МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

А.Л. Андреев

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ВИДЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Учебное пособие



Санкт-Петербург 2011 Андреев А.Л. Автоматизированные видеоинформационные системы. – СПб: НИУ ИТМО, 2011. – 120 с.

Рассмотрены общие принципы построения автоматизированных видеоинформационных систем (ABC) различного типа и назначения. Проведен анализ наиболее часто используемых алгоритмов цифровой обработки изображений в ABC, решающих задачи автоматического обнаружения, распознавания и оценки параметров объектов наблюдения. Даны примеры, иллюстрирующие практическое использование некоторых алгоритмов в конкретных ABC. Рассмотрены методы компьютерного моделирования, с целью определения обоснованных требований к отдельным звеньям системы, а также выявления оптимальных параметров решающих правил.

Учебное пособие предназначено для студентов по направлению подготовки бакалавров и магистров 200400 – «Оптотехника» и по специальности 200401 - "Электронные и оптико-электронные приборы и системы специального назначения".

Рекомендовано к печати Ученым советом ФОИСТ, от 8 ноября 2011 г., протокол № 10.



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2011 ©А.Л. Андреев, 2011

Содержание

Содержание	3
Введение	5
1 Общие сведения об АВС. Основные понятия и определения	7
1.1 Виды параметров и характеристик АВС	7
1.2 Основные этапы проектирования и реализации АВС	8
1.3 Общие особенности представления и основные этапы	9
1.4 Способы организации взаимодействия между первичными	[
формирователями сигналов изображения и цифровыми вычислительными	[
устройствами в АВС	11
1.5 Структура устройства предварительной обработки. Назначение и работа	ι 1 /
1 с Станитика бильства раско интерестрание и станити (ГРУ). Царианание и	.14
1.6 Структура буферного запоминающего устроиства (БЗУ). Назначение и	17
работа его функциональных узлов	1/
1./ Принципы реализации узлов сопряжения датчиков видеоинформации с	
ЦВУ, используемые в АВС	20
1.7.1 Программный обмен данными	21
1.7.2 Режим ввода (вывода) данных по прерыванию	22
1.7.3 Режим прямого доступа к памяти	27
2 Алгоритм предварительной обработки изображения	30
2.1 Алгоритмы определения интегральных параметров	34
2.2 Дифференциальные алгоритмы обработки изображений	35
2.3 Алгоритмы трансформирования исходных изображений	38
3 Методы обнаружения, распознавания и измерения параметров объектов	6
наблюдения	42
3.1 Обнаружение объектов	42
3.1.1 Внутрикадровая обработка сигналов в задаче обнаружения	42
3.1.2 Межкадровая обработка сигналов в задаче обнаружения подвижных	
объектов	47
3.1.3 Совместное использование процедур межкадровой и внутрикадровой	[
обработки сигнала в задаче обнаружения подвижных объектов	52
3.2 Идентификация и классификация обнаруженных объектов	56
3.2.1 Способ прямого сравнения изображения объекта с эталонным	[
изображением	56
3.2.2 Корреляционный метод	57
3.2.3 Метолы распознавания, основанные на использовании системы	 (
признаков	58
3.3 Об измерении параметров объектов наблюления	64
3.4 Метолы молелирования на этапе проектирования ABC	67
3.4.1 Общие принципы реализации компьютерной молели АВС	68
3.4.2 Предпосылки моделирования сигнально-фоновой ситуации	
предопределяющей условия функционирования АВС	72
предепределлющен условия функционирования и во	14

3.4.3 Моделирование влияния оптической системы, фотоприёмного	
устройства и процедуры первичной обработки сигнала 74	4
3.4.4 Моделирование источников внутренних помех	5
3.4.5 Моделирование процесса квантования сигнала в АЦП	8
4 Примеры построения автоматизированных видеоинформационных систем	
	0
4.1 Оптико-электронные системы астроориентации и астронавигации 8	0
4.1.1 Обнаружение и селекция рабочих астроориентиров	1
4.1.2 Опознавание участка звёздного неба	2
4.1.3 Измерение угловых координат опорной звезды	б
4.2 Принципы построения обучаемых АВС	4
4.2.1 Применение алгоритма обучения в оптико-электронном угломере 94	4
4.2.2 Принцип построения обучаемой телевизионной системы для	
автоматизации контроля заготовок микросхем	0
Заключение	б
Литература	7
Приложение	8

Введение

Понятие «Автоматизированные видеоинформационные системы» (АВС) включает в себя очень широкий спектр оптико-электронных систем с многоэлементными анализаторами изображения, предназначенных для решения самых разнообразных задач, так или иначе связанных с наблюдением за объектами. Общей принципиальной особенностью АВС в отличие от других видов видеоинформационных систем телевизионного является ИХ способность функционировать без типа участия человека-оператора, т.е. полностью в автоматическом режиме на основе заранее определённых (на этапе разработки системы или на этапе её обучения) решающих правил. В таких системах визуальное представление информации на экране не является обязательным, хотя оно и может использоваться как дополнительная функция.

Научной основой для проектирования ABC является теория статистических решений, включающая в себя, как известно, три основных раздела: теорию двуальтернативных решений (задачи обнаружения объектов), теорию многоальтернативных решений (задачи распознавания образов), теорию оценки параметров (задачи измерения параметров объектов и их положения в пространстве).

В соответствии с характером решаемых задач ABC можно подразделить на три группы: ABC обнаружения, ABC распознавания, ABC измерения параметров и пространственного положения объектов. Очевидно, что в рамках каждой группы могут быть представлены самые различные по назначению и областям применения системы. Некоторые из них в качестве примера приведены ниже на классификационной схеме (рис. 1.1).

Учитывая невозможность подробного рассмотрения огромного числа видов ABC, используемых практически во всех областях современной жизни, в начале уделим внимание наиболее общим вопросам, касающимся разработки аппаратных и программных средств практически любой ABC независимо от её типа и назначения. В дальнейшем, на примере нескольких наиболее интересных видов ABC проведём иллюстрацию практического применения рассмотренных приёмов и этапов проектирования.



1 Общие сведения об АВС. Основные понятия и определения

1.1 Виды параметров и характеристик АВС

При составлении технического задания на разработку какой-либо ABC, а также технических условий её применения необходимо сформулировать ряд основных параметров и характеристик, к числу которых относятся следующие.

Точностные параметры и характеристики (характеристики обнаружения, распознавания).

Применительно к измерительным системам здесь обычно идёт речь о среднеквадратических или предельных погрешностях измерения, о стабильности метрологических параметров и т. п.

Применительно к системам, решающим задачи обнаружения или распознавания объектов, обычно указываются такие параметры как допустимая вероятность ложного обнаружения (ложной идентификации) и, наоборот, вероятность пропуска (неопознавания) объектов при условии его нахождения в зоне наблюдения. В качестве характеристик обнаружения используются, зависимости правильного (распознавания) например, обнаружения (распознавания) отношения сигнал/шум ОТ (при фиксированных значениях допустимой вероятности ложного обнаружения, ложной идентификации) и др.

Функциональные параметры

Число и вид измеряемых величин (или объектов наблюдения), диапазон измеряемых величин, время измерения (обнаружения или распознавания объектов), готовность к работе после включения, степень автоматизации контроля выходных величин и др.

Эксплуатационные параметры

Температурный диапазон, допустимый уровень механических воздействий (ударов, вибраций), надёжность системы, возможность её адаптации или самоадаптации при изменении условий наблюдения. Габариты, масса, потребляемая мощность и др.

Экономические показатели.

Стоимость отдельных компонентов и системы в целом, степень их унификации и др.

Примечание. Следует напомнить, что под параметром понимают численное значение какой-либо величины, отражающей определённое качество системы (например, среднеквадратическая погрешность измерения); характеристика представляет собой зависимость того или иного параметра от изменения одного из внешних факторов (например, зависимость среднеквадратической погрешности от температуры).

1.2 Основные этапы проектирования и реализации АВС

Процесс проектирования и создания АВС можно разбить на следующие этапы.

1. Формулировка задачи на основе анализа технического задания. Определение исходных данных, входных воздействий и тактико-технических требований, предъявляемых к системе.

2. Анализ известных технических решений и выбор на их основе общей структуры разрабатываемой системы.

3. Выбор и обоснование оптической схемы.

4. Выполнение габаритно-энергетического расчёта, в результате которого должен быть выбран тип приёмников оптического излучения, определены параметры оптической системы и других специфических узлов ABC.

5. Выбор и обоснование математического метода обработки сигналов, используемого в разрабатываемой системе на основе анализа его характеристик по заданному критерию. Расчёт и оптимизация отдельных параметров. Следует заметить, что на этом этапе весьма эффективным средством может служить математическое моделирование входных воздействий, передаточных характеристик отдельных звеньев и возможных алгоритмов обработки аналоговых и цифровых сигналов в проектируемой ABC (см. раздел 3.4).

6. Детальная разработка будущего алгоритма, включая определение состава операций, операндов и констант, а также способа обмена данными между ЦВУ и другими узлами системы.

На последующих этапах могут параллельно выполняться работы по проектированию и реализации аппаратной и программной частей (табл. 1).

гаолица г		
№ этапа	Разработка аппаратной	Разработка программной
	части	части
7	Определение состава	Выбор типа ЦВУ
(уточнение	устройств предварительной	(микроконтроллера,
структуры)	(допроцессорной)	микропроцессора) на
	обработки сигналов.	основе анализа условий
	Разработка структурной	сопряжения с другими
	схемы устройства	звеньями с учётом
	сопряжения ЦВУ с другими	возможности выполнения
	узлами АВС.	требуемых операций по
		обработке сигналов за
		ограниченное время
		анализа.
8	Разработка функциональной	Разработка и отладка
(детализация)	схемы устройства	рабочей программы

Таблица 1

	сопряжения с ЦВУ.	алгоритма на
		одном из возможных
		языков программирования.
		Моделирование и
		редактирование
		программы.
9	Определение	Определение количества
(определение	эксплуатационных	микроопераций, операндов
аппаратурных	характеристик	и констант, а также
И	надёжности, потребляемой	необходимых объёмов
вычислительн	мощности, габаритов,	памяти ОЗУ
ых затрат)	степени унификации и т.п.	и ПЗУ.
	Принятие решения о	Принятие решения о
	необходимости	необходимости
	корректировки предыдущих	корректировки
	этапов.	предыдущих этапов.
10	Разработка принципиальной	Трансляция рабочей
(разработка	схемы устройства	программы в машинные
основной	сопряжения и других узлов	коды
документации	аппаратной части АТСН.	используемого ЦВУ
и рабочей	Разработка	(микроконтроллера).
программы)	конструкторской	
	документации.	
11	Изготовление аппаратной	Занесение рабочей
(изготовление	части разработанной АВС.	программы в ПЗУ.
компонентов		
ABC)		

12. Отладка в процессе совместной работы аппаратной и программной частей АТСН, проведение её испытаний.

13. Составление технических условий, инструкции по эксплуатации и другой выходной документации.

1.3 Общие особенности представления и основные этапы

преобразования сигналов в АВС различного типа и назначения

Во всех ABC, независимо от их типа и назначения, на начальном этапе предполагается преобразование аналоговых входных оптических сигналов в совокупность дискретных электрических сигналов, пригодных для осуществления дальнейшей цифровой обработки изображений с применением средств вычислительной техники. Такое преобразование осуществляется в два этапа.

На первом этапе входной оптический сигнал от наблюдаемых объектов с помощью оптической системы преобразуется в изображение,

представляющее собой в общем случае двумерную непрерывную функцию непрерывных пространственных аргументов E(x,y).

Оптическая система ОЭС в первом приближении рассматривается как линейное входное звено с пространственной импульсной характеристикой g(x,y) – весовой функцией объектива в виде гауссоиды вращения.

$$g(x, y) = \frac{1}{2\pi R^2} \exp\left[-\frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{2R^2}\right],$$
(1.1)

где R – радиус кружка рассеяния объектива, определяемый на уровне 0,606 $(1/\sqrt{e})$; x_0 , y_0 – координаты центра пятна рассеяния.

Преобразование входного сигнала оптической системой и формирование изображения на чувствительной площадке фотоприёмного устройства (ФПУ) можно представить следующим образом [1]

$$E_{_{Bblx}}(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_{_{BX}}(u, v) g(x - u, y - v) du dv.$$
(1.2)

На следующем этапе входной оптический сигнал изображения E(x,y), представляющий собой в общем случае двумерную непрерывную функцию непрерывных пространственных аргументов (координаты x, y), преобразуется в электрические сигналы $U(x_i, y_j)$, то есть в двумерную непрерывную функцию дискретных пространственных аргументов x_i, y_i .

 $E(x,y) \Longrightarrow U(x_i, y_j).$

Сигнал $U(x_i, y_j)$ представляет собой видеоимпульсы, на выходе матричного фотоприёмника (например, матрица ФПЗС, фотодиодная матрица или КМОП-матрица).

Заметим, что, если в телевизионном датчике используется так называемая «трубка бегущего луча» или любая другая вакуумная трубка, дискретизация изображения по вертикали (вдоль направления кадровой развёртки) происходит за счет структуры растра. При этом необходимая дополнительная дискретизация по горизонтали (вдоль строки) может достигаться путём применения специальной схемы выборки-хранения.

Для фотоприемника с накоплением энергии (например, матрица ФПЗС) величина напряжения сигнала видеоимпульса, снимаемого с *i*-того элемента *j*-той строки, определяется выражением

$$U(x_i, y_j) = \int_{x_i - \Delta x}^{x_i + \Delta x} \int_{y_i - \Delta y}^{y_i + \Delta y} S T_H E(x, y) \, dx dy.$$
(1.3)

Здесь S – интегральная чувствительность фотоприёмника, выраженная через экспозицию; $T_{\rm H}$ – время накопления; x_i , y_i – координаты центра фоточувствительного элемента; Δx и Δy – размеры фоточувствительного элемента по горизонтали и вертикали соответственно.

Третий этап преобразования осуществляется с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Он заключается в квантовании

сигналов $U(x_i, y_j)$ по уровням и формировании двоичных кодов соответствующих чисел:

 $U(x_i, y_i) \Rightarrow [E_{i,i}].$

Таким образом, в любой ABC цифровой обработке изображений должны предшествовать преобразования входного оптического сигнала E(x,y) в матрицу $[E_{i,j}]$, представляющую собой двумерный массив целых чисел. Очевидно, что всякое преобразование сигналов с помощью АЦП связано с нелинейными искажениями и появлением погрешности квантования, которую можно считать распределённой по равномерному закону в пределах $\pm h/2$, где h – шаг квантования. Однако величина погрешности квантования при достаточной разрядности АЦП может быть значительно меньше других составляющих.

1.4 Способы организации взаимодействия между первичными формирователями сигналов изображения и цифровыми вычислительными устройствами в ABC

В зависимости от области применения и условий работы ABC могут содержать различное число формирователей сигналов изображения (чаще всего телевизионных, а также тепловизионных или др.), в их структуре могут использоваться специальные устройства кодирования, уплотнения и записи видеоинформации, аналоговые и цифровые мультиплексоры, демультиплексоры и т.п. Состав аппаратных средств ABC в каждом случае довольно специфичен, некоторые конкретные примеры будут рассмотрены ниже. Однако следует выделить два основных принципа построения архитектуры ABC, принципиально различающихся способами сопряжения телевизионного датчика с цифровым вычислительным устройством (ЦВУ) (рис 1.2).



Рисунок 1.2 – Варианты сопряжения телевизионного датчика с вычислительным устройством: при программном режиме обмена (а), при обмене в режиме прямого доступа к памяти (б). Первый способ (рис. 1.2а) заключается в использовании режима программного ввода видеоинформации в вычислительное устройство.

Сигнал от телевизионного датчика (ТД) поступает в устройство предварительной обработки (УПО). Здесь осуществляется «привязка» уровня видеосигнала, его необходимое усиление, с целью оптимального преобразование АЦП, видеоимпульсов согласования с И в последовательность цифровых двоичных кодов. С выхода УПО двоичные коды поступают в буферное запоминающее устройство (БЗУ), где виде массива данных. Посредством накапливаются устройства В ввода-вывода (УВВ) данные, накапливаемые в БЗУ, могут пересылаться в оперативную память цифрового вычислительного устройства (ЦВУ) и подвергаться дальнейшей обработке соответствии В c запрограммированным алгоритмом. Таким образом, БЗУ служит для обеспечения условий независимой работы телевизионного датчика и ЦВУ, функционирующих до начала передачи данных в асинхронном режиме.

необходимости очередного При ввода кадра, которая инициализируется программой, по соответствующей команде УВВ передаёт в БЗУ сигнал «Сброс». После завершения очередного цикла накопления массива данных БЗУ должно подтвердить свою готовность к обмену, передав через УВВ ответный сигнал «требование адреса» (ТА). Тогда ЦВУ в соответствии с разработанной программой выполняет определённое число пересылок данных из БЗУ в собственную оперативную память, запрашивая при этом через УВВ нужные адреса ячеек памяти, из которых осуществляется чтение накопленной информации. Каждая пересылка сопровождается синхронизирующим сигналом «Ввод данных» (ВД), поступающим в БЗУ.

Основное достоинство вышерассмотренного способа сопряжения ТД с ЦВУ заключается в чрезвычайной гибкости алгоритма передачи данных, который в случае необходимости можно легко изменять даже в процессе функционирования ABC чисто программным путём. Кроме того, для реализации процесса обмена данными, как правило, удаётся использовать в основном стандартные средства УВВ (порты ввода-вывода), входящие в состав ЦВУ и лишь некоторые дополнительные элементы (регистры для хранения текущих значений адреса и данных, триггер, сигнализирующий о состоянии готовности внешнего устройства).

Недостатком является необходимость ожидания готовности БЗУ к передаче данных. Причём, это время иногда может быть соизмеримо со временем обработки изображения.

Одной из разновидностей программного ввода данных является *ввод данных в режиме прерывания* основной выполняемой программы. В этом случае процедура ввода также осуществляется ЦВУ под программным управлением, однако, процедура ввода инициализируется не программой, а каким-либо внешним устройством, например УПО или самим БЗУ. Ввод

данных в режиме прерывания позволяет избежать необходимости ожидания готовности БЗУ, связанного с непроизводительной потерей времени ЦВУ.

Второй способ (рис.1.2б) предполагает реализацию режима *прямого доступа* к оперативной памяти ЦВУ без использования БЗУ. В этом случае процессор ЦВУ как бы временно отключается, а функции по вводу данных в ЦВУ выполняет специальный блок сопряжения (БС). Перед началом цикла ввода БС вырабатывает сигнал «требование прямого доступа» (ТПД). По этому сигналу ЦВУ заканчивает очередное обращение к памяти и посылает в БС ответный сигнал «предоставление прямого доступа» (ПДП). Сразу после этого БС начинает передавать данные, поступающие с УПО непосредственно в оперативную память ЦВУ, формируя при этом адреса ячеек оперативной памяти. Кроме того, БС осуществляет регенерацию памяти ЦВУ. После завершения ввода БС снимает состояние прямого доступа и вновь передаёт управление оперативной памятью процессору ЦВУ.

В режиме прямого доступа достигается предельное быстродействие системы при передаче данных от ТД в ЦВУ, однако это достигается за счет некоторого усложнения аппаратной части и применения более жёсткого алгоритма обмена. Более подробно особенности различных способов спряжения телевизионных датчиков с вычислительным устройством будут рассмотрены ниже при изучении соответствующих аппаратных средств.

В качестве первичных формирователей видеосигнала в современных АВС используются в основном телевизионные датчики двух видов на основе ПЗС и КМОП структур. Каждый из этих видов многоэлементных фотоприёмных устройств (ФПУ) обладает своими достоинствами и ограничениями, которые необходимо учитывать при оптимизации выбора проектируемой компонентов системы. Более подробно вопросы. касающиеся особенностей функционирования телевизионных датчиков на ПЗС и КМОП структурах, рассматриваются в специальных дисциплинах приёмники («Источники излучения», «Элементная база И оптико-электронных приборов» и др.). Там же значительное внимание помех, действующих уделяется источникам в формирователях видеосигнала и способам их возможной коррекции.

практике Следует отметить. что В проектирования автоматизированных видеоинформационных систем самого различного назначения сегодня имеется возможность использования готовых телевизионных модулей, специально выпускаемых для встраивания в различные конструктивные решения. К таким модулям в частности относятся бескорпусные одноплатные камеры на базе различных твёрдотельных матричных ФПУ [1]. Это, естественно, может значительно упростить и ускорить реализацию аппаратных средств и конструкции разрабатываемых систем. Учитывая вышесказанное, остановимся ниже

13

более подробно на структуре других функциональных узлов, входящих в состав архитектуры АВС различного типа и назначения.

1.5 Структура устройства предварительной обработки. Назначение и работа его функциональных узлов

Основная функция устройства предварительной обработки И (УПО) преобразование кодирования видеосигнала, цифрового _ представляющего последовательность собой видеоимпульсов, соответствующих освещённостям в анализируемых точках изображения, в адекватные значения кодов двоичных чисел. Кроме АЦП в составе УПО должны быть дополнительные аппаратные средства, обеспечивающие согласования оптимального параметров видеосигнала **УСЛОВИЯ** с параметрами АЦП независимо от содержания кадра (рис 1.9).



Рисунок 1.9 – Структурная схема устройства предварительной обработки видеосигнала

Входной сигнал $U_0(t)$ с выхода ТД поступает на вход видеоусилителя (ВУ) с регулируемым коэффициентом усиления. Основное назначение ВУ – масштабирование, то есть обеспечение размаха видеосигнала (от минимального уровня «чёрного» до максимального уровня «белого») приблизительно равного динамическому диапазону допустимых входных сигналов АЦП. Управление ВУ осуществляется посредством пикового детектора (ПД). Он измеряет максимальное (пиковое) напряжение сигнала на входе АЦП и устанавливает такое значение коэффициента усиления, при котором максимальный уровень напряжение видеосигнала в кадре почти совпадает с верхним допустимым уровнем напряжения на входе АЦП. Отметим, что в некоторых случаях при необходимости оценки абсолютной освещённости в анализируемых точках изображения вместо ПД в УПО может использоваться ручная установка оптимального постоянного коэффициента усиления.

С выхода ВУ на вход АЦП видеосигнал поступает через фиксатор уровня (ФУ), обеспечивающий «привязку» нижнего уровня напряжения видеосигнала к нижнему уровню динамического диапазона АЦП.

Необходимость использования ФУ обусловлена тем, что в видеосигнале, поступающем на вход УПО, обычно отсутствует информация о постоянной составляющей, и абсолютное значение напряжений, соответствующих «белому» и «чёрному» может сильно зависеть от содержания кадра, а, точнее, от процентного соотношения количества светлых и тёмных элементов в кадре. Принцип работы ФУ поясняет рисунок 1.10.



Рисунок 1.10 – К пояснению принципа работы фиксатора уровня

На рисунке 1.10а показаны два примера изображений, содержащих малоразмерный объект, на рисунке 1.106 – соответствующие им осциллограммы видеосигналов выбранной строки. Как видно из этих примеров, даже при одинаковых уровнях освещенности вследствие потери постоянной составляющей видеосигнала на выходе ВУ, содержащего разделительные конденсаторы, в обоих случаях наблюдаются различные значения напряжений (среднее значение напряжения *U1(t)* равно нулю). Это может привести к последующему неправильному кодированию значений освещённости в точках изображения при формировании двоичных кодов с помощью АЦП. На выходе ФУ видеосигналы имеют более правильный вид (см. рис. 1.10в).

Основными элементами ФУ (рис. 1.10г) являются конденсатор $C_{\phi \mu \kappa c}$. и электронный ключ, управляемый строчными синхронизирующими импульсами (ССИ). Буферные каскады (БК1 и БК2) должны обладать большими входными и малыми выходными сопротивлениями. Это обеспечивает оптимальные условия согласования ФУ с ВУ и АЦП (рис.1.9).

Под воздействием ССИ электронный ключ замыкается на короткое время, предшествующее активной части периода опроса элементов строки (активной части периода строчной развёртки). Важно отметить, что во время замыкания ключа осуществляется опрос (сканирование) специально затемненных (пассивных) элементов фотоприемника, используемых для получения сигнала так называемого «уровня чёрного». При этом правая обкладка конденсатора Сфикс. оказывается подключенной к той точке схемы, на которой установлено выбранное напряжение фиксации видеосигнала «уровня чёрного» ($U_{\phi \mu \kappa c}$). При необходимости в качестве напряжения $U_{\phi \mu \kappa c.}$ может быть выбрано положительное, отрицательное или путем соответствующей установки нулевое значение лвижка потенциометра, подключенного к источникам опорных напряжений $+U_{on}$. или $-U_{_{OII}}$. На левую обкладку конденсатора $C_{_{\phi икс.}}$ в это время воздействует напряжение «уровня чёрного» (см. рис. 1.10б). Таким образом $C_{\phi \mu \kappa c.}$ быстро перезаряжается (через малое выходное сопротивление БК1 и ещё меньшее сопротивление замкнутого ключа) под воздействием разности потенциалов на его обкладках. Постоянная времени заряда $t_{3} \approx R_{\text{вых} \cdot \text{БK1}} \times C_{\text{фикс.}}$

После завершения ССИ электронный ключ размыкается, и изменение напряжения на правой обкладке конденсатора практически повторяет изменение формы входного видеосигнала U1(t) во время опроса активных элементов строки, но это происходит на фоне постоянной составляющей напряжения $U_{\phi \mu \kappa c.}$, которое в нашем примере установлено равным нулю (см. U2(t), рис. 1.10в). Для правильной работы ФУ необходимо, чтобы постоянная времени разряда $t_p \approx R_{\text{вх.БК2}} \times C_{\phi \mu \kappa c.}$ после размыкания ключа была бы значительно (на 2 – 3 порядка) больше t_3 . Это возможно при

правильном выборе ёмкости $C_{\phi \mu \kappa c.}$ и благодаря высокому входному сопротивлению БК2.

Изменяя напряжение $U_{\phi \mu \kappa c.}$, можно перемещать осциллограмму видеосигнала вверх или вниз по вертикали, добиваясь его оптимального спряжения с динамическим диапазоном АЦП. Другими словами, с помощью указанной регулировки можно изменять абсолютные значения видеосигнала, сохраняя его форму неизменной. Конденсатор $C_{on.}$ должен обладать, насколько это возможно, большой ёмкостью ($C_{on.} >> C_{\phi \mu \kappa c.}$). Заряжаясь до напряжения $U_{\phi \mu \kappa c.}$, $C_{on.}$ выполняет роль вторичного источника напряжения фиксации видеосигнала.

