1964.
- Valdes F.G., L. Campusano E., Velasquez J.D., Stetson P.V., FOCAS Automatic Catalog Matching Algorithms, “Publications of the Astronomical Society of the Pacific”, v. 107, Nov., 1995, p.p. 1119–1128.
- Young Ian T. Modern Digital Image Analysis, “ICASSP’89: Int. Conf. Accoust., Speech and Signal Process., Glasgow, 23–26 May, 1989”, New-York (N. Y.), 1989, v. 3, pp. 1696–1702.