1.6 Структура буферного запоминающего устройства (БЗУ). Назначение и работа его функциональных узлов

Как было сказано выше, БЗУ может входить в состав ABC с целью обеспечения условий независимой работы ТД и ЦВУ, а также достижения максимальной гибкости алгоритма программного управления процессом передачи данных от УПО к ЦВУ. В состав любого БЗУ кроме микросхем памяти должны входить функциональные узлы, необходимые для организации процесса передачи данных, включая формирование адресов ячеек памяти. Переключение режима работы БЗУ осуществляется ЦВУ через специальный контроллер связи.

На рисунке 1.11 приведена структурная схема БЗУ, для накопления информации о целом кадре изображения.

накопления данных B режиме входной сигнал В виде последовательности двоичных кодов (с разрядностью n_a) поступает с выхода АЦП на коммутатор данных, а через него на вход данных микросхем памяти. Адреса ячеек памяти, в которые осуществляется запись, формируются двоичными счётчиками столбцов и строк, на входы которых от синхрогенератора телевизионного датчика подаются соответственно тактовые импульсы опроса элементов, и строчные синхроимпульсы. Кроме того, строчные синхроимпульсы используются в качестве сигнала сброса, обнуляющего счетчик столбцов после завершения опроса элементов данной строки. В качестве сигнала сброса счётчика строк используются кадровые синхроимпульсы, также поступающие в БЗУ от синхрогенератора телевизионного датчика. Таким образом, на выходах счётчиков в каждый момент времени присутствуют двоичные коды номера элемента в строке (то есть код номера столбца с разрядностью n_x) и номера строки (с разрядностью n_v). Каждая пара кодов (с суммарной разрядностью $n_a = n_x + n_v$) образует двоичный адрес ячейки памяти, в которую заносится текущее значение сигнала. Через коммутатор адресов такой адрес, сформированный счётчиками, поступает на адресные входы микросхем памяти.

17



Рисунок 1.11 – Структурная схема БЗУ для записи целого кадра изображения.

При передаче накопленных данных в ЦВУ с помощью устройства управления осуществляется перевод микросхем памяти из режима записи в режим считывания. Одновременно устройство управления переключает коммутаторы данных и адресов таким образом, что входы данных и адресов микросхем памяти оказываются соединенными с контроллером, обеспечивающим сопряжение БЗУ с ЦВУ. В режиме передачи данных адреса ячеек памяти, из которых осуществляется считывание информации, формируются уже не счетчиками, а подпрограммой обмена, хранящейся в ЦВУ (т.е. синхронно с работой ЦВУ). Очевидно, что адреса двоичных кодов чисел, хранящихся в ячейках памяти, однозначно связаны с координатами соответствующих им элементов изображения.

На рисунке 1.12 показан другой вариант построения БЗУ, в котором накапливается информация лишь о тех элементах анализируемого

изображения, видеосигнал с которых превышает установленный порог (уровень фона).



Рисунок 1.12. Структурная схема БЗУ для записи освещенных элементов изображения.

При наблюдении, например, за малоразмерными или точечными объектами, когда имеет место значительная избыточность «пустых»

элементов в кадре, этот вариант может быть предпочтителен с точки зрения существенного сокращения объема и времени обработки данных.

Поскольку в данном случае осуществляется запись не полного кадра, а лишь его отдельных фрагментов, содержащих полезную информацию, то помимо двоичных кодов видеоимпульсов в БЗУ необходимо записывать и двоичные коды координат соответствующих элементов. В противном случае при обработке данных в ЦВУ невозможно было бы восстановить изображения и координаты наблюдаемых объектов. Поэтому в режиме накопления на вход микросхем памяти через коммутатор данных подаются для записи не только двоичные коды сигналов с выхода АЦП, но также двоичные коды номеров строк и столбцов с выходов счётчиков. Таким образом, суммарная разрядность записываемых данных равна $n_q + n_x + n_y$.

Через соответствующий коммутатор на адресные входы микросхем памяти поступают двоичные коды, формируемые счётчиком сигнальных элементов. Этот счетчик изменяет своё состояние каждый раз, когда значение двоичного кода на выходе АЦП отлично от нуля. При соответствующей настройке ФУ (см. раздел 1.9), логическая схема «ИЛИ» выполняет функцию своеобразного индикатора сигнала, превышающего установленный порог.

Считывание накопленных данных (содержащих в данном случае и информацию о координатах «сигнальных» элементов), передача данных в ЦВУ осуществляется также, как и в БЗУ, рассмотренном выше (рис. 1.11).

В состав контроллера сопряжения может входить также специальный триггер (на рисунках не показан), используемый для сигнализации о состоянии готовности БЗУ к передаче данных после завершения полного цикла накопления информации об изображении.

1.7 Принципы реализации узлов сопряжения датчиков видеоинформации с ЦВУ, используемые в АВС

Состав и структура аппаратных средств, используемых для сопряжения ЦВУ с другими, внешними по отношению к нему, функциональными узлами (ТД, БЗУ и др.), в значительной степени предопределяется выбранным способом организации взаимодействия между ними (см. раздел 1.3). В общем случае любое внешнее устройство подключается к ЦВУ посредством специального блока – контроллера, который в свою очередь непосредственно связан с шинами адреса и данных, а также с линиями передачи управляющих сигналов (рис. 1.13).

Совокупность команд и управляющих сигналов, используемых при взаимодействии между ЦВУ и внешним устройством, называется протоколом обмена.

Аппаратные средства контроллера сопряжения совместно с протоколом обмена принято называть *интерфейсом*.



Рисунок 1.13. Иллюстрация общего принципа сопряжения ЦВУ с внешними устройствами

1.7.1 Программный обмен данными

В случае программного обмена данными между ЦВУ и внешним устройством функцию основных аппаратных средств сопряжения могут выполнять стандартные устройства ввода-вывода (порты ввода), входящие в состав вычислительного устройства. Кроме того, в составе контроллера сопряжения используются дополнительные буферные регистры для хранения текущих значений адреса и данных, а также триггер для сигнализации о состоянии готовности внешнего устройства.

На рисунке 1.14 показана блок-схема, поясняющая алгоритм программного обмена данными внешнего устройства с ЦВУ без использования режима прерывания.





В определённом месте основной программы, управляющей работой ЦВУ, предусматривается этап взаимодействия с каким-либо внешним устройством, например, БЗУ. При этом вначале осуществляется проверка наличия сигнала готовности внешнего устройства (выполнение команды JOT1 на рис. 1.14). Выполнение команды JOT1 может осуществляться многократно, до тех пор, пока не будет получен положительный ответ. конкретный Отметим, что ВИД сигнала готовности на выходе соответствующего триггера В контроллере сопряжения (состояние логической «1», логического «0» или момент переключение триггера из одного состояния в другое) определяется разработчиком при составлении протокола обмена.

После получения подтверждения о готовности внешнего устройства ЦВУ должно выполнять серию команд, обеспечивающих пересылку данных в нужном направлении, включая формирование адресов ячеек собственной оперативной памяти. Указанная серия команд условно обозначена на рисунке 1.14 одним оператором JOT2. После завершения процедуры обмена ЦВУ «сбрасывает» сигнал готовности внешнего устройства, переключая в исходное состояние соответствующий триггер в контроллере сопряжения (команда *JOT3*). Затем ЦВУ продолжает своей основной выполнение программы, включающей процедуру обработки полученных данных.

1.7.2 Режим ввода (вывода) данных по прерыванию

Как уже было сказано выше (см. раздел 1.3), иногда с точки зрения вычислительных более рационального использования ресурсов предпочтительным представляется режим ввода (вывода) данных по прерыванию. При этом процедура ввода (вывода) также может осуществляться ЦВУ, но под управлением специальной части программы, оформленной в виде подпрограммы обработки прерывания. Однако момент обмена данными заранее не определён. Начало начала обмена инициализируется не программой, а каким-либо внешним устройством, например, контроллером сопряжения, запрашивающим прерывание.

Прерывание основной программы, управляющей работой ЦВУ в составе ABC, становится возможным после выполнения команды *EI* – *разрешение прерываний* (рис. 1.15). Теперь, хотя ЦВУ и продолжает функционировать в соответствии с основной программой, выполнению каждой последующей команды предшествует *проверка наличия запроса прерывания*. Следует отметить, что эта процедура, обозначенная на блок-схеме оператором «ЗП?», выполняется процессором ЦВУ уже на аппаратном уровне в пределах командного цикла, и потому она практически не влияет на скорость обработки информации. Практически процедура проверки заключается в анализе сигнала на одном из специальных выводов процессора, который связан с соответствующим триггером контроллера сопряжения.

При наличии запроса прерывания от какого-нибудь внешнего устройства ЦВУ прекращает выполнение текущих команд основной программы и переходит к выполнению общей подпрограммы обслуживания прерывания.



Рисунок 1.15 – Блок-схема алгоритма обмена данными в режиме прерывания с опросом внешних устройств

В качестве первого шага подпрограммы обслуживания прерывания обычно используется команда DI – запрет прерываний (если только в системе не предусматривается более сложный режим так называемых вложенных прерываний, то есть прерываний внутри прерываний). Затем необходимо позаботиться о сохранении в специальной памяти – стеке содержимого аккумулятора (A) и некоторых регистров общего назначения (POH) ЦВУ, которые могут быть задействованы при выполнении подпрограммы обслуживания прерывания – ввода (вывода) данных.

Следующий этап – идентификация источника прерывания, то есть запросившего прерывание. Необходимость устройства, внешнего указанной процедуры возникает в тех случаях, когда источников прерываний может быть несколько, а для приёма запроса прерывания процессор располагает всего одним входом (или же число входов для приёма запросов прерываний меньше числа возможных источников). Как показано на рис 1.15, в приведённом примере задача идентификации источника прерывания решается чисто программными средствами, путём последовательного опроса всех имеющихся в системе внешних устройств (ВУ1, ВУ2, ВУ3 и т.д.). Если какое-либо внешнее устройство запросило прерывание, то ЦВУ переходит к частной подпрограмме обработки (обслуживания) именно этого устройства. В противном случае опрос продолжается.

Следует обратить внимание на то, что в приведенном примере наивысшим приоритетом обладает *BV1*, поскольку оно опрашивается первым, а самым низким – *BV3*. Это может иметь значение в случае одновременного запроса прерывания сразу несколькими устройствами. Очевидно, что при таком алгоритме обслуживание *BV*, имеющего более низкий приоритет будет возможно только после завершения обслуживания всех *BV*, обладающих более высоким приоритетом.

После завершения какой-либо частной подпрограммы обработки прерывания осуществляется восстановление из стека временно сохранённых там данных в аккумулятор и другие регистры. Затем выполняется команда *EI – разрешение прерываний* и происходит возврат к основной программе.

Описанный выше алгоритм обмена (за исключением формирования сигнала запроса прерывания) почти полностью реализуется на программном уровне. Поэтому структура контроллера сопряжения может быть достаточно простой. Как и в вышерассмотренном случае (см. п. 1.7.1), в составе контроллера, как правило, не требуется каких-либо специальных аппаратных средств, кроме буферных регистров и триггера для формирования сигнала запроса прерывания.

Однако при большом числе возможных источников прерывания процедура идентификации внешних устройств путем их последовательного опроса может приводить к заметной задержке взаимодействия ЦВУ с этими устройствами.

Другой разновидностью алгоритма обмена данными в режиме прерывания является алгоритм *прерывания по вектору*. Его отличие от вышерассмотренного состоит в том, что любое внешнее устройство, запросившее прерывание, само сообщает адрес первой команды соответствующей подпрограммы обслуживания (*вектор прерывания*). Упрощенная структурная схема контроллера для реализации такого алгоритма показана на рис. 1.16.

24

Запрос устройства (BY_i) прерывания ОТ і-того внешнего устанавливает триггер соответствующего *i*-того контроллера сопряжения в состояние логической «1». С выхода триггера напряжение высокого уровня (сигнал логической «1») поступает в общую (для всех *BV*) линию запроса прерывания, а также на правый вход правой схемы совпадения (рис. 1.16). Процессор ЦВУ посылает ответный сигнал в общую линию передачи сигнала подтверждения прерывания. Эта линия подключена к левым входам правых схем совпадения, расположенных в контроллерах каждого ВУ. Однако, очевидно, что лишь в контроллере *i*-того ВУ, запросившего прерывание, сигнал подтверждения проявится и на выходе правой схемы совпадения, поскольку на правый вход данной схемы также воздействует высокий уровень напряжения сигнала запроса прерывания с выхода триггера.



Рисунок 1.16 – Структурная схема, поясняющая работу контроллера при организации обмена в режиме прерывания по вектору.

Как показано на рисунке 1.16, выход правой схемы совпадения подключен к управляющему входу шинного формирователя, который образован группой электронных коммутирующих устройств. Число коммутирующих устройств равно числу разрядов шины данных. Каждое коммутирующее устройство, изображенное в виде треугольника, представляет собой повторитель сигнала, поступающего на его вход (основание треугольника). Однако на выходе коммутирующего устройства

(вершина треугольника) сигнал может появиться лишь при наличии на его управляющем входе, сигнала логической «1». Поскольку другом, управляющие входы группы коммутирующих устройств объединены в общую цепь управления шинного формирователя, то при наличии сигнала общую подтверждения прерывания шину данных предаётся В индивидуальный двоичный і-того BY. Этот двоичный код код. используемый ЦВУ в качестве косвенного адреса при обращении к подпрограмме обслуживания *i*-того *BV*, может быть «жестко» установлен, например, с помощью специальных перемычек на печатной плате контроллера.

Перейдя к подпрограмме обслуживания *i*-того ВУ, ЦВУ снимает сигнал подтверждения, формирует с помощью дешифратора сигнал выбора необходимую BY_i выполняет серию пересылок ланных И С соответствующего регистра контроллера сопряжения. Каждая пересылка синхронизируется микропроцессором ЦВУ путем передачи стробирующих импульсов, которые, проходя через левую схему совпадения, управляют работой второго шинного формирователя регистра данных. (Буферный регистр данных и буферный регистр адреса, необходимые для управления работой БЗУ, на рисунке 1.16 не показаны).

На практике при функционировании ABC запросы на обслуживание по прерыванию могут поступать почти одновременно от нескольких источников. Среди них, как правило, есть такие, которым должен быть предоставлен наивысший приоритет (например, сигнал об аварийном отключении электропитания, связанный с необходимостью использования резервного аккумулятора и др.).

Если идентификация источника прерывания осуществляется на программном уровне, то и распределение приоритетов определяется программой обработки прерывания, путем задания последовательности опроса *BV* (см. рис. 1.15). Однако при использовании аппаратных средств, обеспечивающих передачу «вектора» прерывания, целесообразно и задачу распределения приоритетов решать на аппаратном уровне, как, например, это показано на рисунке 1.17.

В ответ на поступивший запрос прерывания ЦВУ посылает ответный сигнал – подтверждение прерывания. Этот сигнал сначала попадает на схему прерываний внешнего устройства BY1 (упрощённый вариант структурной схемы контроллера прерываний по вектору показан на рис. 1.16), а также на нижний вход первой схемы совпадения. В том случае, если BY1 не запрашивало прерывания, на верхний инверсный вход схемы совпадения воздействует низкий уровень напряжения логического «0». При этом сигнал подтверждения появится на выходе той же схемы совпадения и поступит в аналогичную точку схемы прерываний внешнего устройства BY2, одновременно воздействуя на нижний вход второй схемы совпадения.

Сигал подтверждения прерывания будет передаваться по аналогичной цепочке и дальше, до тех пор, пока на его пути не встретится ВУ, запросившее прерывание. Схема контроллера сопряжения устройства, запросившего прерывание, предаёт на верхний инверсный ВХОЛ соответствующей схемы совпадения сигнал в виде логической «1», что и приводит к «разрыву» цепи дальнейшей передачи сигнала подтверждения прерывания. Таким образом, уровень приоритета в обслуживании каждого внешнего устройства определяется его порядковым номером в цепи распространения сигнала подтверждения прерывания. Очевидно, что для перераспределения уровней приоритетов между ВУ достаточно изменить схему соединений между контроллерами, по которым предаётся сигал подтверждения.



Рисунок 1.17 – Пример аппаратного решения задачи распределения приоритетов в обслуживании источников прерывания.

1.7.3 Режим прямого доступа к памяти

В режиме прямого доступа к памяти (ПДП) контроллер сопряжения берёт на себя все функции по организации процесса формирования и передачи данных. При этом процессор ЦВУ как бы отключается на всё время предоставления ПДП. Алгоритм обмена данными в режиме ПДП поясняет рисунок 1.18.

Обмен данных в режиме ПДП начинается по инициативе внешнего устройства (ВУ), которое в нужный момент времени устанавливает верхний триггер (рис. 1.18) в состояние логической «1». Сформированный таким образом *сигнал запроса ПДП* поступает на специальный вход устройства управления процессором (УУ) ЦВУ. Сигнал запроса ПДП вызывает прерывание процесса выполнения программы. Однако в данном случае (в отличие от режима обмена, рассмотренного в п. 1.7.2) отсутствует необходимость записи в стек содержимого внутренних регистров процессора, а также решения задачи идентификации источника прерывания.

Приняв запрос ПДП, процессор ЦВУ лишь завершает текущее обращение к ячейке памяти оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) и посылает ответный сигнал «*Paspeшeнue ПДП*». При этом УУ отключает внутренние регистры процессора (РА и РД) от соответствующих шин адреса и данных. Таким образом, ОЗУ остаётся подключенным только к регистрам РА и РД контроллера ПДП. Поскольку в общем случае направление передачи данных может изменяться, в составе контроллера ПДП имеется второй триггер (нижний, на рис. 1.18). Он также управляется внешним устройством и служит для выбора режима работы ОЗУ (*чтение/запись*).



С момента предоставления режима ПДП вся «ответственность» за процесс передачи данных, использование ОЗУ возлагается на контроллер ПДП. Формирование текущих адресов и данных осуществляется по «жёсткому» алгоритму посредством специальной схемы управления регистрами РА и РД. Кроме того, в режиме ПДП контроллеру сопряжения может передаваться функция регенерации памяти ОЗУ (вопросы, связанные с необходимостью регенерации ОЗУ, построенного на ячейках памяти динамического типа, будут рассмотрены ниже). После завершения обмена тригтер запроса ПДП переключается в исходное состояние, УУ вновь подключает внутренние регистры процессора к соответствующим шинам и ЦВУ продолжает выполнение прерванной программы.

Основное преимущество режима ПДП перед другими способами взаимодействия ЦВУ с внешними устройствами (см. п.п. 2.4.1, 2.4.2)

состоит в достижении предельного быстродействия системы, которое, по существу, определяется быстродействием используемого ОЗУ. Это особенно важно для ABC с телевизионными датчиками высокого разрешения, поскольку время передачи большого объёма видеоинформации в ЦВУ может быть соизмеримо со временем её обработки.

Однако реализация режима ПДП предполагает использование в составе контроллера сопряжения более сложных аппаратных средств. К тому же режим ПДП характеризуется меньшей гибкостью при необходимости изменения алгоритма передачи данных. В целом следует заметить, что все вышерассмотренные способы сопряжения ЦВУ с другими функциональными узлами ABC, рассмотренные в данном разделе, находят широкое применение на практике.

аппаратных ABC, B составе средства решающих задачи обработки предварительной видеосигнала, а также организации взаимодействия между телевизионными датчиками и ЦВУ, широко используются цифровые микросхемы различного уровня интеграции. В настоящее время появилась возможность реализации достаточно сложных функциональных узлов АВС на базе больших интегральных схем программируемой логики, обладающих сверхвысокой логической ёмкостью (СБИС ПЛ). С этой целью помимо самих СБИС создана уже новая стратегия проектирования, разработаны необходимые прикладные программные средства [2, 3].

Однако применение самых последних достижений в области микроэлектроники требует от разработчика понимания принципов функционирования более простых компонентов, её составляющих – комбинационных и последовательных логических схем, запоминающих элементов, шинных формирователей и др. Рассмотрению этих вопросов и уделяется основное внимание в следующих разделах.

Вопросы для самопроверки:

1. Каковы основные способы сопряжения телевизионных датчиков с ЦВУ, предопределяющие принцип построения архитектуры АТСН?

2. Дайте определения следующим понятиям: интерфейс, контроллер сопряжения, протокол обмена.

3. Что общего и в чём заключаются различия между чисто программным способом организации обмена данными между ЦВУ и внешним устройством и способом обмена в режиме прерывания основной программы?

4. Каковы достоинства и недостатки различных способов сопряжения телевизионных датчиков с ЦВУ?

5. Каковы функции устройства предварительной обработки видеосигнала? Назовите его основные узлы и их назначение.

6. Поясните принцип построения буферного запоминающего устройства (БЗУ) для записи полного кадра изображения и БЗУ для записи отдельных элементов изображения, содержащих информацию о малоразмерных объектах.

2 Алгоритм предварительной обработки изображения

Как уже было сказано выше, общей особенностью автоматизированных видеоинформационных систем является их способность функционировать без участия человека-оператора, т.е. в полностью автоматическом режиме на основе заранее определённых решающих правил.

Независимо характера решаемых задач ОТ (обнаружение, распознавание или измерение параметров объектов) в АВС, используются методы цифровой обработки изображений, реализуемые в реальном масштабе времени, т.е. со скоростью протекания реальных процессов. Указанное обстоятельство приходится учитывать как при выборе аппаратных средств, так и конкретных алгоритмов, используемых при обработке сигналов за ограниченное время анализа. Ниже без привязки к конкретным системам рассматриваются наиболее часто используемые алгоритмы цифровой обработки изображений. В четвёртом разделе приводятся конкретные примеры достаточно интересных видов ABC, иллюстрирующие практическое использование некоторых алгоритмов, а также этапов проектирования.

Процедура цифровой обработки изображений в АВС обычно включает два этапа:

– этап предварительной обработки массива [$E_{i,i}$];

– собственно целевой этап решения задачи обнаружения, распознавания или измерения параметров объектов наблюдения.

Такое разделение носит условный характер, так как одни и те же математические операции могут быть использованы на обоих этапах. Однако, обычно предварительная обработка изображений преследует, как минимум, одну из следующих целей:

– сокращение объёма информации, предназначенной для дальнейшей обработки;

– фильтрацию помех, затрудняющих последующую обработку;

– выделение признаков контролируемых объектов для упрощения дальнейшей процедуры распознавания.

Эти цели могут быть достигнуты следующими способами:

– путём перехода от кодирования сигналов всех элементов изображения к кодированию сигналов центральных точек «окна» из пґп элементов с последующей интерполяцией сигналов остальных элементов «окна» в соответствии с заданной функцией изменения освещенности;

 уменьшением числа уровней квантования видеосигнала (в предельном случае до 2-х) с учётом информативности отдельных участков или изображения в целом;

– использованием дифференциальных алгоритмов выделения контуров в изображении объекта;

30

использованием интегральных алгоритмов обобщенного описания изображения;

 применением методов трансформирования двумерных массивов исходных изображений в двумерные массивы коэффициентов на основе ортогональных преобразований и др.

Рассмотрим некоторые из указанных способов предварительной обработки изображений.

Простой пороговый метод нелинейной фильтрации импульсных помех

Сигнал от каждого из элементов массива [Ei,j] анализируемого изображения сравнивается со средним значением сигнала для небольшой группы mfn в окрестностях данного элемента

$$\overline{E}_{i,j} = \frac{\sum_{k=-(m-1)/2}^{(m-1)/2} \sum_{l=-(n-1)/2}^{(n-1)/2} E_{(i+k),(j+l)}}{m \cdot n}$$
(2.1)

Здесь m и n – нечётные числа. Если значение сигнала Ei, j, превышает $\overline{E}_{i,j}$ на заданную пороговую величину ξ , то значение сигнала заменяется на среднее значение сигнала группы. Если – нет, то сохраняется прежнее значение. Таким образом, формируется новый массив

$$E^{*}_{i,j} = \begin{cases} \overline{E}_{i,j}, \operatorname{пр} \mathfrak{u} : E_{i,j} \ge \overline{E}_{i,j} + \xi \\ E_{i,j}, \operatorname{пp} \mathfrak{u} : E_{i,j} < \overline{E}_{i,j} + \xi \end{cases},$$
(2.2)

в котором устранены одиночные «выбросы», т.е. помехи, некоррелированные с соседними элементами.

Анизотропная фильтрация

Анизотропная фильтрация относится к категории линейных процедур цифровой обработки массива $[E_{i,j}]$. Это более совершенный, теоретически более обоснованный, но вместе с тем и более сложный алгоритм пространственной фильтрации. Он заключается в выполнении операции свертки исходного массива изображения формата $M \times N$ со скользящим сглаживающим массивом [W] меньшего формата $m \times n$ (ядро свертки). Иначе говоря, реализуется процедура программного сканирования исходного изображения скользящей апертурой меньшего формата и вычисление свертки на каждом шаге сканирования. В результате формируется новый массив $[E_{i,j}^*]$, имеющий (также как и исходный) формат $M \times N$, но представляющий собой «сглаженное» изображение, подвергнутое низкочастотной пространственной фильтрации

$$E_{i,j}^* = \sum_{k=-(m-1)/2}^{(m-1)/2} \sum_{l=-(n-1)/2}^{(n-1)/2} E_{(i+k),(j+l)} \cdot W_{k,l}$$
.(2.3)Размерность сглаживающего массива m

Для изображений с плавным изменением освещенности от элемента к элементу, т.е. изображений, не содержащих мелкие детали в своей структуре, целесообразно увеличивать размер сглаживающей матрицы. При этом повышается эффективность фильтрации с точки зрения подавления импульсных помех. Однако следует иметь ввиду, что время обработки исходного изображения при программной реализации алгоритма растет пропорционально m^2 .

Ниже представлены примеры различных видов сглаживающих массивов, рекомендуемых с учетом свойств оптических систем:

$$\begin{bmatrix} W_1 \end{bmatrix} = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} W_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{10} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} W_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}, (2.4)$$
где нормируемые мно

чисел, представляемых двоичным кодом после процедуры фильтрации.

Рекуррентный алгоритм анизотропной фильтрации

Является более рациональным с точки зрения использования оперативной памяти ЦВУ. Математическая форма записи рекуррентного алгоритма практически не отличается от формы записи рассмотренного выше алгоритма анизотропной фильтрации:

$$E_{i,j_{i,j}}^* = \sum_{k=-(m-1)/2}^{(m-1)/2} \sum_{l=-(n-1)/2}^{(n-1)/2} E_{(i+k),(j+l)}^* \cdot W_{k,l}$$
.Однако здесь при вычислении

дискретной свертки могут использоваться как элементы массива $[E_{i,j}]$, так и элементы, взятые из уже сглаженного массива $E_{i,j}^*$. Благодаря этому, одни и те же ячейки оперативной памяти могут использоваться вначале для хранения исходных значений $E_{i,j}^*$, а затем новых значений $E_{i,j}^*$, полученных после обработки данных. Если сканирование исходного массива $[E_{i,j}]$ осуществляется, например, слева–направо и сверху–вниз, то в пределах программного окна форматом $m \times n$ использются элементы из нового массива $[E_{i,j}^*]$ для всех k = -(m-1)/2; ...; -1, 0 и l = -(n-1)/2; ...; -1, а для всех остальных – из исходного массива $[E_{i,j}]$.

Благодаря вторичному использованию при вычислении свертки элементов, уже прошедших процедуру фильтрации, рекуррентный алгоритм анизотропной фильтрации может давать лучшие результаты сглаживания, чем алгоритм анизотропной фильтрации.

Медианная фильтрация

Медианная фильтрация осуществляется посредством замены значения каждого элемента массива $[E_{i,j}]$, находящегося в центре окна скользящей апертуры, медианой исходных значений, находящихся внутри апертуры. В результате такой обработки на выходе медианного фильтра получается как

бы сглаженное изображение, в котором отсутствуют малоразмерные, например, точечные детали, занимающие малое (по сравнению с размерами апертуры) число элементов.

Медианой (*med*) последовательности $X_1, X_2, ..., X_n$ при нечетном *n* является средний член ряда, получающегося при упорядочении последовательности по возрастанию (или убыванию). При четном *n* медиана определяется как среднее арифметическое двух средних членов упорядоченного ряда.

Одномерный медианный фильтр с апертурой *n* для одномерной последовательности $\{X_i; i \in Z\}$ при нечётном n определяется как

 $Y_i = med(X_{i-v}, ..., X_i, ..., X_{i+v}), i \in \mathbb{Z},$ (2.5)

где: v = (n - 1)/2; *Z* – множество всех натуральных чисел.

Двумерный медианный фильтр с апертурой *L* для двумерного массива $\{E_{i,i}; (i, j) \in Z^2\}$ определяется как

$$E_{i,j}^{*} = \text{med} [E_{i+r, j+s}; (r, s) \in L]; i, j \in \mathbb{Z}^{2}.$$
 (2.6)

На практике могут использоваться различные формы сглаживающих апертур *L*: линейные сегменты, кресты, квадраты и др. (рис. 2.1)



Рисунок 2.1 – Примеры апертур медианных фильтров

Оптимальный выбор формы сглаживающей апертуры зависит от специфики решаемой задачи и формы объектов, находящихся в поле зрения ABC.

Примечание.

Вблизи граничных точек конечных изображений нужно находить медиану только для тех точек, которые вписываются в пределы апертуры. Таким образом, при обработке точек изображения вблизи границ кадра медианы могут определяться для меньшего, чем в L (четного или нечётного) числа точек.

Алгоритм медианной фильтрации обладает явно выраженной избирательностью по отношению к элементам массива, представляющим собой немонотонную составляющую последовательности чисел в пределах апертуры. Монотонную составляющую последовательности медианный фильтр оставляет без изменений. Благодаря этой особенности, медианные фильтры при оптимально выбранной апертуре могут, например, сохранять границы эффективно подавляя без искажений резкие объектов, некоррелированные или слабо коррелированные помехи и малоразмерные детали. В то же время при аналогичных условиях алгоритм линейной анизотропной фильтрации, осуществляя сглаживание помех, неизбежно «смазывает» резкие границы и контуры объектов. В качестве иллюстрации на рисунке 2.2 показан результат обработки медианным и анизотропным

фильтрами фрагмента выделенной строки, содержащей малоразмерные детали и резкие границы более крупных объектов.



Рисунок 2.2 – Фрагмент строки исходного массива (а), резильтаты обработки фрагмента медианным (б) и анизотропным фильтрами (в)

2.1 Алгоритмы определения интегральных параметров

дискретных изображений

В некоторых случаях на этапе предварительной обработки изображений целесообразно определение некоторых обобщённых (интегральных) признаков или свойств изображений, которые в сочетании с другими признаками (или самостоятельно) могут быть использованы на последующем этапе распознавания объектов, попавших в поле зрения ABC.

Гистограмма отсчётов освещённости – зависимость числа одинаковых значений освещённости в анализируемом дискретном изображении, соответствующих какому-либо уровню квантования сигнала, от этого уровня

$$S(h) = \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} K_{i,j}; \quad K_{i,j} = \begin{cases} 1, E_{i,j} = h \\ 0, E_{i,j} \neq h \end{cases}$$
(2.7)

где: h = 0, 1, 2, ..., (*H* - 1); *H* – число уровней квантования видеосигнала. *Средняя освещённость* в изображении

$$\overline{E} = \frac{1}{MN} \sum_{h=0}^{H-1} h \cdot S(h); \quad h = 0, 1, 2...H - 1; H = 2^n$$
(2.8)

где n – число разрядов двоичного кода (число разрядов АЦП).

Среднеквадратическое отклонение освещённости от среднего значения

$$\sigma E = \frac{1}{MN} \sum_{h=0}^{H-1} (h - \overline{E})^2 \cdot S(h)$$
(2.9)

2.2 Дифференциальные алгоритмы обработки изображений

Дифференциальные алгоритмы используются для определения норм градиента в точках изображения с целью последующего выделения границ и контуров объектов наблюдения.

Примечание.

Строго говоря, термин «дифференциальные алгоритмы обработки» не является вполне корректным применительно к дискретным последовательностям. Более точно рассматриваемые ниже алгоритмы следовало бы называть разностными. Однако, в литературе термин «дифференциальные алгоритмы обработки» традиционно используется, подчёркивая некоторую аналогию с алгоритмами обработки непрерывных аналоговых сигналов, когда поиск градиентов осуществляется путём вычисления производных.

Применительно к дискретным изображениям, с которыми приходится иметь дело при цифровой обработке, могут быть предложены следующие способы приближённого вычисления нормы градиента, отличающиеся друг от друга количеством исходных отсчётов освещенности, используемых на каждом шаге, и объёмом вычислительных затрат.

Простейший алгоритм вычисления нормы градиента

$$G_{i,j} = \sqrt{\left(E_{(i+1),j} - E_{i,j}\right)^2 + \left(E_{i,(j+1)} - E_{i,j}\right)^2}, \qquad (2.10)$$

где: $G_{i,j}$ норма градиента для элемента матрицы $[E_{i,j}]$.

Здесь при анализе каждой точки исходного изображения используются три значения сигнала, соответствующие смежным точкам. Отметим, что при незначительном увеличении погрешности вычислений, нормы градиента могут определяться по упрощённой формуле алгоритма

$$G_{i,j} = |E_{(i+1),j} - E_{i,j}| + |E_{i,(j+1)} - E_{i,j}|, \qquad (2.10a)$$

Меньшую погрешность даёт, так называемый, оператор Робертса, благодаря тому, что на каждом шаге вычислений используются четыре исходных значения сигнала

$$G_{i,j} = \sqrt{\left(E_{(i+1),(j+1)} - E_{i,j}\right)^2 + \left(E_{(i+1),j} - E_{i,(j+1)}\right)^2}, \qquad (2.11)$$

ИЛИ

$$G_{i,j} = \left| E_{(i+1),(j+1)} - E_{i,j} \right| + \left| E_{(i+1),j} - E_{i,(j-1)} \right| .$$
 (2.11a)

Вычислительный алгоритм Собела предполагает использование восьми отсчётов освещенности в окрестностях анализируемой точки, однако значение освещенности в самой анализируемой точке в вычислениях не участвует

$$G_{i,j} = \sqrt{G_{i,j(x)}^{2} + G_{i,j(y)}^{2}}$$
(2.12)

ИЛИ

$$G_{i,j} = \left| G_{i,j(x)} + G_{i,j(y)} \right|,$$
 (2.12a)

где

$$\begin{aligned} G_{i,j(x)} &= [E_{(i-1),(j-1)} + 2E_{(i-1),j} + E_{(i-1),(j+1)}] - [E_{(i+1),(j-1)} + 2E_{(i+1),j} + E_{(i+1),(j+1)}], \\ G_{i,j(y)} &= [E_{(i-1),(j-1)} + 2E_{i,(j-1)} + E_{(i+1),(j-1)}] - [E_{(i-1),(j+1)} + 2E_{i,(j+1)} + E_{(i+1),(j+1)}]. \end{aligned}$$

Такой алгоритм наряду с более точным определением нормы градиента позволяет, в принципе, определять и направление вектора градиента в плоскости анализа изображения

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left[G_{i,j(x)} / G_{i,j(y)} \right], \qquad (2.13)$$

где α – угол между направлением вектора градиента и направлением строк матрицы [$E_{i,i}$].

В тех случаях, когда требуется максимальная точность в определении нормы градиента, может быть рекомендован многошаговый метод вычислений

$$G_{i,j} = \sum_{k=1}^{4} G(k), \qquad (2.14)$$

где: G(k) – скалярное произведение векторов $\overrightarrow{a_{(k)}}$ и \overrightarrow{b} ;

$$\vec{a}_{1} = \begin{bmatrix} 1; \sqrt{2}; 1; 0; 0; -1; -\sqrt{2}; -1 \end{bmatrix},$$

$$\vec{a}_{2} = \begin{bmatrix} 1; 0; -1; \sqrt{2}; -\sqrt{2}; 1; 0; -1 \end{bmatrix},$$

$$\vec{a}_{3} = \begin{bmatrix} 0; -1; -\sqrt{2}; 1; -1; \sqrt{2}; 1; 0 \end{bmatrix},$$

$$\vec{a}_{4} = \begin{bmatrix} -\sqrt{2}; -1; 0; -1; 1; 0; 1; \sqrt{2} \end{bmatrix},$$

$$\vec{b} = \begin{bmatrix} E_{(i-1), (j-1)}; E_{i, (j-1)}; E_{(i+1), (j-1)}; E_{(i-1), j}; E_{(i-1), (j+1)}; E_{i, (j+1)}; E_{(i+1), (j+1)} \end{bmatrix}.$$

При проектировании ABC выбор конкретного алгоритма следует делать с учётом допустимых временных затрат, определяемых условиями работы системы и указанных в техническом задании.

Выделение границ изображений объектов.

В общем случае процедуре выделения границ (контуров) изображений объектов должен предшествовать этап определения нормы градиента для всех точек исходного массива *G*_{*i*,*j*}. После этого границы объекта могут быть найдены следующим образом.
В качестве первого этапа осуществляется выбор координат точек изображения, для которых значения нормы градиента превышают установленный порог

 $i,j \in \omega_{\text{гр.}}$, если $G_{i,j} \ge D$, (2.15) где: $i,j \in \omega_{\text{гр.}}$ – множество координат точек, принадлежащих области изображения вблизи границ объекта; D – пороговое значение нормы градиента.

Примечание.

Следует, однако, заметить, что решающего правила (2.15), обычно, недостаточно для успешного выделения контуров объекта. Дело в том, что при низком уровне порога D кроме контурных точек могут оказаться выделенными и другие, «лишние» точки, расположенные вблизи контура, для которых также выполняется условие $G_{i,j} \ge D$. Если же величина порога D задана высокой, то, наоборот, не все точки контура окажутся выделенными. Изменяя величину D, можно, в принципе, менять соотношение между вероятностью выделения «лишних» точек (ошибки первого рода) и вероятностью пропуска контурных точек объекта (ошибки второго рода). Очевидно, что чем выше уровень помех, действующих в АВС, тем больше суммарная вероятность ошибок выделения контурных точек. На практике пороговое значение нормы градиента предпочтительнее задавать таким, чтобы вероятность ошибок второго рода была минимальной. При этом «лишние» точки, выделенные на первом этапе, могут быть котсеяны» на втором этапе, который предполагает дополнительный анализ выделенных точек.

В результате дополнительного анализа в окрестностях каждой из точек с координатами $i,j \in \omega_{rp.}$ должны быть оставлены только две, непосредственно прилегающие к данной точке. Эти две точки могут быть выбраны среди других предполагаемых контурных точек (например, точек с координатами $i \pm 1, j \pm 1$) по признаку максимального значения нормы градиента. В крайнем случае, если этому признаку удовлетворяют более двух прилегающих точек, должны быть выбраны две любые точки, например, первые из числа рассматриваемых. Это, хотя и может в конечном итоге привести к незначительным погрешностям в определении координат контурных точек, но позволит избежать более существенных аномальных ошибок, связанных с искажением формы и с очень значительными погрешностями при вычислении периметра объекта.

В частном случае, при обработке бинарных изображений, то есть изображений, каждый элемент которых может принимать одно из двух значений «0» или «1» («чёрное» или «белое»), процедура выделения границ объектов существенно упрощается и может быть сведена к простым логическим операциям

$$i,j \in \omega_{\text{гр.}}:[E_{i,j}=a] \& [E_{i,(j-1)}=b \lor E_{(i-1),j}=b \lor E_{i,(j+1)}=b \lor E_{(i+1),j}=b]$$
 (2.16)
или

$$i,j \in \omega_{\text{rp.}} \cdot [_{E(i,j)} = a] \& [E_{(i-1),(j+1)} = b \lor E_{(i+1),(j-1)} = b \lor E_{i,(j+1)} = b \lor E_{(i+1),(j+1)} = b].$$

$$(2.17)$$

Здесь $i,j \in \omega_{rp.}$ – координаты точек, принадлежащих границам объектов; a,b – возможные значения функции $E_{i,j}$ («0» или «1»); & и \vee – символы логических операций «И» и «ИЛИ» соответственно.

2.3 Алгоритмы трансформирования исходных изображений на основе ортогональных преобразований

В некоторых случаях, для сокращения объёма данных или облегчения процедуры выделения признаков объектов на последующих этапах распознавания, целесообразно предварительно преобразовывать исходный двумерный массив [$E_{i,j}$] в массив значений коэффициентов [$F_{u,v}$], имеющий такой же формат $M \times N$, как и исходное изображение.

Вторичный массив или иначе матрица коэффициентов [F_{и,v}] называется трансформантой. Один ИЗ видов ортогональных преобразований – дискретное преобразование Фурье. В случае преобразования Фурье трансформанта является ничем иным, как двумерным пространственным спектром изображения.

В общем случае любое преобразование исходного изображения на основе ортогональных операторов можно рассматривать как операцию обобщенный разложения изображения в двумерный спектр, а коэффициенты (т.е. элементы трансформанты) – как амплитуды соответствующих спектральных составляющих. Отметим, что если при этом в качестве базисных функций используются негармонические функции, то понятие пространственной частоты следует обобщить и использовать понятие секвенты.

Секвентой называется величина, равная половине среднего числа пересечений нуля в единицу времени или на единицу длины.

В процессе ортогональных преобразований изображения, имеющего сильные корреляционные связи между соседними элементами, происходит декорреляция (отбеливание). Таким образом, значения элементов трансформанты оказываются практически некоррелированными. В отличие от исходного массива, для которого характерно в среднем равномерное распределение энергии сигнала между элементами, распределение энергии сигнала в трансформанте крайне неравномерно. Основная доля энергии приходится на элементы с малыми порядковыми номерами (т.е. на низкие пространственные секвенты) и лишь небольшая доля – на прочие (рис 2.3).

Это обстоятельство позволяет либо вообще отбросить (т.е. считать равными нулю) большую часть элементов трансформанты (что означает, по существу, низкочастотную пространственную фильтрацию), либо квантовать их на малое число уровней с использованием минимального числа разрядов двоичного кода.



Рисунок 2.3 – Распределение энергии сигнала между отдельными элементами в исходном массиве (а) и в трансформанте (б).

Рассмотрим некоторые наиболее распространённые виды ортогональных преобразований, применяемых при цифровой обработке изображений.

Дискретное преобразование Фурье

$$F_{u,v} = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} E_{i,j} \cdot \exp\left\{-J 2\pi \left[u_i / M + v_j / N\right]\right\}.$$
 (2.18)

Здесь коэффициенты $F_{u,v}$ в общем случае являются комплексными числами

$$F_{u,v} = A_{u,v} + JB_{u,v}$$
 (2.19)

Каждый комплексный коэффициент можно заменить двумя действительными составляющими. Эти составляющие характеризуют, соответственно, пространственные дискретные спектры амплитуд и фаз и определяются следующим образом:

$$\left|F_{u,v}\right| = \left[B_{u,v}^{2} + A_{u,v}^{2}\right]^{\frac{1}{2}}$$

arg $F_{u,v} = arctg \left[B_{u,v} \middle| A_{u,v}\right]$ (2.20)

Основной недостаток дискретного преобразования Фурье сравнительно большой объём вычислений, а также необходимость сохранения большого числа составляющих трансформанты по сравнению с другими ортогональными преобразованиями при одинаковых ошибках восстановления изображения (т.е. при одинаковых потерях информации). Кроме того, для хранения отдельных составляющих комплексных коэффициентов, требуется больший объём памяти, чем для действительных значений элементов исходного массива. Говоря 0 дискретном преобразовании Фурье, следует упомянуть о возможности применения специально разработанных алгоритмов быстрого преобразования Фурье [1], а также о специализированных вычислительных устройствах для их реализации – так называемых систолических процессорах [4].

Преобразование Уолша (при M = N)

$$U_{u,v} = \frac{1}{N^{2}} \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} E_{i,j} \cdot \prod_{k=1}^{l} (-1)^{a}, \qquad (2.21)$$

где $a = b_k(i) \cdot b_{l-1-k}(u) + b_k(u) + b_k(j) \cdot b_{1-1-k}(v)$. В свою очередь, коэффициенты $b_k(Z)$ определяются следующим образом: $b_k(Z)$ равен значению k-того разряда двоичного кода числа Z, состоящего из 1 двоичных разрядов. Если, например, Z = 10, т.е. $10_{10} = 1010_2$, то $b_0 = 0$; $b_1 = 1$; $b_2 = 0$; $b_3 = 1$.

Преобразование Адамара (при M = N)

$$A_{u,v} = \frac{1}{N^{2}} \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} E_{i,j} (-1)^{a}, \qquad (2.22)$$
$$a = \sum_{k=1}^{N} \left[b_{k}(i) \cdot b_{k}(u) + b_{k}(j) \cdot b_{k}(v) \right].$$

Коэффициенты b_k – определяются в соответствии с правилом их определения в преобразовании Уолша.

Очевидно, что все виды ортогональных преобразований являются *обратимыми*, т.е., используя процедуру обратного преобразования, можно из трансформанты восстановить исходное изображение.

Пусть $[E_{i,j}]$ – массив исходного изображения форматом $N \times N$, где j – номер строки, i – номер столбца элементов (номер элементов в строке); $[F_{u,v}]$ – трансформанта изображения, которая имеет тот же формат $N \times N$, где u и v соответственно номер строки и номер столбца элементов трансформанты. Тогда, в общем случае, независимо от вида ортогонального преобразования, запишем

$$F_{u,v} = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} E_{i,j} \cdot a(i, j, u, v),$$

$$E_{i,j} = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} F_{u,v} \cdot b(i, j, u, v),$$
(2.23)

где a(i,j,u,v) и b(i,j,u,v) – базисные функции прямого и обратного преобразований соответственно.

С практической точки зрения важно отметить, что все рассмотренные выше виды ортогональных преобразований являются разделимыми по переменным. Таким образом, вычисление прямых и обратных двумерных ортогональных преобразований удаётся свести к последовательному выполнению одномерных преобразований

$$F_{u,v} = \sum_{i=1}^{N} a_{\text{crp.}}(i,u) \cdot \sum_{j=1}^{N} E_{i,j} \cdot a_{\mathfrak{g}}(i,v),$$

$$E_{i,j} = \sum_{u=1}^{N} b_{\text{crp.}}(i,u) \cdot \sum_{v=1}^{N} F_{u,v} \cdot b_{\mathfrak{g}}(i,v).$$
(2.24)

Здесь $a_{\text{стр.}}(i,u)$, $b_{\text{стр.}}(i,u)$ и $a_{\mathfrak{H}}(j,v)$, $b_{\mathfrak{H}}(j,v)$ – базисные функции прямого и обратного преобразований, соответственно вдоль направления строк и столбцов.

Для удобства записи и вычислений целесообразно использовать матричный аппарат

$$[F] = [A_{\mathfrak{g}}] \cdot [E] \cdot [A_{\mathfrak{crp}}]^{\mathrm{T}}; \quad [E] = [B_{\mathfrak{g}}] \cdot [F] \cdot [B_{\mathfrak{crp}}]^{\mathrm{T}}.$$
(2.25)

Здесь $[A_{3}]$ и $[A_{cтp.}]$ – матрицы прямого преобразования; $[B_{3}]$ и $[B_{cтp.}]$ – матрицы обратного преобразования; $[A_{cтp..}]^{T}$ и $[B_{cтp.}]^{T}$ – матрицы, полученные в результате транспонирования матриц $[A_{cтp.}]$ и $[B_{cтp.}]$.

Разумеется, независимо от формы математического представления, прямое и обратное ортогональные преобразования двумерных массивов требуют, в общем случае, значительных вычислительных затрат. Это следует учитывать при проектировании ABC, работающих в реальном масштабе времени. Однако, при цифровой обработке бинарных изображений, процедуры ортогональных преобразований существенно упрощаются, особенно в случае использования бинарных базисных функций (преобразования Уолша, Адамара и др.).

Вопросы для самопроверки:

1. Какие задачи решаются на этапе предварительной обработки изображений? Какие методы могут использоваться для решения этих задач?

2. Чем следует руководствоваться при выборе оптимальной размерности и вида сглаживающего массива в случае применения алгоритма анизотропной фильтрации?

3. Каковы общие свойства линейных преобразований (физических процессов, алгоритмов, и др.) в отличие от нелинейных преобразований сигналов,

4. Какие из вам известных алгоритмов предварительной обработки сигналов можно отнести к линейным, а какие к нелинейным?

5. С чем связан характер распределения весовых коэффициентов в сглаживающих массивах при анизотропной фильтрации?

7. В чём отличие свойств алгоритмов медианной и анизотропной фильтрации?

8. Какими соображениями следует руководствоваться при выборе вида апертуры двумерного медианного фильтра?

9. В каких случаях возможно эффективное применение одномерного медианного фильтра при обработке двумерных изображений?

10. Что такое нормы градиента, с какой целью они могут вычисляться?

11.. Поясните в порядке возрастания сложности основные алгоритмы вычисления норм градиента?

12. Как решается задача автоматического выделения контурных элементов при обработке полутоновых и бинарных изображений объектов?

13. С какой целью могут использоваться алгоритмы трансформирования исходных изображений на основе ортогональных преобразований?

14. Что общего и в чём отличия между дискретным преобразованием Фурье и другими видами ортогональных преобразований?

3 Методы обнаружения, распознавания и измерения параметров объектов наблюдения

Подробное рассмотрение теоретических аспектов данной темы не является задачей настоящего пособия. Более полную информацию по этим вопросам желающие могут получить в других источниках (см. например, [5, 6, 7]). Ниже даются практические рекомендации по реализации отдельных методов, непосредственно связанных с наиболее типичными задачами, которые решаются автоматизированными видеоинформационными системами на основе использования алгоритмов, рассмотренных в предыдущей главе.

3.1 Обнаружение объектов

В обобщённой форме операция обнаружения объектов, т.е. операция выявления образов объектов в искажённом шумами и помехами изображении, может быть определена в виде процедуры сравнения с некоторым числом – порогом другого числа, полученного в результате преобразования анализируемого изображения, представленного, в конечном счёте, в виде матрицы-массива целых чисел $E_{i,j}$.

 $L[E_{i,j_i}] \ge \prod [E_{i,j_i}].$

(3.1)

Здесь L[*] – оператор преобразования исходного изображения; $\Pi[*]$ – оператор формирования порогового значения.

В случае выполнения условия (3.1) принимается решение о наличии объекта, в противном случае – об отсутствии его. При этом качество обнаружения характеризуется двумя параметрами:

– вероятностью правильного обнаружения, которая равна вероятности выполнения условия (3.1), при наличии объекта в анализируемом изображении;

– вероятностью ложной тревоги, равной вероятности выполнения условия (3.1) при отсутствии объекта в анализируемом изображении.

Конкретный вид операторов L[*], $\Pi[*]$, а также качество обнаружения зависят от наличия априорных сведений об ожидаемых объектах, шумах помехах и искажениях. В общем случае научной основой для определения оптимальных параметров решающего правила является теория статистических решений [6].

3.1.1 Внутрикадровая обработка сигналов в задаче обнаружения

В качестве примера рассмотрим вначале возможный алгоритм обнаружения малоразмерных объектов, наблюдаемых ABC на неоднородном по яркости фоне и при наличии, кроме того, маскирующих помех в виде аддитивного нормального шума, который является следствием случайных флуктуаций, действующих в различных звеньях аппаратной структуры.

На рис. 3.1а условно показан фрагмент строки, содержащий как сигналы от точечных объектов, так и от участков изображения, соответствующих различным уровням яркости подстилающего фона.



Рисунок 3.1 – Фрагмент строки, содержащей изображения точечных объектов (то) на неоднородном фоне при наличии шумов (а); тот же фрагмент после сглаживания медианным фильтром (б); разностный сигнал (в).

В данном случае контролируемые объекты занимают значительно меньшую площадь в зоне наблюдения, чем области участков постоянных (или плавно изменяющихся) уровней яркости фона. Применив в качестве сглаживающего фильтра рассмотренный выше алгоритм медианной фильтрации (см. п. 2.1), можно выделить сначала сигнал, соответствующей фоновой составляющей (рис. 3.1б), а затем, путем его вычитания из исходного сигнала (рис. 3.1а), сформировать разностный сигнал уже не содержащий фоновой составляющей (рис. 3.1в).

Заметим, что при наблюдении ABC так называемого точечного объекта (т.е. объекта размерами которого можно пренебречь по сравнению с размерами поля зрения системы) форма изображения объекта однозначно определяется функцией пятна рассеяния объектива. Поскольку функцию пятна рассеяния объектива можно считать известной, дальнейшая обработка разностного сигнала фактически сводится к классической процедуре обнаружения сигнала известной формы на фоне аддитивных нормальных шумов с нулевым средним значением. В этом случае в качестве оператора преобразования исходного изображения выступает корреляционный интеграл, вычисляемый с использованием заданного

описания известного изображения объекта [6]. Тогда параметры, характеризующие качество обнаружения определяются достаточно просто.

Вероятность ложной тревоги

$$P_{\Pi,T} = 1 - \Phi[\Pi_0 / \sigma_L].$$
(3.2)

Условная вероятность правильного обнаружения

 $P_{\text{прав.}} = \Phi[(L_c - \Pi o)/\sigma_L],$

где: L_c – среднее значение корреляционного интеграла при наличии объекта, σ_L – среднеквадратическое отклонение корреляционного интеграла, обусловленное наличием помех; Π_o – порог обнаружения, интеграл вероятностей

$$\Phi[\nu] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{0}^{\nu} e^{-\frac{x^2}{2}} dx$$

Примечание.

В данном примере, рассматривающем случай обнаружения точечного объекта, в качестве параметра оL можно в первом приближении при практических расчётах использовать параметр ош –среднеквадратическое значение флуктуации шумовой составляющей в сигнале, получаемом с одного элемента ФПУ (КМОП, ФПЗС и др.).

Большее практическое значение при оценке качественных характеристик ABC (в частности, характеристик обнаружения) имеет такой параметр как вероятность ложной тревоги при анализе полного кадра, полученного от телевизионного, тепловизионного или иного формирователя сигнала изображения

$$P_{_{\pi,\mathrm{T.}}}(T_{_{\mathrm{K}}}) = 1 - \prod_{j=1}^{K} \left[1 - P_{_{\pi,\mathrm{T.}}}(j) \right], \tag{3.4}$$

где К – полное число элементов изображения; $P_{n.т.}(j)$ - вероятность ложной тревоги в j-том элементе. Очевидно, что при известной частоте смены кадров данный параметр легко пересчитать в параметр, характеризующий среднюю частоту ложных тревог $F_{n.т.}$ или вероятность ложной тревоги в течение произвольного промежутка времени $P_{n.т.}(T)$.

Рассмотрим более подробно алгоритм обнаружения и селекции отдельных сегментов изображения, содержащих сигналы от малоразмерных (точечных) объектов, наблюдаемых на неоднородном фоне (рис. 3.1).

В основе процедур обнаружения и селекции лежит использование различий пространственных характеристик изображений объектов и относительно протяженных фрагментов подстилающего фона. Обработка исходного массива [Ei,j], соответствующего изображению, формируемому оптической системой ABC на фоточувствительной поверхности многоэлементного ФПУ, может осуществляться построчно следующим образом.

1. Для каждого элемента Еі, јанализируемой ј-той строки первичного (исходного) массива формируется соответствующее новое значение Е*i, ј путём сглаживания исходной реализации одномерным медианным фильтром

$$E_{i,j}^{*} = med[E(i-l), j; ...; Ei, j; ...; E(i+l), j]$$
(3.5)

где: l = (L - l)/2; L – апертура сглаживающего одномерного медианного фильтра.

С целью определения оптимальных размеров и формы сглаживающей апертуры медианного фильтра, а также определения оптимальных параметров решающего правила при последующей обработке разностного сигнала полезно воспользоваться методом математического компьютерного моделирования (см. раздел 3.4). Очевидно, что размеры сглаживающей апертуры должны быть согласованы с пространственным периодом элементов ФПУ и размерами кружка рассеяния оптической системы. Напомним (см. п. 2.1), что специфическим свойством медианного фильтра (в отличие от анизотропного линейного фильтра) является эффективное подавление немонотонных (в пределах апертуры) составляющих последовательности чисел И неискаженная передача монотонных составляющих. Под монотонной последовательностью понимается последовательность чисел, которая, по крайней мере, в пределах апертуры скользящего «окна», удовлетворяет одному из следующих условий:

 $X1 \ge X2 \ge X3 \ge \ldots \ge XL$

 $X1 \le X2 \le X3 \le \dots \le XL \tag{3.6}$

2. Для каждого элемента анализируемой строки вычисляется разностный сигнал путём сравнения значений отсчётов сглаженного и исходного массивов

$$ZE_{i,j} = E_{i,j} - E_{i,j}^*$$
(3.7)

3. При достаточном отношении сигнал/шум (не менее нескольких единиц) путём пороговой обработки разностного сигнала преимущественно выделяются элементы, в которых присутствует полезный сигнал

$$(k, j = i, j) \in \Omega : ZE_{i,j} \ge \Pi(i, j),$$
(3.8)

где Ω – множество «подозрительных» точек; П(i,j) – порог сравнения, который при необходимости может рассчитываться для каждого элемента цифрового массива с учётом флуктуаций, обусловленных «геометрическим» шумом при наличии данных в памяти ABC о параметрах отдельных накопительных ячеек фотоприёмного устройства (ФПЗС, КМОП и др. см. п. 1.4).

4. Каждая «подозрительная» точка проверяется на её принадлежность к локальному максимуму km

 $k_m, j = k, j \in \Omega': \ [ZE_{(k-1),j} \le ZE_{k,j})] \& [ZE_{(k+1),j} \le ZD_{k,j})].$ (3.9)

Здесь Ω´ – подмножество выделенных точек. Для большей надёжности выделения точек локального максимума рекомендуется осуществлять анализ разностных сигналов для всех элементов, окружающих каждую «подозрительную» точку, включая элементы смежных строк

$$km, j = k, j \in \Omega':$$

$$[ZE_{(k-1),j} \leq ZE_{k,j}] \& [ZE_{(k+1),j} \leq ZD_{k,j}] \& \\ \& [ZE_{(k-1),(j-1)} \leq ZE_{k,j-1})] \& [ZE_{(k+1),(j-1)} \leq ZD_{k,(j-1)})] \& .$$

$$\& [ZE_{(k-1),(j+1)} \leq ZE_{k,j+1})] \& [ZE_{(k+1),(j+1)} \leq ZD_{k,(j+1)})] \& \& UE_{(k+1),(j+1)} \otimes ZD_{(k+1)}) \& \& UE_{(k+1),(j+1)} \& \& UE_{(k+1),(j+1)} \& UE_{$$

Очевидно, что при этом в памяти вычислителя должен всегда храниться скользкий массив отсчётов, необходимый для выполнения указанной операции.

5. При обнаружении локального максимума в специально отведённую область памяти записывается сегмент – небольшой массив чисел (обычно для каждого точечного объекта достаточно 7×7 или 9×9 элементов), взятых из исходного массива [Ei,j] в окрестностях выделенной точки.

В результате выполнения последовательности описанных процедур для каждой из «подозрительных» точек формируются несколько выходных массивов небольшого формата, содержащих информацию обо всех обнаруженных объектах.

Следует отметить, что благодаря эффекту сглаживания, возникающего при медианной фильтрации, дисперсия шумов на выходе фильтра уменьшается приблизительно в соответствии с соотношением [8]

$$\sigma_1^2 / \sigma_2^2 = 2(L + \pi / 2 - 1) / \pi, \qquad (3.10)$$

где σ_{12} и σ_{22} – дисперсии до и после фильтрации соответственно.

В частности при наиболее типичном размере «скользящего» окна апертуры, равного 7-и элементам изображения

$$\sigma_1^2 / \sigma_2^2 \approx 5$$

Это соответствует увеличению дисперсии шума в разностном сигнале (3.7) приблизительно на 20% по сравнению с исходным сигналом.

Кроме того, вследствие неполного сглаживания полезного сигнала медианным фильтром, может возникнуть некоторое уменьшение размаха сигнала от точечного объекта после операции вычитания. Всё это приводит к некоторому снижению фактического отношения сигнал/шум в разностном сигнале по сравнению отношением сигнал/шум В исходной с Количественная последовательности. оценка эффекта уменьшения отношения сигнал/шум и относительного порога для наиболее типичного соотношения L/R=7 дана в таблице 1. Здесь L – апертура фильтра, R – эффективный радиус кружка рассеяния объектива в плоскости анализа ФПУ, выраженные в числе пространственных периодов элементов матрицы.

Таблица 1

٤	٤*	Рлв.	Nлв.(k)
4,0	3,69	6×10-5	15
4,5	4,09	2×10-5	5
5,0	4,54	3×10–6	0,75
6,0	5,45	2×10-8	5×10-3
7,0	6,5	4,1×10–11	1×10–5

Оценка эффекта уменьшения отношения сигнал/шум и относительного порога при соотношении L/R = 7.

В таблице 1 ξ и ξ^* – отношения порог/шум в исходном и разностном сигналах соответственно; Рлв.(i,j) – вероятность ложного выброса разностного сигнала за порог обнаружения По в анализируемом элементе; $\overline{N}_{\text{ЛВ.}}(k)$ – среднее число ложных выбросов в одном кадре форматом 500х500 элементов.

Очевидно, что благодаря использованию оптимальных (или квазиоптимальных) процедур на последующих этапах обработки сигналов с учётом априорной информации о наблюдаемых объектах, среднее число ложных обнаружений в кадре может быть существенно уменьшено. Однако, приведенные значения следует принимать во внимание при расчёте необходимого объема памяти буферного ЗУ для хранения выделенных сегментов.

3.1.2 Межкадровая обработка сигналов в задаче обнаружения подвижных объектов

Рассмотренный выше алгоритм внутрикадровой обработки может быть достаточно эффективен, в том случае, когда размеры выделяемых объектов (целей) значительно меньше отдельных деталей фона, обладающих постоянной или медленно изменяющейся яркостью (рис. 3.1). Если размеры выделяемых объектов соизмеримы с «фоновыми» объектами, более эффективными могут оказаться алгоритмы межкадровой обработки, позволяющие в качестве идентификационного признака использовать различие динамики относительного движения выделяемых и «фоновых» объектов. Ниже рассмотрим в качестве примера случай обнаружения подвижных объектов на неподвижном фоне.

В общем виде процесс автоматического выделения информации о подвижных объектах на основе алгоритма межкадровой обработки предполагает анализ не одного, а нескольких (как минимум двух) изображений, полученных в различные моменты времени или, точнее, соответствующих им сигналов. В результате такого анализа может осуществляться не только обнаружение объектов, но и определение некоторых информационных параметров объектов: габариты, координаты, скорость и направление перемещения в пространстве. Основная трудность, возникающая при этом, обычно связана с тем, что подвижные объекты, в общем случае, менее контрастны, неподвижные чем предметы, находящиеся в поле зрения ABC, и, следовательно, не представляется возможным посредством простой амплитудной селекции выделить полезный сигнал от подвижной цели на фоне мешающих фоновых сигналов. Поэтому процесс выделения информации о подвижных объектах распадается на два этапа:

– формирование межкадрового разностного сигнала (MPC), в котором сосредоточена вся информация об изменениях, происходящих в изображении, и в то же время отсутствуют (или значительно подавлены) мешающие перепады уровня, соответствующие неподвижным объектам, находящимся в кадре;

– оптимальная обработка MPC с целью выделения необходимой информации с максимальной достоверностью.

Пусть, например, на некотором неоднородном фоне, содержащем неподвижные предметы, перемещается объект *A* (рис. 3.2).



Рисунок 3.2 – *А* – подвижный объект, *B*₁, ... *B*₅ – неподвижные предметы, находящиеся в хоне наблюдения

За время, равное периоду следования сравниваемых кадров $\Delta T_{\rm K}$, объект сместится на некоторое расстояние Δl .

В общем случае $\Delta T_{\rm K} = k \cdot T_{\rm K}$, где k = 1, 2, 3, ... – целые числа натурального ряда; $T_{\rm K}$ – период следования смежных кадров. Конкретное значение k выбирается с учётом динамики перемещения объекта, исходя из оптимальных условий формирования MPC.

На рисунке 3.3 показаны осциллограммы видеосигналов, соответствующих выделенной строке (ab) на выходе телевизионного датчика, в двух смежных кадрах. Номера этих кадров условно обозначены индексами (n) и (n+k).



Рисунок 3.3 – а и б сигналы, соответствующие строке «ab» в двух смежных кадрах; в – разностный сигнал, полученный от строки «ab»

Как видно из рисунка 3.3, разностный сигнал u_{ab} (р.с.), полученный при сравнении сигналов, соответствующих строке «ab» n-го и (n+k)-го кадров, собой биполярные импульсы, несущие определенную представляет информацию положении, габаритах, направлении И скорости 0 перемещения объекта. Так, например, длительность биполярных импульсов *т* связана с горизонтальной составляющей *v*_x скорости движения изображения объекта; интервал времени между импульсами ΔT_r – с горизонтальным размером объекта; интервал времени, отсчитываемый от момента начала прямого хода строчной развертки до появления положительного импульса T_x – с положением объекта в пространстве и т.д.

В дальнейшем будет показано, что такие параметры, как скорость и направление перемещения объекта могут быть с наибольшей достоверностью определены при анализе последовательности разностных сигналов, полученной в результате сравнения видеосигналов как минимум двух пар кадров:

Используя обозначения, введённые для дискретных значений кодированных сигналов, полученных после квантования в узле АЦП, запишем выражение (3.11) в следующем виде

$$Z^{I}[E_{i,j}] = [E_{i,j}^{(n+k)}] - [E_{i,j}^{(n)}], Z^{II}[E_{i,j}] = [E_{i,j}^{(n+2k)}] - [E_{i,j}^{(n+k)}].$$
(3.11a)

Важно отметить, что между информационными параметрами объекта (координаты, габариты, скорость и направление перемещения объекта) и

параметрами MPC, строго говоря, существует лишь вероятностная связь. Строгая функциональная связь отсутствует, так как во входном сигнале всегда имеются помехи, носящие случайный характер. Поэтому в работе ABC, как и в работе любого оптико-электронной системы, всегда возможны ошибки.

При решении задачи обнаружения подвижных объектов могут иметь место ошибки двух родов.

Ошибка первого рода, называемая ложной тревогой, заключается в принятии автоматическим устройством ошибочного решения о наличии сигнала об изменениях в содержании кадра, когда такой сигнал отсутствует, вследствие превышения в какой-либо момент времени напряжением шума $U_{\rm m}(t)$ порогового уровня ε (или Π_0):

$$|u_{\rm m}(t)| \ge \varepsilon, \tag{3.12}$$

или после квантования в узле АЦП

$$\left| Z[E_{i,j(\mathbf{m})}] \right| \ge \Pi_0 \,. \tag{3.12a}$$

Здесь $|Z[E_{i,j(m)}]|$ – абсолютное значение шумовой составляющей в межкадровом разностном сигнале, представленном в цифровой форме.

Ошибка второго рода – пропуск сигнала. Она возникает в том случае, если в результате взаимодействия сигнала с шумом на входе порогового устройства суммарное напряжение окажется меньше напряжения порога:

$$\left| u_{\text{III}}(t_i) + u_{\text{p.c.}}(t_i) \right| < \varepsilon \,. \tag{3.13}$$

$$\left| Z[E_{i,j(\mathbf{m})}] + Z[E_{i,j}] \right| \le \Pi_0,$$
 (3.13a)

Примечание.

При построении ABC возможен различный подход к решению задачи снижения вероятности ошибок обнаружения.

Если ошибки первого и второго рода являются в равной степени нежелательными и необходимо добиться минимума полной вероятности ошибки, то величина порога є должна выбираться из компромиссных соображений, так как для уменьшения вероятности ложной тревоги $P_{\pi\pi}$ необходимо увеличивать порог ограничения, а для уменьшения вероятности пропуска сигнала $P_{\text{проп.}}$, наоборот. Такой подход называется критерием «идеального наблюдателя» [6].

Во многих случаях при решении задачи обнаружения ложная тревога может являться наиболее опасной ошибкой, связанной с весьма нежелательными последствиями. Тогда более предпочтительным является иной подход, известный под названием критерия Неймана-Пирсона [6]. Он заключается в том, что вероятность ложной тревоги заранее задана, а задача разработчика сводится к принятию мер, позволяющих уменьшить вероятность пропуска сигнала.

Таким образом, на этапе обработки МРС задача обнаружения подвижного объекта в зоне наблюдения сводится к принятию автоматическим устройством решения: присутствует ли в сигнале $Z'[E_{i,j}]$, поступающем для обработки, признаки, свидетельствующие о наличии

подвижного объекта в зоне наблюдения, или таких признаков нет. В общем случае $Z'[E_{i,j}]$ представляет собой смесь полезного сигнала и шума $Z[E_{i,j(m)}] + Z[E_{i,j}]$. Формальным признаком, позволяющем судить о присутствии подвижного объекта в зоне наблюдения, является превышение значения сигнала $Z'[E_{i,j}]$ (по абсолютной величине) заданного порога. Математически такой алгоритм обнаружения можно выразить следующим образом:

1 при
$$|Z'[E_{i,j}]| \ge \prod_0, 0$$
 при $|Z'[E_{i,j}]| < \prod_0.$ (3.14)

Выбор порога ограничения ε (Π_0) определяется соображениями эффективного подавления помехи, присутствующей в разностном сигнале. Порог ограничения должен быть выбран настолько большим, чтобы вероятность ошибочного обнаружения подвижного объекта (вероятность ложной тревоги) была бы не выше допустимой. Если шум на входе порогового устройства имеет нормальное распределение, то вероятность ложной тревоги при двухстороннем пороге ограничения $\pm \varepsilon$ может быть рассчитана по формуле

$$P_{\rm n.r.} = 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\varepsilon}^{+\varepsilon} e^{-\frac{u^2}{2\sigma^2}} du , \qquad (3.15)$$

где: о – среднеквадратическое значение шумовой составляющей в МРС.

Учитывая симметричность функции, описывающей закон нормального распределения, и производя замену $u/\sigma = x$, (3.15) можно записать иначе

$$P_{\text{n.t.}} = 1 - \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_{0}^{\varepsilon/\sigma} e^{-\frac{x^2}{2}} dx = 1 - 2 \cdot \Phi[\varepsilon/\sigma], \qquad (3.15a)$$

Условная вероятность правильного обнаружения сигнала от объекта $P_{\text{прав.}} = 2\Phi[\mu_{(\text{p.c.})} - \varepsilon/\sigma],$ (3.16)

где $\mu_{(p.c.)}-$ отношение сигнал/шум в межкадровом разностном сигнале.

В выражениях (3.15а) и (3.16)
$$\Phi[\nu] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{0}^{\nu} e^{-\frac{x^2}{2}} dx$$
 – интеграл

вероятностей.

Важно отметить, что отношение сигнал/шум в межкадровом разностном сигнале $\mu_{(p.c.)}$ всегда меньше отношения сигнал/шум μ в исходных сигналах сравниваемых кадров.

Примем следующие обозначения:

v – скорость перемещения изображения объекта на фоточувствительной площадке ФПУ;

d – пространственный период элементов ФПУ;

 $T_{\rm H}$ – время накопления сигнала в ФПУ (КМОП, ФПЗС и др.);

 T_{κ} – период смены кадров;

 $\Delta T_{\kappa} = k \cdot T_{\kappa}$ – интервал времени между сравниваемыми кадрами, где $k = 1, 2, 3, \ldots$ – целые числа натурального ряда.

Рассмотрим вначале случай относительно медленных перемещений, когда за время накопления изображение подвижного объекта успевает переместиться расстояние значительно на меньше одного пространственного периода элементов: $T_{\rm H} \cdot v \ll d$. Чтобы зарегистрировать максимально возможные изменения в кадре, связанные с перемещением наблюдаемого объекта необходимо выполнение условия k >>(т.е. $\Delta T_{\kappa} >> T_{\kappa}$). В этом случае шумовые составляющие в каждом из сравниваемых кадрах можно рассматривать как случайные между собой не коррелированные процессы. Тогда отношение сигнал/шум в разностном сигнале $\mu_{(n,c)}$ будет примерно в $\sqrt{2}$ раз меньше отношения сигнал/шум в сравниваемых кадрах

 $\mu_{(p.c.)} \approx \mu / \sqrt{2} \tag{3.17}$

В случае быстрых перемещений изображения наблюдаемого объекта, когда $T_{\rm H} \cdot v >> d$ фактическое время накопления $T_{\rm H}$, определяющее величину сигнала от подвижного объекта, уменьшается пропорционально скорости $T_{\rm H} = d/v$. Тогда величину $T_{\rm H} / T_{\rm H} = T_{\rm H} \cdot v/d$ можно рассматривать как коэффициент дополнительного уменьшения отношения сигнал/шум при быстрых перемещениях объекта. Таким образом, фактическое отношение сигнал/шум в разностном сигнале при быстрых перемещениях можно оценивать по приближённой формуле

 $\mu_{(p.c.)} \approx \mu/(\sqrt{2} \cdot T_{\rm H} \cdot v/d). \tag{3.18}$

Ниже рассмотрим дополнительные возможности повышения обнаружительной способности ABC, основанные на использовании пространственной корреляции в анализируемых изображениях.

3.1.3 Совместное использование процедур межкадровой и внутрикадровой обработки сигнала в задаче обнаружения подвижных объектов

Обычно изменения, происходящие в кадре в результате перемещения объектов, находящийся в поле зрения телевизионной системы, занимают площадь как минимум несколько раз большую, чем площадь одного элемента изображения. Поэтому на этапе обработки МРС представляется возможным использовать алгоритм *накопления сигналов по площади области изменений*, позволяющий значительно повысить чувствительность ABC к обнаружению малоконтрастных подвижных объектов при наличии значительных шумов во входном сигнале. Указанный алгоритм заключается в следующем.

Площадь кадра разбивается на большое число дискретных участков, каждый из которых анализируется отдельно и является элементарной зоной накопления. Зона накопления представляет собой прямоугольный участок кадра, состоящий из $m \times n$ элементов (рис. 3.4).

Размеры дискретной области накопления нужно выбирать с таким расчетом, чтобы при любых изменениях в кадре, вызванных перемещением объектов, хотя бы одна из дискретных областей накопления была бы полностью расположена в области изменений (рис. 3.4).



Рисунок – К пояснению выбора размеров дискретной области накопления

При интенсивных шумах, присутствующих в MPC, поступающем на вход порогового устройства, и, следовательно, при высокой плотности потока ложных сигналов на выходе порогового устройства, могут иметь место ошибочные обнаружения изменений (ложные тревоги) в любой из элементарных зон накопления или в нескольких элементарных зонах.

Обозначим через $P_{\pi.т.}(k)$ вероятность ложного обнаружения сигнала об изменениях в *k*-той зоне накопления. Тогда вероятность ложной тревоги при анализе сигнала целого кадра можно записать в следующем виде

$$P_{_{\text{Л.T.}}}(T_{_{\text{K}}}) = 1 - \prod_{k=1}^{N} [1 - P_{_{\text{Л.T.}}}(k)], (3.19)$$
где N – число зон накопления в кадре, равное отн
 $N - K/(m \times n)$

Учитывая, что ложные обнаружения в любой из зон равновероятны, выражение (3.19) можно записать иначе:

$$P_{_{\rm MT}}(T_k) = 1 - \left[1 - P_{_{\rm MT}}(k)\right]^N.$$
(3.20)

Величина $P_{\pi\tau}(k)$ обычно настолько мала ($P_{\pi\tau}(k) <<1$), что выражение можно значительно упростить, ограничившись всего одним членом полинома:

$$P_{\text{AT}}(T_k) \approx N \cdot P_{\text{AT}}(k) \,. \tag{3.21}$$

Решение об обнаружении подвижного объекта в *k*-той зоне накопления принимается в том случае, если число элементов (в пределах данной зоны накопления), в которых межкадровый разностный сигнал

 $Z'[E_{i,j}]$ (по абсолютной величине) превышает значение заданного порога больше или равно *p* при общем числе $q = m \times n$ элементов ($p \le q$). Иначе говоря, выполняется условие (3.13a) ($|Z[E_{i,j(m)}] + Z[E_{i,j}]| \ge \Pi_0$) в не меньшем, чем *p*, числе элементов в *k*-той зоны накопления.

При этом вероятность ложной тревоги в *k*-той зоне накопления можно вычислить по формуле

$$P_{\text{л.т.}}(k) = \sum_{l=p}^{q} C_{q}^{l} [P_{\text{л.т.}}]^{l} \cdot [1 - P_{\text{л.т.}}]^{q-l}, \qquad (3.22)$$

где $P_{n.т.}$ – вероятность выполнения события, описываемого условиями (3.12) или (3.12а), т.е. вероятность регистрации выброса шума за установленный порог ограничения, которая может быть рассчитана по формуле (3.15а); C_q^l - число сочетаний из q по l.

Вероятность ошибки второго рода – пропуска объекта при использовании рассмотренного алгоритма накопления

$$P_{\text{проп.}}^{(\text{H})} = 1 - P_{\text{прав.}}^{(\text{H})} = \sum_{l=q-p+1}^{q} C_{q}^{l} [P_{\text{проп.}}]^{l} \cdot [1 - P_{\text{проп.}}]^{q-l}, \qquad (3.23)$$

где $P_{проп.}$ – вероятность выполнения события, описываемого условиями (3.13) или (3.13а), т.е. условная вероятность пропуска сигнала в одном из элементов зоны накопления, которая может быть рассчитана по формуле (3.16).

Разумеется, что когда размеры подвижных объектов в кадре соизмеримы с размерами одного элемента изображения, применять методы накопления по площади области изменений не удается, и тогда единственной возможностью снижения вероятности ложной тревоги при обнаружении является использование методов оптимальной фильтрации, при которой достигается максимальное отношение сигнал/шум на входе порогового устройства.

На рисунке 3.5 в качестве примера приведён фрагмент характеристик обнаружения, иллюстрирующий зависимость вероятности правильного обнаружения $P_{\text{прав.}} = 1 - P_{\text{проп.}}^{(H)}$ от величины [$\mu_{(p.c.)} - \varepsilon/\sigma_{(p.c.)}$] при различных соотношениях «*p* из *q*», предопределяющих решающее правило в случае использования алгоритма накопления сигналов по площади области изменений в кадре (см. выше).



Рисунок 3.5 – Фрагмент характеристик обнаружения при различных соотношениях «р из q»

Значительный эффект повышения надёжности ABC с точки зрения улучшения характеристик обнаружения и снижения вероятности ложных тревог может дать *многоканальный принцип построения архитектуры* системы. При наличии нескольких (например, 3-х) независимых каналов наблюдения за объектами, различающихся используемым спектральным оптическим диапазоном или какими-либо другими параметрами, вероятности ошибок первого и второго рода могут оцениваться следующим образом

$$P_{\pi,\mathrm{T.}} = P_{\pi,\mathrm{T.}(1)} \cdot P_{\pi,\mathrm{T.}(2)} \cdot [1 - P_{\pi,\mathrm{T.}(3)}] + P_{\pi,\mathrm{T.}(2)} \cdot P_{\pi,\mathrm{T.}(3)} \cdot [1 - P_{\pi,\mathrm{T.}(1)}] + + P_{\pi,\mathrm{T.}(1)} \cdot P_{\pi,\mathrm{T.}(3)} \cdot [1 - P_{\pi,\mathrm{T.}(2)}] + P_{\pi,\mathrm{T.}(1)} \cdot P_{\pi,\mathrm{T.}(2)} \cdot P_{\pi,\mathrm{T.}(3)} P_{\mathrm{npon.}} = P_{\mathrm{npon.}(1)} \cdot P_{\mathrm{npon.}(2)} \cdot [1 - P_{\mathrm{npon.}(3)}] + P_{\mathrm{npon.}(2)} \cdot P_{\mathrm{npon.}(3)} \cdot [1 - P_{\mathrm{npon.}(1)}] + + P_{\mathrm{npon.}(1)} \cdot P_{\mathrm{npon.}(3)} \cdot [1 - P_{\mathrm{npon.}(2)}] + P_{\mathrm{npon.}(1)} \cdot P_{\mathrm{npon.}(2)} \cdot P_{\mathrm{npon.}(3)},$$
(3.24)

где $P_{\text{л.т.}(1),(2),(3)}$ и $P_{\text{проп.}(1),(2),(3)}$ – вероятности ложных обнаружений и пропусков в первом, втором и третьем каналах. Эти выражения соответствуют условию принятия решения об обнаружении объекта по правилу «2 из 3-х», т.е. условию совпадения результатов обнаружения не менее чем в 2-х из 3-х независимых каналах.

В частном случае, если считать равновероятными соответствующие события (ложные обнаружения и пропуски объектов) во всех *s* независимых каналах, можно записать

$$P_{\text{л.т.}} = \sum_{j=r}^{s} C_{s}^{j} [P_{\text{л.т.}(1,2..s)}]^{j} \cdot [1 - P_{\text{л.т.}(1,2..s)}]^{s-j}$$

$$P_{\text{проп.}} = \sum_{j=s-r+1}^{s} C_{s}^{j} [P_{\text{проп.}(1,2..s)}]^{jl} \cdot [1 - P_{\text{проп.}(1,2..s)}]^{s-j}, \qquad (3.25)$$

где *r* – минимальное число совпадений результатов обнаружения, достаточное для принятия окончательного решения о наличии объекта в зоне наблюдения.

При наличии априорной информации о возможных размерах, диапазоне скоростей, относительном контрасте и других параметрах объектов наблюдения можно, используя выражения ($3.12 \div 3.25$), оптимизировать параметры алгоритма обнаружения. Однако, учитывая достаточно сложный характер взаимосвязей множества различных, рассмотренных выше параметров (μ , ε , σ , p, q, N, m, n, v, d, k, $T_{\rm K}$ и др.), решение подобной задачи может быть с наибольшей эффективностью реализовано путём компьютерного моделирования.

Очевидно, что при использовании встроенных вычислительных средств возможно создание автоматизированных видеоинформационных систем, обладающих способностью адаптации и самоадаптации к возможным изменениям реальных условий функционирования.

3.2 Идентификация и классификация обнаруженных объектов

Идентификация (распознавание) объектов заключается в сравнении изображения одного объекта со всеми эталонами заданного класса. По наилучшему совпадению выносится решение об объекте.

Классификация предполагает наличие изображений нескольких различных объектов. Путём сравнения этих изображений с одним из эталонов по наилучшему совпадению выбирается TOT, который данному классу. Затем оставшиеся соответствует изображения сравниваются с другими эталонами и так далее, пока не будут исчерпаны все изображения объектов. Разумеется, на каждом шаге классификации должно выделяться изображение одного объекта, иначе задача становится практически не разрешимой.

3.2.1 Способ прямого сравнения изображения объекта с эталонным изображением

Пусть $[E_{i,j}]$ – исходное изображение объекта; $[F_{i,j}]$ – эталонное изображение. Тогда алгоритм прямого сравнения имеет вид

$$T = \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} \left[E_{i,j} - F_{i,j} \right]^2 \le D$$
(3.26)

где *D* – заданное пороговое различие.

Если указанное условие выполняется, то объект идентифицирован, если нет – надо перейти к следующему объекту (или эталону).

Такой способ чрезвычайно прост, особенно, если вычисление суммы квадратов разности заменить вычислением суммы модулей разности. Алгоритм может быть легко реализован и чисто аппаратными средствами за время, практически не превышающее время сканирования кадра телевизионным преобразователем.

Однако, при наличии в реальных условиях дестабилизирующих факторов надёжность такого способа невелика, вследствие интегрального характера алгоритма. Очевидно, что при большем значении порога D различные объекты могут удовлетворять условию (3.26), и, следовательно, могут возникнуть ошибки, связанные с неправильной идентификацией объекта (ошибки первого рода). При уменьшении D – наоборот, могут возникнуть ошибки типа пропуска объекта (ошибки второго рода). Регулируя величину D, можно лишь менять соотношение между вероятностями возникновения ошибок первого и второго рода в соответствии с заданным критерием оптимальности.

3.2.2 Корреляционный метод

Этот метод основан на вычислении взаимно-корреляционных сумм между объектом и всеми эталонами (или между имеющимися объектами и каждым из эталонов). Из множества альтернативных вариантов выбирается тот объект (или тот эталон), при котором получается максимальное значение взаимно-корреляционной суммы

$$K(k) = \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} \left[E_{i,j} \cdot F_{i,j} \right], \qquad (3.27)$$

Очевидно, что при $F_{i,j} = E_{i,j}$

$$K = K_{\max} = \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} \left[F_{i,j}^{2} \right].$$
(3.28)

При реализации данного алгоритма более удобно пользоваться нормированным значением взаимно-корреляционной суммы – коэффициентом корреляции

$$R(k) = K(k)/K_{\text{max}}$$
. (3.29)

Корреляционный метод более надёжен, однако он требует и значительно большего объёма вычислений, так как для каждой точки изображения требуется вычисление произведений $E_{i,j} \times F_{i,j}$. Но при обработке бинарных изображений вычисление произведений практически не связано с затратами времени, поскольку перемножение однобитовых чисел сводится к простой логической операции «И».

Следует иметь в виду, что оба рассмотренных выше метода требуют выполнения ряда условий: одинаковой ориентации изображений объекта и эталона, совмещения их по пространственным координатам и выдерживания одинаковых масштабов. Всё это может потребовать дополнительных вычислительных затрат. Наряду с этими недостатками укажем на необходимость хранения в памяти АВС большого объема данных, особенно при многоальтернативном варианте решения задачи.

3.2.3 Методы распознавания, основанные на использовании системы признаков

В данном случае также используются эталоны объектов. Однако, в качестве непосредственных элементов сравнения выступают не элементы изображений объекта и эталона, а признаки объекта и эталона. Использование признаков в качестве элементов сравнения позволяет иногда упростить реализацию последующего этапа – этапа распознавания или идентификации объектов. Путём выделения признаков удаётся создать сжатое описание объекта в выбранной системе признаков, что резко сокращает объём данных, хранящихся в памяти системы, и, главное, время обработки информации по сравнению с вышерассмотренными методами. Однако очевидно, что реализация алгоритмов выделения признаков также связана с определенными затратами времени по этому при выборе наиболее информативных признаков необходимо принимать во внимание степень сложности процедуры выделения признаков за ограниченное время анализа. Важно также учитывать как свойства самих объектов, так и возможности телевизионных датчиков – первичных формирователей сигнала изображения с точки зрения их разрешающей способности.

Примечание. Далее пойдёт речь об обработке монохромных (не цветных) изображений. Следует заметить, что цветные изображения в большинстве случаев после соответствующего декодирования сигналов можно представить совокупностью трёх отдельных монохромных составляющих, каждую из которых можно подвергнуть обработке в соответствии с ниже рассматриваемыми алгоритмами.

В автоматизированных телевизионных системах наблюдения наиболее предпочтительными являются геометрические признаки объектов:

– площадь и периметр изображения объекта;

– число отверстий в теле объекта;

– размеры вписанных и описанных простейших геометрических фигур (окружностей, прямоугольников, треугольников и др.);

– число и взаимное расположение углов;

– моменты инерции изображений объектов.

Важной особенностью большинства геометрических признаков является их инвариантность относительно разворота изображения объекта. Кроме того, путём нормирования геометрических признаков друг относительно друга, достигается инвариантность относительно масштаба изображения объекта. Ниже рассмотрим в порядке возрастания сложности возможные алгоритмы выделения признаков, наиболее часто используемых при проектировании ABC.

Определение площади и периметра.

Площадь изображения объекта вычисляется путём простого подсчёта числа элементов, относящихся к объекту

$$A = \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} S_{i,j}; S_{i,j} = \begin{cases} 1, (i,j) \in L \\ 0, (i,j) \notin L \end{cases}$$
(3.30)

где L – множество координат массива [$E_{i,j}$], принадлежащих объекту.

Периметр изображения объекта вычисляется после того, как на предварительном этапе выделены границы объекта (см. п. 2.3)

$$P = \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} K_{i,j} K_{i,j} = \begin{cases} 1, (i,j) \in a_{rp.} \\ 0, (i,j) \notin a_{rp.} \end{cases},$$
(3.31)

где *а*_{гр.} – множество граничных (контурных) точек изображения объекта.

На основе выделенных признаков можно сформировать обобщенный нормированный признак, инвариантный к масштабу изображения

$$U = A/P^2$$
 или $V = P/A^{1/2}$ (3.32)

Определение радиусов вписанных и описанных окружностей. Процедура складывается из двух этапов (рис 3.6).



Рисунок 3.6 – Определение радиусов описанной и вписанной окружностей

1. Определение координат геометрического центра изображения объекта

$$X_{\rm ur} = \frac{\sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} S_{i,j} \cdot x_{i,j}}{\sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} S_{i,j}}; \quad Y_{\rm ur} = \frac{\sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} S_{i,j} \cdot y_{i,j}}{\sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} S_{i,j}}, \quad (3.33)$$

где $x_{i,j}$; $y_{i,j}$ – координаты точек изображения объекта, которые могут быть заменены соответствующими номерами столбцов и строк, содержащих данный элемент $x_{i,j} = i$; $y_{i,j} = j$.

2. Вычисление минимального и максимального расстояний от центра до границ изображения объекта, выделенных на предварительном этапе (см. п. 2.3)

$$r_{i,j} = \sqrt{(x_{i,j} - X_{\text{ur.}})^2 + (y_{i,j} - Y_{\text{ur.}})^2}; \qquad (3.34)$$
$$R_{\text{max}} = r_{i,j(\text{max})}; R_{\text{min}} = r_{i,j(\text{min})}, \text{ rge } i, j \in a_{\text{rp.}}$$

Очевидно, что нормированный признак $R' = R_{max}/R_{min}$ всегда является инвариантным к масштабу изображения объекта.

Определение сторон описанного прямоугольника.

Это – одна из простейших процедур.

1. Надо определить максимальные и минимальные значения абсцисс и ординат изображения объекта i_{max} и i_{min} ; j_{max} и j_{min} .

2. Высота и основание прямоугольника определяются следующим образом

$$L = i_{max} - i_{min} ; H = j_{max} - j_{min}$$
(3.35)

Отметим, что данный признак (в отличие от предыдущих) не является инвариантным к развороту изображения объекта (рис. 3.7).



Рисунок 3.7 – Определение сторон описанного прямоугольника

Определение числа и взаимного положения углов

На предварительном этапе должны быть выделены и пронумерованы элементы контура объекта.

Классический способ определения угловых точек изображения объекта заключается в анализе небольшого фрагмента контура в окрестностях данной точки и в определении радиуса её кривизны. Если этот радиус окажется меньше установленного порога – это угловой элемент, в противном случае – нет. Однако, такой способ связан с очень большим объёмом вычислений.

С практической точки зрения в быстродействующих ABC, работающих в реальном масштабе времени, предпочтительным представляется более простой алгоритм. Он заключается в оценке расстояний между начальной и конечной точками фрагмента контура, т.е. между элементами контура с порядковыми номерами k - 2 и k + 2 (рис 3.8).

$$|x(k-2)-x(k+2)| + |y(k-2)-y(k+2)| \le H.$$
(3.36)

Если условие (3.34) выполняется, тогда данная точка контура принадлежит множеству угловых точек *L*. Здесь *H* – пороговое значение, выбираемое с учётом свойств изображения объектов данного класса.



Рисунок 3.8 – Определение числа и взаимного положения углов

При реализации вычислительной процедуры необходимо соблюдать следующие правила.

1. Если, в соответствии с условием (3.36), оказываются выделенными несколько смежных элементов контура, то решающее правило должно предусматривать выбор только одного элемента в качестве углового, например, по минимуму значения модуля разности, а в случае совпадения значений – любой из этих элементов. Это, разумеется, может привести к некоторой ошибке в определении координат углового элемента, но позволит избежать более существенной (аномальной) ошибки, связанной с неправильным определением числа углов и, следовательно, формы объекта.

2. Выделенным угловым элементам целесообразно присваивать порядковые номера, которые могут быть использованы на последующем этапе распознавания и определения ориентации объекта.

3. Процедуру анализа контурных элементов удобно осуществлять в цикле, однако два первых и два последних элемента приходится осуществлять вне цикла, так как для них не удаётся задать значения переменной k + 2 и k - 2.

Определение моментов инерции изображения объекта

Примечание.

Термин «моменты инерции изображения объекта» здесь, разумеется, не имеет отношения к механике. Его использование оправдано в том смысле, что для вычисления указанного признака используются математические выражения, аналогичные тем, что и при вычислении механических моментов инерции материального тела, если вместо значений масс отдельных точек тела подставлять значение освещенностей в соответствующих точках его изображения.

Моменты инерции являются довольно информационными признаками для последующего этапа распознавания образов, но их определение является не такой уж простой задачей. Вместе с тем, в

некоторых случаях могут использоваться промежуточные результаты вычислений, например, для определения угловой ориентации изображения объекта относительно приборной системы координат (см. п. 3.3).

Обозначим главные искомые моменты инерции изображения объекта через J1 и J2 (рис. 3.9б). Однако, чтобы найти J1 и J2 необходимо предварительно определить так называемые *промежуточные моменты* J_x и J_y, т.е. моменты инерции относительно вертикальной и горизонтальной осей приборной системы координат, а также *смешанный момент* $J_{x,y}$ (рис.3.9 а).



Риснуок 3.9 – Определение промежуточных (а) и главных (б) моментов инерции

Вычисление осуществляется в следующем порядке.

1. Определяются координаты центра «тяжести» (энергетического центра) изображения объекта

$$X_{\mu_{9}} = \left[\sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} \left(x_{i,j} \cdot E_{i,j}\right)\right] / \left[\sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} E_{i,j}\right]$$
$$Y_{\mu_{9}} = \left[\sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} \left(y_{i,j} \cdot E_{i,j}\right)\right] / \left[\sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} E_{i,j}\right].$$
(3.37)

2. Определяются промежуточные моменты J_x , J_y , $J_{x,y}$

$$J_{x} = \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} \left[\left(x_{i,j} - X_{\mathcal{P}} \right)^{2} \cdot E_{i,j} \right]$$

$$J_{y} = \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} \left[\left(y_{i,j} - Y_{\mathcal{P}} \right)^{2} \cdot E_{i,j} \right]$$

$$J_{xy} = \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} \left[\left(x_{i,j} - X_{\mathcal{P}} \right) \left(y_{i,j} - Y_{\mathcal{P}} \right) \cdot E_{i,j} \right]. \quad (3.38)$$

3. Рассчитываются главные моменты

$$J_{1,2} = \frac{J_x + J_y}{2} \pm \sqrt{\frac{1}{4} (J_x - J_y)^2 + J_{xy}^2} .$$
(3.39)

Следует иметь в виду, что на практике в реальных условиях наблюдения выделение признаков объектов всегда осуществляется с

некоторой погрешностью. Путём моделирования работы ABC на стадии проектирования или на этапе обучения-калибровки системы (см. п. 4.2) следует выявить характер и степень возможного рассеяния оценок используемых признаков для каждого из ожидаемых объектов, что позволит оптимизировать конкретные параметры используемых алгоритмов и решающих правил.

На рисунке 3.10 показан примерный вид гистограмм, характеризующих распределение одного из гипотетических рабочих признаков (*u*) для различных объектов



Рисунок 3.10 – G₁(u), G₂(u),...G_n(u) – гистограммы распределения признака и соответственно для 1, 2,...n-го объектов;h₁, h₂,..h_{n-1} – границы диапазонов значения признака x, соответствующие областям опознавания объектов 1, 2,...n.

С учётом вида полученных гистограмм устанавливаются оптимальные границы диапазонов значений того или иного признака, которые используются при формировании решающего правила. Очевидно, что подобные семейства гистограмм должны быть заблаговременно получены на этапе моделирования (или на этапе обучения) АВС для каждого из рабочих признаков, используемых при идентификации объектов.

При большом числе возможных вариантов (например, при решении задачи классификации выделенных объектов) может быть рекомендован *многоступенчатый иерархический* алгоритм. При этом на каждой ступени распознавания используется какой-либо один из вышерассмотренных признаков (площадь, периметр, радиусы вписанных и описанных окружностей, моменты инерции, число и расположение углов и т.д.).

Пусть возможны *К* решений (*К* альтернатив). Тогда алгоритм распознавания можно представить в виде дерева (графа) (рис. 3.11).



Рисунок 3.11 – Многоступенчатый алгоритм (граф) распознавания

Здесь I, II, III, ... – уровни распознавания; *A*, *P*, *J*, ... – алгоритмы сравнения по площади, периметру, моментам инерции и т.д., включая выделение соответствующих признаков изображений объектов; 1, 2, 3, ... *K* – номера возможных решений.

Важно отметить, что наибольший эффект сокращения времени обработки информации достигается при рациональном распределении типов используемых признаков по уровням распознавания. Так, на нижних уровнях, когда приходится иметь дело с максимальным числом вариантов, следует привлекать признаки, не требующие больших вычислительных затрат на их определение (например, площади и периметры объектов), а наиболее информативные (такие, например, как моменты инерции) – применять на верхнем уровне, где число альтернатив минимально.

В разделе 4 мы более подробно познакомимся с подобным подходом на конкретном примере реализации алгоритма распознавания изображения участка звёздного неба в автономной системе астроориентации

3.3 Об измерении параметров объектов наблюдения

Измерение размеров объекта может осуществляться посредством выделения на этапе предварительной обработки соответствующих геометрических признаков, например, площади и периметра изображения, размеров вписанных и описанных геометрических фигур (см. раздел 3.2).

Измерение пространственного положения объекта сводится к измерению координат характерных точек его изображения в приборной системе координат.

Примечание.

Постановка задачи определения текущих координат (пространственного положения) объекта в основном имеет смысл, когда размеры объекта малы по сравнению с размерами установленной зоны наблюдения. В противном случае, очевидно, удобнее говорить о координатах центра некоторой области исследуемого пространства, которую занимает обнаруженный объект.

Такими точками могут, например, служить геометрический или энергетический центры изображения (см. раздел 3.2). В случае

необходимости измерения координат точечных объектов в сложных условиях наблюдения при малых отношениях сигнал/шум эффективным может оказаться более сложный алгоритм интерполяции видеосигнала по методу наименьшего среднеквадратического отклонения, подробно описанный в разделе 4.

Определение пространственной ориентации объекта

Как указывалось выше, иногда в задачах распознавания возникает необходимость компенсации взаимного разворота изображений объекта и эталона. При этом приходится решать вспомогательную задачу – *определение угла наклона* главной энергетической оси изображения объекта в приборной системе координат (рис. 3.12).



Рисунок 3.12 – Определение угла наклона изображения объекта

$$\Theta = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{2J_{xy}}{J_x - J_y},\tag{3.40}$$

где J_x , J_y , $J_{x,y}$ – промежуточные моменты инерции изображения объекта, способ вычисления которых рассмотрен в разделе 3.2 (ф. 3.38).

Измерение скорости и направления перемещения объекта, обнаруженного в зоне наблюдения, связано с необходимостью измерения координат одной и той же произвольной точки, связанной с изображением объекта (или с областью изменений при формировании межкадрового разностного сигнала) в два различных момента времени (рис. 3.13). При наличии таких измерений путем несложных вычислений определяются относительная скорость и направление перемещения области изменений в кадре, а, следовательно, в конечном счете, и самого объекта.

$$v_x = \frac{x_j(1) - x_j(2)}{T_{(1+2)}}, \quad v_y = \frac{y_j(1) - y_j(2)}{T_{(1+2)}}, \quad tg\alpha = \frac{v_x}{v_y}, \quad (3.41)$$

где v_x и v_y – соответственно горизонтальная и вертикальная составляющие скорости перемещения области изменений в кадре; α – угол между направлением перемещения и направлением оси *X*; $T_{(1+2)}$ – промежуток

времени между двумя последовательными измерениями координат точки *j* области изменений.

Очевидно, что с целью достижения максимальной точности измерения скорости целесообразно промежуток времени $T_{(1\div2)}$, кратный периоду сканирования кадра, выбирать таким, чтобы обеспечить максимальные величины разностей $x_j(1) - x_j(2)$ и $y_j(1) - y_j(2)$, которые возможны, учитывая число элементарных зон накопления в кадре и диапазон измеряемых скоростей.



Рисунок 3.13 – Определение скорости перемещения области изменений в кадре

До сих пор предполагалось, что измерение значения координат и скорости перемещения области изменений в кадре однозначно (хотя и с ограниченной точностью) связаны с соответствующими параметрами обнаруженного объекта. Однако это имеет место лишь в том случае, если объект перемещается в плоскости, перпендикулярной оси передающей камеры, осуществляющей наблюдение, и кроме того известно расстояние от камеры до плоскости перемещения. Если же нужно измерить координаты и скорость объекта, перемещающегося не в некоторой плоскости, а в некотором пространстве, и при этом расстояние до объекта невозможно заранее, то необходимо иметь информацию об объекте, оценить полученную при наблюдении одновременно с двух различных точек зрения. Легко показать из стереометрических рассуждений, координаты области изменений в кадрах стереопары x'_{i} , y'_{i} и x''_{i} , y''_{i} , полученные при наблюдении с разных точек зрения, посредством простых линейных преобразований (с соответствующих масштабных коэффициентов) учетом связаны координатами х, у, z подвижного объекта в трехмерном декартовом пространстве.

66

3.4 Методы моделирования на этапе проектирования АВС

Методы математического и физического моделирования проектируемой системы помогают решать задачи, связанные с уточнением параметров решающих правил при реализации различных алгоритмов обработки сигналов в ABC. Они способствуют выявлению обоснованных требований к отдельным звеньям системы особенно в тех случаях, когда аналитические расчётные методики оказываются мало эффективными или достаточно сложными.

На начальном этапе разработки ABC самым доступным, дешёвым, но вместе с тем достаточно гибким и эффективным средством представляется *математическое (имитационное) компьютерное моделирование*. В качестве непосредственного объекта исследования оно предполагает использование некоторой программы, представляющей собой комплексную математическую модель.

Эта модель обычно включает в себя модели основных звеньев системы: изображения объекта, оптической системы, фотоприёмного узла (анализатора изображения), различных дестабилизирующих факторов (помех) и др., а также модель используемого алгоритма цифровой обработки сигнала.

К числу несомненных достоинств метода математического моделирования следует отнести возможность получения за короткое время и без существенных материальных затрат большого объема данных, характеризующих поведение будущей системы, её метрологические характеристики (характеристики обнаружения, распознавания объектов) в зависимости от каждого из интересующих параметров в отдельности.

Однако математическое моделирование не может полностью гарантировать от ошибок, связанных с неточным заданием исходных данных и с некоторыми упрощениями, допущенными при формировании модели.

Наибольшее приближение к реальным условиям функционирования проектируемой системы даёт физическое моделирование. Физическая модель АВС обычно реализуется на базе универсальных технических средств, включающих реальный телевизионный датчик, блок АЦП, контроллер сопряжения, ЦВУ (например, персональный компьютер), другие функциональные узлы, а также образцы наблюдаемых объектов (или хотя бы их изображений). Заметим, что физическая модель, как правило, не является конструктивной моделью, макетом или тем более опытным системы (прибора). К такой модели образцом проектируемой не особых требований предъявляется минимизации габаритов И энергопотребления, она может быть достаточно громоздкой. Важно лишь, чтобы модель обеспечивала максимум функциональных возможностей и позволяла достаточно легко получать объективные результаты испытаний, сопоставимые с результатами математического моделирования.

67

К недостаткам физического моделирования можно отнести недостаточную гибкость и меньшую информативность по сравнению с математическим моделированием. При физическом моделировании, например, не удаётся исследовать влияние параметров различных звеньев в отдельности на качественные характеристики проектируемой системы. Не удаётся исключить или существенно уменьшить влияние отдельных дестабилизирующих факторов, влияющих на качественные характеристики системы. Это связано с тем, что в физической модели используются реальные функциональные узлы: телевизионный датчик, блок АЦП и другие, улучшить параметры которых можно только путём их замены, что часто сопряжено со значительными материальными затратами. Однако, путём сопоставления некоторых частных результатов, полученных при соответствующими физическом моделировании с результатами, полученными при математическом компьютерном моделировании, можно с высокой степенью вероятности доказать адекватность обеих моделей. Таким образом, именно совокупность обоих методов моделирования может дать наибольший эффект с точки зрения сочетания достоверности и полноты полученной информации.

Ниже рассмотрим основные принципы построения компьютерной имитационной модели на примере ABC наблюдения за малоразмерными (точечными) объектами. Как уже было сказано подобная модель может служить наиболее эффективным средством на начальном этапе проектирования.

3.4.1 Общие принципы реализации компьютерной модели АВС

Комплексная компьютерная имитационная модель может использоваться для синтеза, анализа, прогнозирования работы ABC, осуществляющей наблюдения за малоразмерными подвижными объектами. С помощью модели можно решать задачи обоснования требований к отдельным звеньям системы с учетом необходимых эксплуатационных параметров в реальных условиях функционирования (при различных дистанциях наблюдения, энергетических и динамических параметрах объектов и др).

Структура математической модели представлена на рисунке 3.14.

Ввод исходных данных осуществляется в интерактивном режиме. При этом вводимые переменные можно подразделить на следующие группы.

Параметры оптической системы:

- эффективный диаметр входного зрачка;
- коэффициент пропускания оптической системы;
- фокусное расстояние объектива;

 радиус кружка рассеяния изображения точечного объекта (при аппроксимации функции рассеяния точки гаусоидой вращения или др.).



Рисунок 3.14 – Структурная схема модели

Параметры фотоприемного устройства:

- пространственный шаг элементов вдоль направления строк и столбцов;
- зазор между элементами вдоль строк и столбцов;
- время накопления зарядов;
- средняя плотность темновых токов по кристаллу;
- относительные неравномерности чувствительности и средней плотности темновых токов по уровень "геометрического" шума;
- интервалы пространственной корреляции "геометрического" шума вдоль направлений строк и столбцов элементов;
- максимальное число накапливаемых зарядов при насыщении ячейки ФПУ;
- экспозиция насыщения и др.

Параметры алгоритма первичной обработки сигнала:

- количество снимаемых отсчетов;
- относительный порог обнаружения отношение порогового уровня сигнала обнаружения к среднеквадратическому значению уровня шумов;

- размер скользящей апертуры цифрового фильтра, используемого при первичной обработке сигнала, поступающего с выхода АЦП;
- число разрядов АЦП, предопределяющие шумы квантования;
- коэффициент подавления аддитивной составляющей «геометрического» шума при первичной коррекции сигнала и др. Условия наблюдения:
- угловые координаты трёх «наблюдаемых» объектов, задаваемые в двух перпендикулярных плоскостях, проходящих через главную оптическую ось системы (последняя считается перпендикулярной фоточувствительной площадке ФПУ и проходит через её центр);
- энергетические параметры объектов, задаваемые в звездных величинах;
- параметры, характеризующие динамику направление И перемещения изображения объектов в поле зрения ОЭС. При этом например, динамика перемещения может, задается В параметрическом виде с помощью коэффициентов А, В, С (первой, полинома, аппроксимирующего второй третьей степени) И изменение во времени модуля угловых перемещений объектов

$$S(t) = A \cdot t + B \cdot t^{2} + C \cdot t^{3}, \qquad (3.42)$$

при этом направление перемещения задаётся посредством угла α между направлениями оси X и проекцией вектора скорости в плоскости анализа изображения (рис. 3.15).



Рисунок 3.15 – Задание системы координат и направления вектора перемещения объектов в поле зрения ABC

• интервал времени между соседними отсчётами;

- параметры, характеризующие детерминированную составляющую неравномерности фона в поле зрения ОЭС (первый параметр определяет относительную неравномерность фона в пределах поля зрения в % по отношению к среднему уровню; второй – крутизну фронта нарастания фона;
- параметры, характеризующие случайную составляющую неравномерности фона (интервалы пространственной корреляции "геометрического" шума вдоль направлений строк и столбцов элементов);
- средняя эффективная яркость фона.

Параметры, определяющие режим статистической обработки полученных реализаций.

- число реализаций;
- доверительная вероятность для определения границ погрешностей результатов измерения при моделировании и др.

Предварительная обработка исходных данных предполагает преобразование вводимых величин, с целью согласования размерностей, расчёт коэффициентов необходимых для преобразования масштаба изображения, увязки угловых и линейных координат. Также на основе введённых параметров осуществляется формирование переменных и констант, используемых при моделировании.

Некоторые теоретические предпосылки для реализации других модулей компьютерной модели будут рассмотрены ниже.

К числу важных промежуточных задач, которые приходится решить при реализации модели относятся:

- исследование особенностей физических процессов, протекающих в многоэлементных структурах фотоприемных устройств с учетом физических свойств различных фоточувствительных материалов;
- исследование физической природы источников помех, действующих в различных звеньях системы и др.;
- исследование различных алгоритмов обработки сигналов, используемых для автоматического обнаружения и измерения параметров объектов.

В соответствии с этим моделирование ABC разбивается на следующие этапы:

- моделирование сигнально-фоновой ситуации;
- моделирование различных видов помех;
- моделирование процедур предварительной обработки сигнала (с учетом искажений, связанных с квантованием сигналов при аналого-цифровом преобразовании);
- моделирование различных алгоритмов целевой обработки сигналов (связанных в общем случае с решением задач обнаружения,

распознавания и оценки параметров исследуемых объектов, а также оценки метрологических параметров проектируемой системы с учетом заданных доверительных интервалов) [9].

В самом общем виде процесс преобразования сигнала в АВС можно представить в следующем виде (рис. 3.16).



Рисунок 3.16 – Преобразования сигнала в АВС

Совокупность излучателей, находящихся в пространстве объектов, а также среда распространения оптических сигналов, создаваемых этими излучателями, образуют так называемую фоновоцелевую обстановку (ФЦО). Приемная оптическая система (ОС) собирает поток, излучаемый наблюдаемым объектом или отраженный от него, формирует этот поток и направляет его на приемник излучения, который преобразует оптический сигнал в электрический.

Примечание.

Деление излучателей, находящихся в угловом поле ОЭС, на цели, помехи и фоны часто является условным. Например, при проектировании или исследовании АВС, предназначенных для визуализации или картографирования случайного неоднородного («пестрого») поля объектов, излучающих на невидимых глазу участках оптического диапазона, фоновое излучение является основным источником информации.

Оптическую систему и фотоприемное устройство (ФПУ) в первом приближении можно рассматривать как линейные звенья с функциями преобразования $W_{\rm OC}$ и $W_{\Phi\Pi y}$, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и цифровое вычислительное устройство (ЦВУ) – нелинейные звенья с функциями преобразования W_{AIIII} и W_{IIBV} .

3.4.2 Предпосылки моделирования сигнально-фоновой ситуации, предопределяющей условия функционирования АВС

Учитывая характер задач, решаемых оптико-электронной системой – наблюдение за малоразмерными (фактически точечными) подвижными объектами при наличии подстилающего существенно неравномерного фона, целесообразно сигнально-фоновую обстановку при моделировании представлять следующим образом.

1. В качестве исходной модели для каждой из наблюдаемых целей в плоскости объектов используется пространственная дельта-функция:

$$S(x, y) = \rho \,\delta(x - x_0) \cdot \delta(y - y_0),$$
 (3.43)
где: x_0 и y_0 – координаты точечного объекта; ρ – нормирующий множитель, непосредственно связанный с энергетическими параметрами объекта и определяемый из условия:

$$\rho = \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} S(x, y) dx dy.$$
(3.44)

2. В общем случае проявление фонового излучения в плоскости объектов целесообразно рассматривать как совокупность стационарной (с точки зрения пространственных координат) составляющей случайного поля яркости и составляющей в виде квазидетерминированной функции (одной или нескольких) перепада яркости с различной шириной переходной области и с заданным направлением вектора градиента.

Стационарную составляющую фона В виде облаков или рассеянного солнечного излучения (подстилающую поверхность) можно представить как случайное поле яркости типичного площадного объекта. Функция $L_{\phi}(x,y)$, описывающая распределение яркости фона является случайной 2-х мерной функцией, поскольку на практике яркость фона в каждой точке поверхности зависит от многих, как правило, независимых факторов. Ввиду того, что излучение фона определяется многими взаимно независимыми факторами, закон распределения энергетической яркости фона с достаточно хорошим приближением можно считать нормальным и эргодическим, когда среднее по множеству реализаций равно среднему по одной реализации (рис. 3.17).

$$p(L_{\phi}) = \frac{1}{\sqrt{2\sigma_{L_{\phi}}}} \cdot exp \ \{-\frac{(L_{\phi} - \overline{L}_{\phi})^2}{2\sigma_{L_{\phi}}^2}\},\tag{3.45}$$

где: $\sigma_{L_{\phi}} \approx \frac{1}{3} \overline{L}_{\phi}(x) \approx \frac{1}{6} L_{\Phi \max}.$



Рисунок 3.17 – К пояснению модели стационарной составляющей случайного поля яркости фона

Исходным материалом для моделирования случайного поля яркости являются независимые числа, полученные подпрограммой, генерирующей случайные числа. Их совокупность можно рассматривать как случайное δ-поле – обобщение понятия дискретного белого шума на случай

нескольких переменных. Моделирование δ -поля осуществляется следующим образом: пространственно–временной координате x_i , y_j , t_k ставятся в соответствие выборочные значения из датчика нормальных случайных чисел с параметрами (0,1). Неограниченные реализации однородного стационарного случайного поля с различными интервалами пространственной корреляции можно получить с помощью алгоритма пространственно–временного скользящего суммирования δ -поля, более подробно описанного, например, в работе [10].

Перепады яркости фона могут быть, например, связаны с появлением в поле зрения ОЭС границы облачного покрова. При этом наряду с сигналом от точечной цели может иметь место резкий скачок яркости фона. Другой причиной изменения яркости фона может быть появление в поле зрения ОЭС, базирующейся на космическом аппарате, переходной области земля-атмосфера, атмосфера-космос. В этом случае величина градиента изменения яркости фона будет меньше.

В предельном случае в качестве модели абсолютно резкого скачка яркости фона может рассматриваться ступенчатая функция вида

$$\theta \sigma(x - x_0) \cdot \sigma(y - y_0) = \theta \int_{-\infty}^{x} \int_{-\infty}^{y} \delta(u - x_0) \cdot \delta(v - y_0) \, du \, dv, \qquad (3.46)$$

где: $\sigma(z) = \theta \theta \begin{cases} 1 \text{ при } z \ge 0 \\ 0 \text{ при } z < 0 \end{cases}$; θ – масштабный коэффициент, характеризующий величину изменения яркости $L_{max} - L_{min}$.

Таким образом исходная сигнально-фоновая обстановка при моделировании в общем случае задаётся в виде некоторой пространственно-временной функции $S_{\Sigma BX}$. (*x*, *y*, *t*) – аддитивной композиции из трёх составляющих:

- одного или нескольких точечных объектов (ф. 3.43);

 – случайного двухмерного поля с заданной корреляционной функцией, имитирующей стационарную составляющую фона вида (ф.3.45);

 одной или нескольких ступенчатых функций (ф. 3.46), которые имитируют возможные значительные перепады в виде скачков яркости фона в зоне наблюдения.

Возможно также задание функций плавного изменения средней яркости фона с различной шириной переходной области и с заданным направлением вектора градиента.

3.4.3 Моделирование влияния оптической системы, фотоприёмного устройства и процедуры первичной обработки сигнала

Оптическая система в первом приближении может рассматриваться как линейное входное звено с пространственной импульсной характеристикой g(x,y) – весовой функцией объектива в виде гауссоиды вращения (ф. 1.1)

$$g(x, y) = \frac{1}{2\pi R^2} \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2R^2}\right],$$

где R – радиус кружка рассеяния объектива, определяемый на уровне 0,606 $(1/\sqrt{e})$; x_0 , y_0 – координаты центра пятна рассеяния (рис. 3.18).



Рисунок 3.18 – Одномерное представление распределения освещенности от точечно объекта в плоскости анализа изображения при аппроксимации весовой функции объектива в виде гауссоиды вращения.

Разумеется, при необходимости аппроксимирующая функция может быть усовершенствована путём введения дополнительных параметров, отражающих возможные изменения пространственной импульсной характеристики широкоугольной оптической системы при перемещении объектов в поле зрения ОЭС.

3.4.4 Моделирование источников внутренних помех

Второй этап преобразования сигнала осуществляется ФПУ, где сигнал изображения E(x, y), представляющий собой в общем случае непрерывную функцию непрерывных двумерную пространственных аргументов, преобразуется в электрические сигналы $U(x_i, y_i)$, то есть в непрерывную функцию дискретных пространственных двумерную аргументов x_i, y_j : $E(x, y) \Rightarrow U(x_i, y_j)$.Сигнал $U(x_i, y_j)$ представляет собой ФПУ, пропорциональные видеоимпульсы на выходе матричного накопленным зарядам $Q(x_i, y_i)$. Для фотоприемника с накоплением энергии (например, матрица ФПЗС, КМОП или др.) величина напряжения сигнала видеоимпульса, снимаемого с *i* -го элемента *j* -ой строки, определяется выражением (1.3)

$$U(x_i, y_j) = \int_{x_i - \Delta x}^{x_i + \Delta x y_i + \Delta y} \int_{y_i - \Delta y} ST_{\mu} E(x, y) dx dy,$$

На рисунке 3.19 показан пример распределение освещенности на фоточувствительной площадке ФПУ вдоль оси X от малоразмерного (точечного источника) и формирование зарядового рельефа. Здесь R – радиус пятна рассеяния на уровне $0,606E_{max}$; d и d' – шаг элементов ФПУ по горизонтали и вертикали соответственно; δ – зазор между столбцами.

Таким образом, конечность размеров фоточувствительных элементов предопределяет погрешность дискретизации исходного изображения.



Рисунок 3.19 – Распределение освещенности на фоточувствительной площадке ФПУ и формирование зарядового рельефа.

При формировании массива *темновых зарядов* следует учитывать как флуктуации темновых зарядов в накопительных ячейках относительно среднего значения, так и аддитивную составляющую «геометрического» шума, связанную с неравномерностью средней плотности темновых токов накопления по кристаллу. Среднее значение темнового заряда, накапливаемого в ячейке, определяется выражением:

$$\overline{Q}_{\mathrm{T}} = \overline{i}_{\mathrm{T}} A_{\mathrm{3JI}} T_{\mathrm{H}}, \qquad (3.47)$$

где: $i_{\rm T}$ – средняя плотность темнового тока накопления заряда, характерная для данного полупроводникового материала при рабочей температуре кристалла; $A_{3,\rm n}$. – площадь электрода, под которым осуществляется накопление. При моделировании «геометрического» шума используются также такие параметры как относительная неравномерность средней плотности темновых токов накопления по кристаллу и интервалы пространственной корреляции «геометрического» шума вдоль направлений строк и столбцов элементов.

При моделировании фоновой составляющей учитывается также заданная неравномерность чувствительности отдельных элементов

Формирование массива *сигнальных зарядов* осуществляется с учетом случайного распределения чувствительности по кристаллу ФПУ с заданным интервалом корреляции (мультипликативной составляющей «геометрического шума»).

Учитывая принятую аппроксимацию весовой функции оптической системы (1.1), распределение освещенности от точечного объекта по фоточувствительной площадке определяется выражением

$$E(x, y) = \frac{\Phi}{2\pi R^2} \exp\left[-\frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{2R^2}\right],$$
(3.48)

где Φ – поток оптического излучения, создающего изображение точечного объекта; R – радиус кружка рассеяния объектива, определяемый на уровне 0,606 E_{max} (E_{max}/\sqrt{e}); x_0 , y_0 – координаты центра пятна рассеяния. А сигнальная составляющая накопленного заряда

$$Q(x_{i}, y_{j}) \div \int_{-d/2}^{+d/2} \int_{-d/2}^{+d/2} E(x, y) dx dy .$$
(3.49)

Как уже было сказано выше (см. п. 1.1.), динамику перемещения наблюдаемых объектов можно задать в параметрическом виде с помощью коэффициентов *A*, *B*, *C* (первой, второй и третьей степени) полинома, аппроксимирующего изменение во времени модуля угловых перемещений объектов в соответствии с формулой (3.42). Направление перемещения задается посредством угла α между направлением оси *X* и проекцией вектора скорости в плоскости анализа изображения (рис. 3.15).

При моделировании *массива шумовых составляющих* в ячейках ФПУ учитывается совокупность случайных флуктуаций, обусловленных наличием сигнальной, фоновой и темновой составляющих зарядов в каждой ячейке. При этом шумовая составляющая заряда в каждой ячейке определяется путем многократного задания флуктуаций зарядов по случайному закону с заданным распределением с учетом влияния всех вышеперечисленных факторов.

Примечание.

Флуктуация числа зарядов подчиняется закону Пуассона. Однако поскольку число накапливаемых зарядов достаточно велико (n_q>>100), распределение Пуассона можно аппроксимировать нормальным законом распределения с дисперсией, равной среднему значению. Тогда среднеквадратическое значение шумовой составляющей на выходе ФПУ будет

$$\sigma_{\rm III} = \sqrt{\sigma_{\rm IIIT}^2 + \sigma_{\rm III\varphi}^2 + \sigma_{\rm IIIc}^2 + \sigma_{\rm III}^2 + \sigma_{\rm IIII}^2 + \sigma_{\rm IIIII}^2},$$

где $\sigma_{\rm mr}$ – среднеквадратическое число зарядов в *i*-той ячейке ФПУ, характеризующее флуктуацию числа темновых зарядов; $\sigma_{\rm m\phi}$ – среднеквадратическое значение флуктуации числа зарядов, обусловленных фоновым излучением; $\sigma_{\rm mc}$ – среднеквадратическое значение флуктуации числа сигнальных зарядов, накапливаемых в ячейках, характеризующее фотонный шум; $\sigma_{\rm mr}$ – среднеквадратическое отклонение среднего числа темновых зарядов в различных ячейках ФПУ, характеризующее

геометрический шум; $\sigma_{\rm шп}$ – среднеквадратическое значение флуктуаций заряда при переносе (для $\Phi\Pi 3C$); $\sigma_{\rm шву}$ – среднеквадратическое значение шума выходного устройства, пересчитанное к числу зарядов.

В результате выполнения описанных выше процедур формируется **массив суммарных зарядов**, представляющий собой реализацию 2-х мерного пространственного нестационарного случайного поля

Среднеквадратическое значение шумового напряжения на выходе ФПУ при **детектировании зарядов** в выходном устройстве можно выразить через среднеквадратическое значение флуктуации суммарного числа шумовых зарядов

 $U_{\rm III} = k(u/q) \cdot \sigma_{\rm III} \cdot e, \qquad (3.50)$

где: *k*(*u*/*q*) – коэффициент преобразования заряда в выходное напряжение; *е* –заряд электрона. **Моделирование процесса квантования сигнала в АЦП**

Моделирование процесса квантования сигнала в блоке АЦП (и связанных с этим искажений) осуществляется с учетом заданной разрядности и необходимости согласования динамического диапазона входных уровней АЦП с реальным динамическим диапазоном изменения сигнала на выходе ФПУ. При этом принимается во внимание возможность «привязки» нижнего уровня динамического диапазона АЦП к уровню сигнала, соответствующего минимальному темновому заряду (см. раздел 1.5).

Максимальному сигналу U_{max} , поступающему на вход АЦП, должен соответствовать $2^n - 1$ уровень квантования, где n – разрядность АЦП. При этом произвольному сигналу U должен соответствовать k-тый уровень квантования:

$$k = INT \left[\frac{U \cdot (2^n - 1)}{U_{\text{max}}} \right], \tag{3.51}$$

где INT(Z) – целая часть числа Z.

Примечание.

Как уже было сказано выше (см. раздел 1), всякое преобразование сигналов с помощью АЦП связано с нелинейными искажениями и появлением погрешности квантования, которую можно считать распределенной по равномерному закону в пределах $\pm h/2$, где h – шаг квантования. Однако величина погрешности квантования при достаточной разрядности АЦП может быть значительно меньше других составляющих.

В результате вышеописанных процедур формируется двумерный массив в виде матрицы целых чисел $[E_{i,j}]$, который подвергается дальнейшей обработке в соответствии с исследуемыми алгоритмами.

Моделирование процедур дальнейшей обработки зависит от характера решаемых задач и может заключаться, например, в измерении размеров или текущих координат объектов, а также в определении ошибок путем сопоставления данных отдельных оценок с параметрами, задаваемыми моделью. Статистическая обработка результатов моделирования на основе анализа множества реализаций может включать в себя подсчет числа ложных выбросов, числа пропусков объектов, с целью определения вероятностных характеристик при моделировании процедур обнаружения; оценку среднеквадратических погрешностей измерения и др. [9, 11].

В приложении приводится несколько частных примеров моделирования работы отдельных звеньев ОЭС, которые могут быть использованы при оптимизации их параметров на ранних стадиях проектирования.

Вопросы для самопроверки.

1. Поясните алгоритм внутрикадровой селекции изображений объектов на основе использования медианной фильтрации.

2. В каких случаях алгоритмы селекции объектов на основе выделения межкадрового разностного сигнала являются более эффективными, чем алгоритмы внутрикадровой селекции?

3. Между какими параметрами наблюдаемого объекта и параметрами межкадрового разностного сигнала может существовать функциональная связь?

4. С какой целью может использоваться алгоритм накопления сигнала по площади области изменений в кадре, в чем он заключается?

5. Какими параметрами оценивается качество функционирования ABC, решающей задачи обнаружения или распознавания объектов в условиях помех?

6. Что такое характеристики обнаружения?

7. Какими параметрами оценивается качество функционирования ABC, решающей задачи измерения параметров объектов наблюдения в условиях помех?

8. Какими свойствами должны обладать геометрические признаки изображений, которые используются для автоматического распознавания объектов? Назовите наиболее распространённые из них в порядке возрастания сложности их выделения.

9. Что такое промежуточные и главные моменты инерции изображения объекта?

10. Как определяются геометрический и энергетический центры изображения объекта?

11. Поясните, в чём заключаются методы идентификации объектов, которые не требуют предварительного выделения геометрических признаков. Укажите достоинства и недостатки каждого из них. Укажите условия, соблюдение которых необходимо при использовании этих методов.

12. В чём заключаются преимущества методов идентификации и классификации объектов, основанных на выделении геометрических признаков?

13. В чём состоит принцип реализации многоступенчатого (иерархического) алгоритма распознавания объектов на основе использования геометрических признаков? Каким образом следует распределять используемые признаки на различных уровнях многоступенчатого алгоритма распознавания?

14. Какие алгоритмы обработки дискретных изображений, связанные с выделением геометрических признаков, могут быть использованы для решения задач оценки параметров объектов наблюдения: определения их размеров, пространственного положения или пространственной ориентации?

15. Поясните преимущества и недостатки математического (имитационного) компьютерного и физического моделирования, которые используются на стадии проектирования.

4 Примеры построения видеоинформационных систем

4.1 Оптико-электронные системы астроориентации и астронавигации

ОЭС астроориентации и астронавигации решают задачи определения пространственного положения объекта по астроориентирам. Такими объектами могут быть космические аппараты (КА), самолёты, морские объекты и др. В качестве астрооринтиров могут использоваться Солнце, Луна, а также планеты и звёзды. Особый интерес в качестве астроориентиров представляют звёзды, поскольку их положение на небесной сфере является наиболее стабильным.

В настоящее время всё большее внимание уделяется разработке так называемых автономных систем астроориентации и астронавигации.

Автономные астронавигационные системы (АНС) способны длительное время работать без связи с наземными пунктами. При этом основным условием работы автономных АНС является необходимость определения пространственного положения КА в произвольный момент времени по данным собственных измерений, независимо от того, сколько времени АНС была в выключенном (законсервированном) состоянии. То есть, ставится задача определения пространственной ориентации КА даже при отсутствии данных предшествующих измерений.

В такой постановке задача распадается на три этапа.

1. Обнаружение и селекция рабочих астроориентиров, т.е. выделение из числа астроориентиров, попавших в поле зрения АНС, тех, которые соответствуют выбранному диапазону звёздных величин.

2. Распознавание участка звёздного неба, попавшего в поле зрения АНС, по выбранным на первом этапе астроориентирам.

3. **Измерение** с высокой точностью (до единиц угловых секунд) угловых координат самой яркой звезды, попавшей в поле зрения АНС, из числа выделенных на первом этапе.

В качестве приёмника оптического излучения и, одновременно, анализатора изображения в АНС могут использоваться различные виды телевизионных преобразователей. Однако, наиболее современным и перспективным решением является применение матричных в качестве многоэлементных ФПУ ФПЗС и КМОП-структур.

Преимущества ФПЗС и КМОП перед другими видами телевизионных преобразователей очевидны: малые габариты и вес, малое энергопотребление, высокая надёжность, а также «жёсткий» растр, т.е. жёсткая геометрическая привязка фоточувствительных элементов к приборной системе координат. Кроме того указанные ФПУ (особенно ФПЗС) обладают достаточно высокой чувствительностью, позволяющей их уверенно использовать для работы со звёздами до 5-й – 7-й величин.

Архитектура АНС принципиально не отличается от архитектуры других оптико-электронных АВС. Однако, характер задач, решаемых АНС, обладает такой спецификой, что их целесообразно рассмотреть отдельно. К тому же задачи, решаемые АНС на различных этапах, являются хорошей иллюстрацией практического применения некоторых описанных выше алгоритмов.

4.1.1 Обнаружение и селекция рабочих астроориентиров

Цель этапа – выделение из общего числа объектов, случайным образом попавших в поле зрения АНС, только тех, которые относятся к заданному диапазону звёздных величин и предусмотрены в бортовом каталоге АНС. Практически это означает двухэтапную обработку исходного массива [*E_{i,j}*] в соответствии с алгоритмом.

1. Формирование нового массива $[E_{i,j}^*]$

 $[E^*_{i,j}] = [E_{i,j} \cdot \delta_{i,j}],$

(4.1)

где $[E_{i,j}^*]$ – новый массив; $\delta_{i,j} = \begin{cases} 1, E_{i,j} \ge E_{\min} \\ 0, E_{i,j} < E_{\min} \end{cases}$.

Такой алгоритм по существу является алгоритмом обнаружения астроориентиров в поле зрения АНС, сигналы которых превышают заданный порог. Следует однако заметить, что все значения сигналов $E_{i,j}$ исходного массива определяются за вычетом сигнала от фона и темновых токов накопления. Поскольку отдельные элементы ФПУ могут обладать некоторым отклонением чувствительности и отклонением уровня темнового тока накопления от соответствующих средних значений, то, с целью коррекции так называемого «геометрического» шума (см. раздел 1), необходимо хранение в памяти АНС параметров каждого из элементов фотоприёмника.

2. Определение наиболее освещенного элемента изображения $E_{k,l}^* = E_{max}^*$ и сравнение его сигнала с верхним порогом.

Эта операция необходима для того, чтобы исключить из обрабатываемого массива сигналы от планет и других, более мощных источников излучения, случайно попавших в поле зрения АНС. Очевидно, что попадание в поле зрения АНС прямого солнечного излучения должно исключаться специальной системой блокировки канала. В этом случае информация получается с других, параллельно работающих аналогичных каналов.

Если $E^*_{max} \leq E_{порог}$, то этап селекции завершён. Если $E^*_{max} > E_{порог}$, то массив подвергается дополнительной обработке в соответствии с алгоритмом

$$\begin{bmatrix} E^{**}_{i,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E^{*}_{i,j} \cdot \delta^{*}_{i,j} \end{bmatrix},$$
(4.2)
rge $\delta_{i,j} = \begin{cases} 0, (k-n \le i \le k+n) \& (i-n \le j \le l+n); \\ 1, (i>k+n) \lor (il+n) \lor (j
(4.2)$

4.1.2 Опознавание участка звёздного неба

Как было сказано выше, одним из классических методов опознавания является корреляционный метод (см. раздел 3.2). Однако, корреляционный метод, предполагающий вычисление взаимно-корреляционных сумм при использовании сигналов от всех элементов ФПУ и всех элементов массивов, хранящихся в бортовом каталоге для всех возможных фрагментов звёздного неба, является практически непригодным. Такая процедура потребовала бы слишком большого числа вычислительных операций и объемов памяти. К тому же корреляционный метод весьма чувствителен к взаимному развороту сравниваемых фрагментов.

Вместе с тем, можно отметить следующую особенность изображений, регистрируемых АНС.

Изображения являются сравнительно малоинформативными, т.е. в большом числе элементов полезный сигнал просто отсутствует. Информация же, содержащаяся в изображениях, может быть закодирована путём задания значений сигнала от каждого астроориентира и координат его изображения, выраженных, например, через номера строк и столбцов матрицы фоточувствительных элементов ФПУ. Это обстоятельство позволяет значительно сократить объём обрабатываемых и запоминаемых данных и предложить следующую иерархическую схему алгоритма опознавания, который реализуется на трёх уровнях.

1. Сравнение сигнала от самой яркой звезды в поле зрения с данными каталога, в котором хранятся значения сигналов самых ярких (опорных) звёзд, соответствующих выбранному диапазону.

Если выполняется условие

$$\left|\sum_{i=k-n}^{k+n}\sum_{j=l-n}^{l+n}E_{i,j}^{*}-A(J)\right| \le Z_{A1},$$
(4.3)

то осуществляется переход к следующему уровню. (Здесь Z_{A1} – некоторое пороговое значение модуля разности на первом уровне иерархического алгоритма опознавания; A(J) – значение сигнала J-той звезды из числа опорных звезд, взятых из каталога). В противном случае процедура повторяется для J+1-ой звезды из каталога.

2. После предварительной идентификации опорной звезды на первом этапе (хотя и с определённой вероятностью ошибки) АНС переходит ко второму этапу. Он заключается в анализе угловых расстояний между опорной J-той звездой и менее яркими К-тыми звёздами её окружения, предусмотренными бортовым каталогом (рис.4.1).

Оценка разности угловых координат астроориентиров в конечном счёте сводится к оценке расстояний между центрами их изображений в приборной системе координат в соответствии с алгоритмом

$$|R(J,K) - R_K(J,K)| \le Z_{R2},$$
(4.4)

где: $R(J,K) = \sqrt{[X(J,K)]^2 + [Y(J,K)]^2}$; $R_K(J,K)$ – константы возможных расстояний, которые берутся из каталога; X(J,K) и Y(J,K) – расстояния между опорной и окружающими звёздами, определяемые соответственно вдоль направления строк и столбцов матричной структуры фотоприёмника; Z_{R2} – некоторое пороговое значение модуля разности на втором уровне опознавания.



Рисунок 4.1 – К пояснению второго этапа алгоритма идентификации опорной звезды

Заметим, что расчет R(J,K) и проверка условия (4.4) должны выполняться для всех звёзд, находящихся в поле зрения АНС. При выполнении условия (4.4) для трёх или более звёзд в поле зрения АНС осуществляется переход к третьему (заключительному) уровню идентификации опорной звезды, в противном случае – возврат к первому уровню и повторение описанных процедур для других опорных звёзд каталога.

3. Третий (последний) этап идентификации заключается в вычислении взаимных расстояний между всеми звёздами, окружающими опорную звезду (рис. 4.2), и в сравнении этих расстояний с данными каталога.



Рисунок 4.2 – К пояснению третьего этапа алгоритма идентификации опорной звезды

$$\left| R(K,L) - R_{K}^{*}(K,L) \right| \le Z_{R3},$$
(4.5)

где: $R(K,L) = \sqrt{[X(K,L)]^2 + [Y(K,L)]^2}$,

 $R_{k}^{*}(K,L) = \sqrt{[X_{k}(J,K) - X_{k}(J,L)]^{2} + [Y_{k}(J,K) - Y_{k}(J,L)]^{2}}.$

Значения $X_k(J,K)$, $Y_k(J,K)$ и $X_k(J,L)$, $Y_k(J,L)$ берутся из каталога.

Процедура идентификации опорной звезды считается законченной, если хотя бы для 3-х звёзд в поле зрения АНС выполняется условие (4.5). Если это не так, то осуществляется возврат к первому уровню и повторение описанных процедур для других звёзд каталога.

При наличии нескольких независимых каналов вероятность пропуска или условная вероятность неопознавания определяется как вероятность пропуска более чем в *p* из *q* независимых каналах

$$P_{\text{проп.}} = \sum_{j=p}^{q} C_{q}^{j} [P_{\text{проп.1}}]^{j} \cdot [1 - P_{\text{проп.1}}]^{q-j}, \qquad (4.6)$$

где: *q* – число каналов; *p* – число совпадений результатов опознавания соответствующих участков звёздного неба, предопределяющее правило окончательного решения о завершении этапа опознавания; *P*_{проп.1}–вероятность пропуска в одном из каналов.

Вероятность пропуска в каждом канале зависит не только от уровня помех, но и от выбранных порогов сравнения Z_{A1} , Z_{R2} , Z_{R3} .

Так вероятность пропуска на первом этапе

$$P_{\text{проп.1(I)}} = \int_{Z_{A1}/\sigma_{uu}}^{\infty} p(x) dx, \qquad (4.7)$$

где: p(x) – плотность распределения вероятности ошибки при сравнении амплитуд. В частном случае, если ошибка подчиняется нормальному закону распределения, $P_{\text{проп.1(I)}}$ можно оценить следующим образом

$$P_{\text{проп.1(I)}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{Z_{A1}/\sigma_{uu}}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx , \qquad (4.8)$$

где $\sigma_{\rm m}$ – среднеквадратическое значение шумового напряжения в разностном сигнале.

Для следующих этапов распознавания можно записать аналогичные выражения

$$P_{\text{проп.1(II,III)}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{Z_{R(II,III)}/\sigma_{R(II,III)}}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx , \qquad (4.9)$$

где $Z_{R(II,III)}$ – величины порогов сравнения на втором и третьем этапах; $\sigma_{R(II,III)}$ – среднеквадратические значения ошибок при сравнении расстояний на втором и третьем этапах.

Вероятность непропуска, т.е. условная вероятность правильного опознавания в одном из каналов определяется выражением

 $P_{\text{Henpon.1}} = 1 - P_{\text{проп.1}} = [1 - P_{\text{проп.1(I)}}] \cdot [1 - P_{\text{проп.1(II)}}]^3 \cdot [1 - P_{\text{проп.1(III)}}]^3 (4.10)$ Можно показать, что вероятность ошибочного опознавания при трёхэтапного использовании описанного алгоритма может быть пренебрежимо малой. Однако, разумеется, количественное определение вероятностных характеристик обнаружения и выбор на их основе параметров алгоритма могут осуществляться оптимальных путём детального моделирования АНС на начальном этапе разработки.

Каталожное описание окружения любой из N ярких звёзд (например, звёзд величин $m \le 5$, выбираемых в качестве опорных) должно охватывать область звёздного неба, ограниченную радиусом, равным диагонали фоточувствительной площадки матричного ФПУ. Здесь имеется в виду фрагмент звёздного неба, спроецированный на плоскость анализа изображения при выбранном фокусном расстоянии (рис. 4.3).



Рисунок 4.3 – . К пояснению оценки объёма памяти бортового каталога АНС

При этом для гарантии попадания хотя бы 3-х звёзд в поле зрения АНС необходимо, учитывая случайный характер захвата и неравномерность распределения звёзд по небесной сфере, хранить в бортовом каталоге информацию хотя бы о 12-ти звёздах, окружающих каждую из опорных.

Следует иметь в виду, что при выборе астроориентиров и формировании бортового каталога приходится учитывать спектральный класс звёзд, спектральную чувствительность реального фотоприёмника и вероятность попадания необходимого числа опорных звёзд в поле зрения АНС.

4.1.3 Измерение угловых координат опорной звезды

После окончательной идентификации опорной звезды осуществляется измерение её угловых координат с максимально возможной точностью, предопределяющей точность решения задачи астроориентации в целом.

Очевидно, что угловые координаты ψ и χ бесконечно удалённого источника однозначно связаны с линейными координатами *x* и *y* его изображения на фоточувствительной площадке ФПУ выражениями:

 $x = f \cdot tg\psi \approx f \cdot \psi; \ y = f \cdot tg\chi = f \cdot \chi , \tag{4.11}$

где f – фокусное расстояние объектива.

Жёсткая геометрическая привязка каждого фоточувствительного элемента на кристалле ФПУ (ФПЗС, КМОП) в сочетании с линейной световой характеристикой позволяет регистрировать линейные смещения изображений звёзд с погрешностью, не превышающей десятых долей элемента. Один из простейших широко известных алгоритмов измерения координат малоразмерных изображений объектов заключается в вычислении энергетического центра (ф. 3.29).

Подобный алгоритм требует минимальных вычислительных затрат – несколько операций сложения и умножения (в зависимости от размеров изображения), а также одну операцию деления. Это позволяет его использовать в быстродействующих системах оптической пеленгации при небольшом уровне помех. Шумовая сравнительно составляющая среднеквадратической погрешности измерения координат изображения σ_x (или σ_v) обратно пропорциональна отношению сигнал/шум: $\sigma_x / \Delta x$ (или σ_v $/\Delta y) \simeq 1/\mu$, где Δx и Δy – пространственные периоды элементов вдоль направлений строк и столбцов; µ – отношение среднеквадратического значения напряжения шума к максимальному значению сигнала на выходе ФПУ (см. также приложение, рис. 1).

Однако, при использовании ФПУ, работающих в инфракрасном диапазоне ($\lambda > 3$ мкм), для которых характерен значительный уровень внутренних шумов, может быть предложен трёхступенчатый алгоритм, который заключается в следующем.

- 1. Осуществляется предварительная оценка координат в соответствии с выражением (3.29).
- 2. Полученные значения используются для определения весовых коэффициентов корректирующего квазиоптимального фильтра, в виде аналитической функции, подобной весовой функции используемой оптической системы (например, гаусоиды вращения).
- 3. Осуществляется повторная оценка координат в соответствии с алгоритмом, подобным выражению (1), но с учётом весовых коэффициентов, на которые умножаются соответствующие значения $Q_s(x_i)$ и $Q_s(y_i)$.

Как показывает анализ, подобный алгоритм позволяет приблизительно на 15 ÷ 20% снизить среднеквадратические погрешности измерения координат объекта при тех же значениях µ. Однако объем вычислительных затрат увеличивается приблизительно втрое.

Однако, при малых отношениях сигнал/шум ($\sigma_{\rm m}$ < 10) более эффективным является алгоритм интерполяции сигналов, снимаемых с отдельных элементов ФПУ по методу наименьшего среднеквадратического отклонения (НСКО). Как показывает анализ, при работе ФПУ в режиме малых сигналов от звёзд величин $m \ge 5$ этот метод позволяет достичь большей точности измерений.

На рисунке 4.4 показано распределение освещённости E(x) вдоль строки элементов ФПУ, которое преобразуется в последовательность электрических сигналов (видеоимпульсов) $Q(x_i)$, где i – номер ячейки, с которой снимается сигнал.

Измерение координат изображения (которые в данном случае мы связываем с координатами максимума интерполирующей функции) сводится к восстановлению непрерывной функции $Q(x) \approx E(x)$ по методу НСКО, вычислению её производной dQ(x)/dx и определению координаты х из условия

(4.12)

dQ(x)/dx = 0.





Восстановление непрерывной функции Q(x) может осуществляться путём её аппроксимации полиномом четвёртой степени. по методу НСКО $Q(x) = K_4 \cdot x^4 + K_3 \cdot x^3 + K_2 \cdot x^2 + K_2 x^2 + K_1 \cdot x + K_0.$ (4.13) Известно, что в общем случае для нахождения коэффициентов полинома Q(x) необходимо решить систему линейных уравнений вида

$$K_{0}\sum_{i=1}^{N}x_{i} + K_{1}\sum_{i=1}^{N}x_{i}^{2} + K_{2}\sum_{i=1}^{N}x_{i}^{3} + K_{3}\sum_{i=1}^{N}x_{i}^{4} + K_{4}\sum_{i=1}^{N}x_{i}^{5} = \sum_{i=1}^{N}Q(x_{i})\cdot x_{i}$$

$$K_{0}\sum_{i=1}^{N}x_{i}^{2} + K_{1}\sum_{i=1}^{N}x_{i}^{3} + K_{2}\sum_{i=1}^{N}x_{i}^{4} + K_{3}\sum_{i=1}^{N}x_{i}^{5} + K_{4}\sum_{i=1}^{N}x_{i}^{6} = \sum_{i=1}^{N}Q(x_{i})\cdot x_{i}^{2}$$

$$K_{0}\sum_{i=1}^{N}x_{i}^{3} + K_{1}\sum_{i=1}^{N}x_{i}^{4} + K_{2}\sum_{i=1}^{N}x_{i}^{5} + K_{3}\sum_{i=1}^{N}x_{i}^{6} + K_{4}\sum_{i=1}^{N}x_{i}^{7} = \sum_{i=1}^{N}Q(x_{i})\cdot x_{i}^{3}$$

$$K_{0}\sum_{i=1}^{N}x_{i}^{4} + K_{1}\sum_{i=1}^{N}x_{i}^{5} + K_{2}\sum_{i=1}^{N}x_{i}^{6} + K_{3}\sum_{i=1}^{N}x_{i}^{7} + K_{4}\sum_{i=1}^{N}x_{i}^{8} = \sum_{i=1}^{N}Q(x_{i})\cdot x_{i}^{4}$$

$$(4.14)$$

где: N – количество отсчётов, по которым определяются коэффициенты K_4 , K_3 , K_2 , K_1 , K_0 полинома Q(x); x_i – координата геометрического центра данного *i*-го элемента по горизонтали или вертикали, отсчитываемая от начала приборной системы координат, например, от первого нижнего элемента светочувствительной области ФПУ; $Q(x_i)$ – выраженная в численной форме величина электрического сигнала, соответствующего значению средней облучённости *i*-той ячейки ФПУ.

В представленном виде (4.14) составление и решения системы уравнений связано с выполнением большого числа математических операций. Вместе с тем при реализации алгоритма, работающего в реальном масштабе времени, часто возникает вопрос оценки и оптимизации вычислительных затрат, с целью достижения предельного быстродействия измерительной системы.

Существенное уменьшение числа вычислительных операций может быть достигнуто за счёт того, что решение системы линейных уравнений можно производить сначала в собственной нормированной системе координат, привязанной к элементу наибольшего сигнала. При этом элементов ФПУ, которых координаты С снимаются сигналы, отсчитываются от координаты *x_m* наиболее освещённого элемента матрицы путём записи целого числа пространственных периодов элементов ФПУ, разделяющих данный элемент и элемент с координатой x_m (см рис 4.5). Кроме того, распределение освещённости от точечного источника сосредоточено лишь на небольшом участке матрицы в окрестностях наиболее освещённого элемента, поэтому число отсчётов, по которым строится полином Q(x), можно ограничить небольшим числом, например, десятью (N = 10). Тогда при формировании исходных данных в нормированной системе координат координаты освещенных элементов запишутся в виде

$$x_{m-4} = 1; x_{m-3} = 2; x_{m-2} = 3 x_{m-1} = 4; x_m = 5;$$

$$x_{m+1} = 6; x_{m+2} = 7; x_{m+3} = 8; x_{m+4} = 9; x_{m+5} = 10.$$
 (4.15)

По найденной оценке *X* положения максимума освещённости в нормированной системе координат легко найти оценку координаты центра изображения точечного источника в приборной системе координат по формуле $x = x_m + (\underline{X} - 5) \cdot \Delta x,$ где Δx – шаг элементов ФПУ.



Рисунок 4.5 – . К пояснению алгоритма интерполяции видеоимпульсов по методу НСКО. *Q*(*x*) – аппроксимирующий полином 4-й степени

В нормированной системе координат (4.15) система уравнений (4.14) перепишется в вид

$$K_{0}\sum_{i=1}^{10}i + K_{1}\sum_{i=1}^{10}i^{2} + K_{2}\sum_{i=1}^{10}i^{3} + K_{3}\sum_{i=1}^{10}i^{4} + K_{4}\sum_{i=1}^{10}i^{5} = \sum_{i=1}^{10}Q(i)\cdot i$$

$$K_{0}\sum_{i=1}^{10}i^{2} + K_{1}\sum_{i=1}^{10}i^{3} + K_{2}\sum_{i=1}^{10}i^{4} + K_{3}\sum_{i=1}^{10}i^{5} + K_{4}\sum_{i=1}^{10}i^{6} = \sum_{i=1}^{10}Q(i)\cdot i^{2}$$

$$K_{0}\sum_{i=1}^{10}i^{3} + K_{1}\sum_{i=1}^{10}i^{4} + K_{2}\sum_{i=1}^{10}i^{5} + K_{3}\sum_{i=1}^{10}i^{6} + K_{4}\sum_{i=1}^{10}i^{7} = \sum_{i=1}^{10}Q(i)\cdot i^{3}$$

$$K_{0}\sum_{i=1}^{10}i^{4} + K_{1}\sum_{i=1}^{10}i^{5} + K_{2}\sum_{i=1}^{10}i^{6} + K_{3}\sum_{i=1}^{10}i^{7} + K_{4}\sum_{i=1}^{10}i^{8} = \sum_{i=1}^{10}Q(i)\cdot i^{4}$$

$$(4.14)$$

В отличие от системы уравнений (4.14) система (4.17) имеет вполне детерминированную левую часть. Поэтому большая часть вычислений может быть выполнена заранее на этапе разработки алгоритма, и решение координат системы процессе измерения сведётся К простой В последовательности арифметических операций. Отметим, что на этапе разработки алгоритма величины i^2 , i^3 , i^4 также могут быть вычислены заранее и могут храниться как константы. Таким образом, для составления системы (4.17) на этапе измерения потребуется 45 операций сложения и 40 операций умножения, причём все операции над целочисленными переменными.

Для нахождения коэффициентов полинома удобно использовать алгоритм Гауса по следующей схеме.

1. Все уравнения системы (4.17) делятся на соответствующие множители при *K*₀.

(4.16)

- 2. Формируется новая система из четырёх уравнений путём вычитания из второго уравнения первого, из третьего второго, из четвёртого третьего и из пятого четвёртого.
- 3. Каждое из уравнений новой системы делится на соответствующие, полученные на предыдущем шаге, множители при *K*₁.
- 4. Вычитая из второго уравнения первое, из третьего второе, из четвёртого третье, получают третью систему из трёх уравнений.
- 5. Аналогичным образом получают четвёртую систему из двух уравнений и, наконец, одно уравнение с одним неизвестным коэффициентом *K*₄, который определяется путём деления правой части уравнения на множитель при *K*₄.
- 6. На последующих трёх этапах рассчитываются коэффициенты K_3 , K_2 , K_1 в результате последовательной подстановки известных коэффициентов в последние уравнения четвёртой, третьей и второй систем.

Заметим, что значение коэффициента K_0 не имеет практического значения, поскольку максимум интерполирующего полинома будет находиться путём приравнивания его производной к нулю

$$Q'(x) = 4K_4x^3 + 3K_3x^2 + 2K_2x + K_1 = 0.$$
(4.18)

Для реализации описанной процедуры решения системы уравнений достаточно 16 операций типа сложения-вычитания и 24 операции типа умножения-деления.

Следующий этап – нахождение максимума интерполирующей функции Q(x) в соответствии с (б). Однако поскольку интервал, в котором следует искать значение корня, заранее определён ($4 \le X \le 5$), то удобно воспользоваться вычислительной схемой Ньютона, которая обеспечивает быструю сходимость вычислительного процесса. Применительно к рассматриваемому случаю, она выразится в виде рекуррентного алгоритма

 $X = X - (b_3 X^3 + b_2 X^2 + b_1 X + b_0) / (a_2 X^2 + a_1 X + a_0),$ (4.19) где: $b_3 = 4K_4$; $b_2 = 3K_3$; $b_1 = 2K_2$; $b_0 = K_1$; $a_2 = 3b_3$; $a_1 = 2b_2$; $a_0 = b_1$.

Процесс вычислений целесообразно производить по схеме Гарнера

$$X = X - (X \cdot (X \cdot (b_3 + b_2) + b_1) + b_0) / (X \cdot (X \cdot a_2 + a_1) + a_0).$$
(4.20)

Таким образом, каждый шаг, выполняемый по схеме Ньютона, потребует выполнения 6 операций сложения-вычитания и 6 операций умножения-деления. Кроме того, расчёт коэффициентов b_3 , b_2 , b_1 , a_2 , a_1 на предварительном этапе связан с выполнением дополнительно 5-ти операций умножения. Анализ сходимости решения уравнения (4.20) показал, что для достижения точности определения значения корня не хуже 10^{-6} достаточно 5 раз воспользоваться схемой Ньютона.

Итак, для формирования системы уравнений (4.17), её решения и нахождения максимума аппроксимирующего полинома необходимо выполнить 91 операцию типа сложения-вычитания, причём 45 из них над целочисленными переменными и 99 операций типа умножение-деление, причём 48 из них над целочисленными переменными. Очевидно, что такое количество операций достаточно быстро (за доли секунды) может быть выполнено на базе современных микропроцессорных систем даже сравнительно невысокого быстродействия. Поэтому данный алгоритм может быть использован в автоматизированных системах наблюдения, работающих в реальном масштабе времени.

Очевидно, что измерение координаты вдоль оси Y может быть выполнено совершенно аналогичным образом при обработке сигналов с десяти элементов вдоль столбца матрицы ФПУ в окрестностях наиболее освещённого элемента с координатами x_m , y_m .

Как показал анализ, рассмотренному методу вычисления координат максимума освещённости в изображении точечного объекта кроме шумовой может быть присуща методическая составляющая погрешности измерения.

На рисунке 4.6 показаны зависимости методической составляющей погрешности δ от положения максимума освещенности в пределах элемента при различных значениях эффективного диаметра изображения *d*, определяемого на уровне 0,606×*E*_{max}.



Рисунок 4.6 – Зависимости методической составляющей погрешности δ(*x*) от положения максимума освещенности в пределах элемента при различных значениях эффективного диаметра изображения d (координаты элементов даны в системе координат 4.15, Δx – шаг элементов ФПУ)

Из приведённых зависимостей видно, что при эффективном диаметре изображения $d \approx 6,67\Delta x$ методическая составляющая погрешности может

отсутствовать. При других значениях *d* зависимость методической составляющей погрешности от положения максимума освещенности в пределах элемента носит линейный характер. Таким образом, величина методической составляющей погрешности может быть уменьшена до величины второго порядка малости путём несложной коррекции

$$x_{\mu \text{CHD.}} = x + \delta(x), \tag{4.21}$$

где *х*_{испр.}— исправленная после коррекции методической составляющей погрешности оценка координата изображения точечного источника.

На рисунке 4.7 представлены полученные в процессе моделирования зависимости случайной составляющей погрешности измерения σ от отношения сигнал/шум μ для последнего алгоритма интерполяции (сплошная линия). Там же для сравнения пунктирной линией приведена аналогичная зависимость, характерная для простейшего алгоритма вычисления координат энергетического центра изображения точечного источника (см. ф. 3.29)



Рисунок 4.7 – Зависимость случайной составляющей погрешности измерения σ от отношения сигнал/шум μ. Пунктиром показана аналогичная зависимость ичная зависимость

Анализ показывает, что в случае использования последнего из рассмотренных алгоритмов наибольший относительный выигрыш в точности измерения координат достигается при малых отношения сигнал/шум. Так, например, при $\mu = 10$ последний рассмотренный алгоритм позволяет измерять координату изображения точечного объекта с погрешностью в 1,5 раза меньшей, чем при использовании более простого

алгоритма вычисления координат энергетического центра изображения точечного объекта (3.29). На рисунке 4.8 приведена блок-схема подробно поясняющая описанный алгоритм.



Рисунок 4.8 – Блок-схема алгоритма интерполяции

В заключение заметим, что рассмотренный алгоритм может найти применение не только в системах астроориентации, но и во многих других оптико-электронных системах, в которых решается задача измерения координат малоразмерных объектов в сложных условиях наблюдения

4.2 Принципы построения обучаемых АВС

В обучаемых ABC окончательная зависимость выходных сигналов (выходных управляющих воздействий) от регистрируемых входных оптических сигналов закладывается не в процессе разработки и изготовления системы, а на этапе настройки и адаптации готового прибора или системы к реальным условиям функционирования. Этот процесс настройки и адаптации в общем случае будем называть периодом или этапом обучения.

Обучаемыми могут быть самые различные по назначению ABC: всевозможные автоматизированные измерительные приборы, системы технического зрения, астронавигационные системы, тепловизионные обзорно-поисковые системы и т.д. То есть, с точки зрения функционального назначения и характера используемых сигналов, – это не какой-то новый класс систем. Отличие обучаемых ABC заключается в способе формирования окончательного решающего правила, предопределяющего зависимость выходных сигналов от входных. Такая зависимость, в общем случае, может быть нелинейной.

Принцип построения обучаемых АВС проиллюстрируем на двух конкретных примерах.

4.2.1 Применение алгоритма обучения в оптико-электронном угломере

Оптико-электронные угломеры – приборы, предназначенные для контроля пространственной ориентации контролируемого объекта относительно системы координат, задаваемой другим (базовым) объектом. Один из вариантов оптической схемы угломера показан на рисунке 4.9.

Угломер состоит из двух основных частей: оптико-электронного датчика (ОЭД), определяющего базовую систему координатных осей *X*,*Y*,*Z* и контрольного элемента, размещаемого на контролируемом объекте.

Основными элементами ОЭД являются: светодиод (1), диафрагма (2), светоделитель (3), объектив (4), позиционно-чувствительный фотоприёмник, например, ФПЗС или КМОП-матрица (5), а также элементы электронного тракта предварительной обработки сигнала (на рисунке не показаны).

Контрольным элементом (6) может служить плоское зеркало или более сложный по структуре пассивный отражатель, жестко связанный с контролируемым объектом.



Рисунок 4.9 – Оптическая схема угломера

Диафрагма, представляющая собой пластину с небольшим отверстием в несколько десятков или сотен микрон, располагается в фокальной плоскости объектива, поэтому ОЭД формирует пучок лучей слабой расходимости. На площадке ФПУ, также расположенной в фокальной плоскости, строится изображение диафрагмы. Координаты изображения зависят только от углов разворота ψ и χ контролируемого объекта относительно коллимационных осей X и Y и не зависят от его линейных смещений вдоль любой из координатных осей.

Таким образом, задача измерения угловых разворотов контролируемого объекта сводится к задаче измерения линейных координат центра изображения диафрагмы на фоточувствительной площадке ФПУ.

Один из возможных алгоритмов обработки сигнала от малоразмерного (точечного) источника заключается в вычислении координат его энергетического центра (ф. 2.32). Другой алгоритм, заключающийся в интерполяции сигнала с отдельных элементов матричного фотоприёмника, с последующим определением координат максимума интерполирующей функции, подробно описан в разделе 4.1.

При реализации высокоточных (с погрешностью, не превышающей единиц угловых секунд) и широкодиапазонных (до единиц и десятков градусов) угломеров приходится учитывать множество факторов, влияющих на характер статической характеристики ОЭД. К их числу неравномерность чувствительности неравномерное И относятся: распределение плотности темновых токов по кристаллу ФПУ, влияние искажений сигнала, возникающих вследствие неэффективности переноса зарядов (при использовании ФПЗС в качестве ФПУ); неперпендикулярность падения лучей на плоскую фоточувствительную площадку на краях измерительного диапазона; влияние аберраций оптической системы. Совокупность всех этих факторов приводит к появлению значительной систематической составляющей погрешности помимо случайной шумовой составляющей погрешности измерения.

Ha практике возможны различные способы коррекции систематической погрешности, реализуемые на этапе цифровой обработки Например, аппроксимации заранее определённой путём сигнала. аналитической характеристики какой-либо функцией, статической возможна последующая коррекция результатов каждого измерения за счет вычисления соответствующей поправки. Однако, это приводит к увеличению времени на каждое измерение, и, поэтому такой путь не всегда является оптимальным решением. Кроме того, при замене каких-либо элементов оптической схемы (объектива, контрольного элемента, ФПУ) или при изменении условий работы (например дистанции) возникает необходимость существенной коррекции алгоритма, а, следовательно, программного обеспечения измерительной системы.

Остановимся здесь на возможности использования алгоритма обучения, позволяющего добиться предельного быстродействия измерительной системы в рабочем режиме при достаточной гибкости её адаптации на предварительном этапе калибровки в случае изменения условий работы ОЭД.

На рисунке 4.10 показан оптико-электронный угломер, содержащий ОЭД, а также контрольный элемент, расположенный на контрольно-измерительном стенде, используемом на этапе обучения, т.е. на этапе калибровки измерительной системы. Задание точного разворота контрольного элемента, например, вокруг оси *X*, осуществляется оператором с помощью микрометрического винта.



Рисунок 4.10 – Оптико-электронный датчик (ОЭД) и контрольный элемент (КЭ) на контрольно-измерительном стенде

На рисунке 4.11 в качестве примера приведена статическая характеристика канала измерения угла χ . По оси абсцисс отложены истинные значения измеряемого угла χ , а по оси ординат – усреднённые значения измеряемого угла χ . Пунктиром показана идеальная статическая характеристика оптико-электронного угломера. Пунктиром показана идеальная статическая характеристика оптико-электронного угломера



Рисунок 4.11 – Статическая характеристика канала измерения угла х

Структурная схема рассматриваемой измерительной системы приведена на рисунке 4.12.



Рисунок 4.12 – Структурная схема рассматриваемой измерительной системы

На этапе обучения-калибровки с помощью микрометрического винта последовательно задаётся определённое число значений угла разворота контрольного элемента χ_m , χ_n , ..., χ_q . При этом погрешность установки контрольного элемента должна быть значительно меньше величины систематической погрешности измерения. Для контроля точности установки углов можно воспользоваться теодолитом и вспомогательным зеркалом, закреплённым на координатном столике.

На этапе калибровки переключатели, показанные на рис. 4.12, должны быть переведены в верхнее положение. При задании оператором определённого значения χ_i на выходе ОЭД появляется двоичный параллельный код соответствующей оценки χ_i , который посредством устройства ввода/вывода (УВВ) ЦВУ заносится в его собственную оперативную память. Для уменьшения на этапе калибровки влияния случайной составляющей погрешности измерения, при каждом положении контрольного элемента в ЦВУ обеспечивается ввод не однократного значения оценки измеряемого угла χ_i , а целый массив значений оценок, состоящий из 100 или более реализаций. Этот массив в дальнейшем обрабатывается ЦВУ с целью вычисления усреднённой оценки χ_i . Значение усредненной оценки используется в дальнейшем как адрес той ячейки памяти внешнего оперативного запоминающего устройства (ОЗУ), в которую должно быть записано истинное значение, установленное оператором. Это же значение оператор набирает на пульте управления обучением, и значение χ_i записывается во внешнее ОЗУ по адресу $\overline{\chi_i}$.

Аналогичным образом формируются адреса $\chi_m^-, \chi_n^-, \dots, \chi_q^-$ и данные $\chi_m, \chi_n, \dots, \chi_q$, записываемые в другие ячейки ОЗУ (рис. 4.13).



Рисунок 4.13 – Формирование массива данных во внешнем ОЗУ на этапе обучения (калибровки)

На следующем этапе, в соответствии с предусмотренной программой, ЦВУ осуществляет интерполяцию значений углов в промежуточных точках статической характеристики, согласно ниже приведённому алгоритму $\chi_0 = \chi_0 -$ калибровка

$$\chi_1 = \chi_0 + \Delta \chi_0 \chi_2 = \chi_1 + \Delta \chi_0$$

$$\Delta \chi_0 = \frac{\chi_m - \chi_0}{N_0} = \frac{\chi_m - \chi_0}{\overline{\chi}_m - \overline{\chi}_0}$$

 $\chi_m = \chi_m - \kappa$ алибровка)

$$\begin{array}{c}
\chi_{m+1} = \chi_m + \Delta \chi_m \\
\chi_{m+2} = \chi_{m+1} + \Delta \chi_m
\end{array}$$

$$\left\{ \Delta \chi_0 = \frac{\chi_n - \chi_m}{N_m} = \frac{\chi_n - \chi_m}{\overline{\chi_n} - \overline{\chi_m}} \right. \tag{4.22}$$

 $\chi_n = \chi_n -$ калибровка

двоичного кода ОЭД

Все рассчитанные значения $\chi_1, \chi_2, \ldots, \chi_{m+1}$ и др. записываются в промежуточные, пока ещё свободные ячейки внешнего ОЗУ (рис. 4.13).

Таким образом, нелинейная статическая характеристика (рис. 4.11) аппроксимируется кусочно-линейной функцией с различной крутизной наклона на различных участках. Эта функция в виде таблицы-массива хранится во внешнем ОЗУ измерительной системы.

Число калибруемых точек определяется степенью нелинейности исходной статической характеристики ОЭД и требуемой точностью коррекции систематической погрешности. Объём памяти ОЗУ зависит от числа возможных отсчётов в пределах измерительного диапазона

 $M = n \cdot N$ (4.23) где: $N = \chi_{max} / \Delta \chi$; χ_{max} – максимальное значение измеряемого угла; $\Delta \chi$ – шаг дискретизации отсчётов, определяемый выбранной разрядностью n

 $n = \log_2 N \tag{4.24}$

После завершения цикла обучения-калибровки ключи переводятся в нижнее положение, и система подготавливается к режиму измерения. Теперь двоичный код каждой однократной оценки χ_i^* , формируемый ОЭД, поступает непосредственно на вход дешифратора адреса внешнего ОЗУ, и из соответствующей ячейки памяти сразу считывается скорректированное значение усреднённой оценки, заранее вычисленное на этапе калибровки. Очевидно, что таким образом удаётся скорректировать систематическую составляющую погрешности измерения, которая может быть весьма значительной. В то же время случайная составляющая погрешности, обусловленная действием шумов, не корректируется.

Рассмотренный принцип построения измерительной системы обеспечивает достаточную гибкость корректировки её статической

характеристики и предельное быстродействие системы в рабочем режиме измерения.

4.2.2 Принцип построения обучаемой телевизионной системы для автоматизации контроля заготовок микросхем

Одним из наиболее сложных для автоматизации звеньев в цепи технологического процесса производства микросхем является участок промежуточного контроля внешнего вида заготовок. Во многих случаях именно эта операция предопределяет производительность всей Большинство «жёстких» технологической линии. алгоритмов, предлагаемых ДЛЯ оптико-электронных методов автоматизации визуального контроля, к сожалению, оказываются малопригодными для условий реального производства. Их можно условно разделить на две группы.

1. Относительно простые алгоритмы, основанные на сравнении контролируемых изделий с эталоном, обладающие достаточным быстродействием, но малой устойчивостью к воздействию дестабилизирующих факторов в условиях производства.

2. Значительно более сложные алгоритмы распознавания образов, учитывающие особенности контролируемых изделий и многообразие возможных дефектов. Они обладают недостаточным быстродействием и требуют значительных затрат на перепрограммирование даже при незначительных изменениях в объектах контроля.

Ниже рассматривается один из вариантов построения быстродействующей системы контроля на основе обучаемого автомата, в которой простота решающего правила сочетается с устойчивостью и гибкостью системы при изменении вида контролируемых изделий.

Система контроля (рис. 4.14) может решать задачи обнаружения и определения вида дефектов металлизации плоских заготовок микросхем.



Рисунок 4.14 – Структурная схема автоматизированного контроля заготовок микросхем

В основу работы системы также положен известный принцип сравнения с эталоном. Однако, режиму автономного функционирования должен предшествовать период обучения системы при временном участии оператора.

Цикл обучения заключается в следующем.

Вначале системе предъявляется, в качестве эталона, годное изделие из контролируемой партии, которое удовлетворяет требованиям качества (рис. 4.15а). Изображение эталона посредством оптической системы (ОС) и телевизионного датчика (ТВД) преобразуется сначала в аналоговый видеосигнал, а затем, с помощью формирователя бинарного сигнала (ФБС), в эталонный бинарный сигнал, фиксируемый в специальном блоке памяти (БП ЭБС). При этом ключ К1 должен быть переведён в нижнее положение.



Рисунок 4.15 – К пояснению принципа работы системы заготовок микросхем

Затем с пульта управления обучением система переводится в режим сравнения (ключ К1 переводится в верхнее положение) и осуществляется предъявление системе других изделий из контролируемой партии. Оператор оценивает качество каждого изделия и нажимает кнопку на

пульте обучения при отсутствии брака. При этом в блоке сравнения с эталоном (БСЭ) формируется сигнал разности между предъявляемым изделием и эталоном (рис. 4.15б), который затем фиксируется в блоке памяти сигнала допустимых отклонений (БП СДО). Далее цикл повторяется несколько десятков раз. Сигнал разности накапливается в БП СДО, формируя своеобразное «поле допусков» на данный вид изделий (рис. 4.15в).

После накопления в БП СДО достаточной информации о границах поля допусков система контроля переводится в основной режим автономного функционирования (ключ К2 переводится в верхнее положение). В этом режиме первоначально происходит сравнение предъявляемого объекта с эталоном. Результирующий разностный сигнал сравнивается с полем допусков, сформированным в процессе обучения при участии оператора. Если в процессе сравнения разностный сигнал лежит в пределах поля допусков, то изделие признаётся годным. В противном случае формируется сигнал «брак». По виду разностного сигнала, не соответствующего области допустимых отклонений, можно судить о характере дефекта и контролировать работу технологической линии (рис. 4.15г, д, е).

Разумеется, некоторые из функциональных узлов рассматриваемой системы могут быть выполнены не только в виде аппаратных модулей, но и на программном уровне. Принцип работы системы дополнительно поясняют блок-схемы алгоритмов, реализуемых на этапе обучения (рис. 4.16) и на этапе автоматического контроля (рис. 4.17).

Следует отметить, что в случае замены объекта контроля система может быть переориентирована путём проведения повторного этапа обучения. При этом надёжность функционирования системы практически не зависит от сложности изображения контролируемого объекта, если только не возникнут ограничения, связанные с недостаточной разрешающей способностью телевизионного датчика.

Очевидно, что при необходимости контроля значительных площадей заготовок с высокой разрешающей способностью можно использовать не один, а несколько параллельно работающих каналов наблюдения (на нескольких телевизионных датчиках). Причем зоны наблюдения, охватываемые каждым из каналов, должны немного перекрываться (рис.4.18).



Рисунок 4.16 – Блок-схемы алгоритма, реализуемого на этапе обучения



Рисунок 4.17 – Блок-схемы алгоритма на этапе автоматического контроля



Рисунок 4.18 – Общий вид двухканальной АВС контроля заготовок микросхем

Вопросы для самопроверки:

1. В чём состоит специфика автономных систем астроориентации, предопределяющая основные этапы обработки изображений в таких системах?

2. Какие объекты (звезды, планеты, Солнце, Луна или др.) наиболее эффективны при использовании в автономных системах астроориентации с точки зрения обеспечения стабильности метрологических параметров?

3. Чем вызвана необходимость использования многоканального принципа построения автономных систем астроориентации?

4. Назовите основные этапы решения задачи определения пространственной ориентации КА по данным бортовых измерений.

5. Поясните этап обнаружения и селекции рабочих астроориентиров.

6. Поясните этапы решения задачи опознавания участка звёздного неба, случайно попадающего в поле зрения автономной системы астроориентации.

7. Как оценивается объём памяти бортового каталога, необходимый для нормальной работы АНС?

8. В чём заключается алгоритм интерполяции видеосигнала, используемый на этапе измерения угловых координат выбранного астроориентира?

9. Каковы предпосылки, связанные с спецификой систем астроориентации, для сокращения вычислительных затрат при реализации данного алгоритма?

10. Поясните общие принципы построения обучаемых АВС.

11. В чём заключается процедура обучения, на этапе калибровки оптико-электронного угломера?

12. Поясните принцип работы обучаемого автомата для контроля заготовок микросхем на этапе обучения и на этапе автономного функционирования.

Заключение

В настоящем учебном пособии основное внимание уделено наиболее общим вопросам, связанным с проектированием автоматизированных видеоинформационных систем. Проведённый анализ возможных вариантов аппаратной структуры, используемой элементной базы и наиболее характерных алгоритмов цифровой обработки изображений, а также примеры реализации некоторых видов автоматизированных видеоинформационных систем имеют, главным образом, практическую направленность. Более подробное изложение теоретических вопросов, касающихся методов описания и преобразования сигналов дискретных изображений, можно найти в других источниках (см. например, [6]).

Практические навыки по применению методов моделирования ABC, с целью определения обоснованных требований к отдельным звеньям, а также с целью выявления оптимальных параметров решающих правил, могут быть получены в процессе выполнения специального комплекса лабораторных работ, посвященных этим вопросам [12].

Литература

1. Ярышев С.Н. Электронные компоненты, выбор элементной базы и поиск информации по сети Internet. Учебно-методическое пособие для курсового и дипломного проектирования. – СПб, 1998. – 44 с.

2. Стешенко В.Б. ПЛИС фирмы ALTERA: проектирование устройств обработки сигналов. – М.: ДОДЕКА, 2000, - 128 с.

3. Антонов А.П. Язык описания цифровых устройств AlteraHDL. Практический курс. – М.: ИП РадиоСофт, 2001. – 224 с.

4. Кухарев Г.А. и др. Систолические процессоры для обработки сигналов/Г.А. Кухарев, А.Ю. Тропченко, В.П. Шмерко. – Мн.: Беларусь, 1988.–127 с.

5. Лукин С.Б. Конспект лекций по курсу ОЭС. – СПб, СПбГУИТМО, 2004.– 161 с.

6. Системы технического зрения (принципиальные основы, аппаратное и математическое обеспечение)/А.Н. Писаревский, А.Ф. Чернявский, Г.К. Афанасьев и др.; Под общ. ред. А.Н. Писаревского, А.Ф. Чернявского. – Л.: Машиностроение, 1088.– 424 с.

7. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: в 2 кн. М.: Мир, 1982.– 790 с.

8. Быстрые алгоритмы цифровой обработки изображений/Т.С. Хуанг, Дж.-О. Эклунд, Г.Дж. Нуссбаумер и др.; Под ред. Т.С. Хуанга: Пер. с англ.– М.: Радио и связь, 1984. –224с., ил.

9. Бегунков А.Ф., Парфенов В.Г. Обработка результатов наблюдений при выполнении лабораторных работ физического практикума. Учебное пособие. Л.: ЛИТМО, 1980.

10. Андреев А.Л., Коняхин И.А. Методические указания к выполнению УИРС. – Л.: ЛИТМО, 1986.

11. Андреев А.Л., Мусяков В.Л., Стрелков А.Р., Ярышев С.Н. Источники и приемники излучения / Методические указания к лабораторным работам.– СПб: ИТМО, 1998. – 52 с.

12. Андреев А.Л., Ярышев С.Н. Методы моделирования ОЭС с многоэлементными анализаторами изображения. Методические указания к лабораторным работам. – СПб: СПбГУИТМО, 2006. – 52 с.

13. А.Л. Андреев. Сравнение алгоритмов интерполяции сигнала при измерении координат объектов с помощью многоэлементного фотоприёмника. – Сборник трудов VII Международной конференция «Прикладная оптика-2006». Том 3. Компьютерные технологии в оптике СПб, 2006.

Приложение

Примеры моделирования алгоритма оценки координат энергетического центра изображений точечных объектов в ABC

На рисунке 1 приведена полученная в результате компьютерного моделирования зависимость, позволяюшая определять величину отношения сигнал шум µ, при котором случайная «шумовая» составляющая погрешности измерения координат энергетического центра изображения точечного объекта не превышает заданной допустимой величины. Приведённые на рис. 1 зависимости показывают также, что при больших отношениях сигнал/шум на погрешность измерения в значительно большей степени оказывают влияние другие факторы, например «шумы квантования» видеосигнала В ΑЦΠ или «ШУМЫ дискретизации» изображения вследствие конечности размеров фоточувствительных элементов телевизионного анализатора изображения.

Как видно из зависимостей, приведённых на рисунке 2, оптимальный размер радиуса кружка рассеяния при аппроксимации весовой функции объектива гауссоидой вращения ф. (2) находится в пределах $R = (0,5 - 0,7) \times d$. Резкое увеличение погрешности при малых значениях R обусловлено появлением зон координатной нечувствительности системы, когда размеры изображения меньше размеров фоточувствительных элементов. Очевидно, что в случае наблюдения за точечным объектом размеры и вид изображения на фоточувствительной поверхности определяются исключительно весовой функцией оптической системы.

Зависимости, приведённые на рисунке 3, позволяют выбрать разрядность аналого-цифрового преобразователя, при которой влияние «шумов квантования» становится пренебрежимо малым по сравнению с влиянием других источников помех.

Заметим, что в случае наблюдения за объектами в условиях сильно меняющейся в поле зрения фоновой составляющей, которую необходимо сохранить в цифровом изображении для последующей обработки, разрядность АЦП должна быть увеличена в соответствии с выражением

 $N_{S+F} = N + [log_2\{(S_{max} + F_{max})/S_{max}\}]$, где: N_{S+F} – число разрядов АЦП, определяемое с учётом необходимости сохранения в цифровом изображении фоновой составляющей; N – число достаточное для кодирования сигнальной составляющей; S_{max} и F_{max} – максимальные значение сигнальной и фоновой составляющих в видеосигнале; знак] Z [означает округление числа Z до ближайшего целого в большую сторону.

Очевидно, что при выбранном фокусном расстоянии оптической системы связь между численными значениями измеряемых угловых координат объекта Ψ и χ (выраженными в радианах) и координатами
изображения *x* и *y* (выраженными в числе пространственных периодов ФПУ-структуры), устанавливается соотношениями

tg $\Psi = x \cdot d/f$; tg $\chi = x \cdot d'/f$,

где: $d \, u \, d'$ – пространственный шаг элементов ФФПУ по горизонтали и вертикали соответственно; f – расстояние от объектива до плоскости фокусировки изображения. Очевидно, что подобное соотношение устанавливает связь между среднеквадратическими погрешностями измерения угловых координат объекта $\sigma \Psi$, $\sigma \chi$, с одной стороны, и среднеквадратическими погрешностями измерения координат σx и σy , с другой.

Примечание.

Представленные результаты получены путём компьютерного моделирования при использовании алгоритма измерения координат энергетического центра изображения точечного объекта. Сравнительные результаты моделирования в случае использования других, более сложных алгоритмов цифровой обработки сигнала даны, например, в работе [13].



Рисунок 1 – Зависимость среднеквадратической погрешности измерения координат изображения точечного объекта от отношения сигнал/шум. (*d*-пространственный период элементов ФПУ; N – число разрядов АЦП)



Рисунок 2 – Зависимость среднеквадратической погрешности измерения координат изображения точечного объекта от размеров пятна рассеяния



Рисунок 3 – Зависимость среднеквадратической погрешности измерения координат изображения точечного объекта от числа разрядов двоичного кода.(Здесь µ – отношение сигнал/шум).



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

КАФЕДРА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

Кафедра создавалась в 1937-38 годах и существовала под следующими названиями:

- с 1938 по 1958 год кафедра военных оптических приборов;
- с 1958 по 1967 год кафедра специальных оптических приборов;
- с 1967 по 1992 год кафедра оптико-электронных приборов;
- с 1992 года кафедра оптико-электронных приборов и систем.

Кафедру возглавляли:

- с 1938 по 1942 год профессор К.Е. Солодилов;
- с 1942 по 1945 год профессор А.Н. Захарьевский (по совместительству);
- с 1945 по 1946 год профессор М.А. Резунов;
- с 1947 по 1972 год профессор С.Т. Цуккерман;
- с 1972 по 1992 год заслуженный деятель науки и техники РСФСР, профессор Л.Ф. Порфирьев;
- с 1992 по 2007 год заслуженный деятель науки РФ, профессор Э.Д. Панков.
- с 2007 года по настоящее время почетный работник высшего профессионального образования, профессор В.В. Коротаев.

История кафедры началась в 1937-38 годах с организации в Ленинградском институте точной механики и оптики (ЛИТМО) кафедры военных оптических приборов. Первым заведующим кафедрой был К.Е. Солодилов, до этого возглавлявший Центральное конструкторское бюро (ЦКБ) Всесоюзного объединения оптико-механической промышленности (ВООМП). Преподавателями кафедры стали сотрудники этого ЦКБ - М.А. Резунов, М.Я. Кругер, С.Т. Цуккерман, В.А. Егоров, Б.М. Кулежнов.

В годы Великой Отечественной войны кафедра была эвакуирована в Черепаново, где обязанности заведующего кафедрой выполнял профессор А.И. Захарьевский. Преподавателями кафедры по состоянию на 01.04.1945 г были профессор Чулановский, доцент Кругер, ст. преподаватель Гриневич, ассистенты Дедюлин и Погарев. После возвращения в Ленинград кафедрой в 1945-46 годах по совместительству заведовал начальник конструкторского бюро (КБ) Государственного оптического института им. С.И. Вавилова (ГОИ) М.А. Резунов.

В начале 1947 года кафедру возглавил профессор С.Т. Цуккерман, который руководил ею до 1972 года. В 1958 году кафедра была реорганизована в кафедру специальных оптических приборов, а в 1967 году в кафедру оптико-электронных приборов (ОЭП).

Создание С.Т. Цуккерманом в предвоенные годы книги «Точные механизмы» (М.: Оборонгиз, 1941) является значительным вкладом в развитие отечественного точного приборостроения. С.Т. Цуккерман является автором более 120 научных работ и более 50 изобретений. В предвоенные, военные и послевоенные годы С.Т. Цуккерман работал над созданием прицельных устройств для зенитной и авиационной артиллерии. Он был одним из создателей серийного авиационного гироскопического прицела АСП с автоматической выработкой поправки на упреждение, который устанавливался на истребителях МиГ, а также механического ракурсного прицела для мелкокалиберной зенитной артиллерии, широко применяемого во время войны во Вьетнаме.

В 1958 г. при кафедре была организована отраслевая лаборатория «Специальные оптические приборы» с достаточно сильной группой конструкторов-разработчиков. С.Т. Цуккерман и старший научный сотрудник А.С. Гридин руководили разработкой приборов управления по лучу (ПУЛ), предназначенных для управления движением различных подвижных объектов по прямой линии или по программе.

В начале 60-х годов старший научный сотрудник Г.Г. Ишанин занимался разработкой фотометрической аппаратуры, предназначенной для паспортизации оптико-электронных приборов и систем различного назначения.

Значительное влияние на содержание подготовки специалистов и научных исследований оказало привлечение к работе на кафедре

выдающегося специалиста в области оптико-электронного приборостроения, члена-корреспондента Российской академии наук (РАН), Героя Социалистического Труда, лауреата Ленинской премии профессора М.М. Мирошникова, который, работая на кафедре ОЭП с 1969 года по 1976 год в должности профессора по совместительству, поставил и читал курс «Теория оптико-электронных приборов».

С 1972 года по 1992 год кафедрой ОЭП заведовал заслуженный деятель науки и техники РСФСР, профессор Л.Ф. Порфирьев, известный специалист в области автоматических ОЭПиС в комплексах навигации и управления авиационной и космической техникой. Соответственно тематика выполнения научно-исследовательских работ на кафедре приобрела новые направления, существенно увеличилось число тем, носящих поисковый фундаментальный характер. Были разработаны новый учебный план и программы учебных дисциплин.

Л.Ф. Порфирьев является автором 19 учебников, учебных пособий и монографий, среди которых можно выделить такие как «Теория оптико-электронных приборов и систем» (Л.: Машиностроение, 1980), «Основы теории преобразования сигналов в оптико-электронных системах» (Л.: Машиностроение, 1989). Результаты его работ можно оценить как значительный вклад в разработку общей теории оптико-электронных систем.

Л.Ф. Порфирьев как руководитель проводил достаточно жесткую кадровую политику, при которой на кафедре оставались работать только те сотрудники, которые отличались преданностью делу. При этом он оказывал всемерную поддержку сотрудникам кафедры по разработке ими различных направлений теории и практики оптико-электронного приборостроения. По результатам научно-исследовательских работ в этот период защитили диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук Г.Н. Грязин (1983 г.), Е.Г. Лебедько (1985 г.), Э.Д. Панков (1986 г.), Г.Г. Ишанин (1988 г.), защищено много диссертаций на соискание ученой степени кандидата технических наук.

В этот период под руководством Э.Д. Панкова начали проводиться исследования по разработке новых оптико-электронных систем измерения взаимного положения разнесенных в пространстве объектов.

Г.Н. Грязин, перешедший на кафедру с радиотехнического факультета в конце 60-х годов, продолжил свои работы в области прикладного телевидения, в частности, по разработке систем наблюдения за быстродвижущимися объектами и быстропротекающими процессами.

С 1975 года заведующим отраслевой лабораторией стал старший научный сотрудник А.Н. Тимофеев, который продолжил исследования по разработке методов и средств контроля пространственного положения объектов с помощью ОЭП с оптической равносигнальной зоной для

машиностроения, энергетики, строительства, судостроения и железнодорожного транспорта.

С 1975 года, после увольнения в запас, из Ленинградской военной инженерной краснознаменной академии (ЛВИКА) им. А.Ф. Можайского на кафедру пришел работать в должности профессора С.П. Авдеев, известный специалист в области ОЭПиС космических аппаратов. Он поставил курсы и читал лекции по учебным дисциплинам «Оптико-электронные приборы», «Оптико-электронные приборы систем управления», «Оптико-электронные приборы для научных исследований».

Существенное влияние на содержание подготовки специалистов и научных исследований оказало привлечение к работе на кафедре лауреата Ленинской и Государственной премий профессора Б.А. Ермакова, известного специалиста в области физической оптики и оптико-электронного приборостроения. Б.А. Ермаков работал на кафедре ОЭП с 1979 года по 1992 год в должности профессора по совместительству и поставил курс «Оптико-электронные приборы с лазерами».

В 70-80 годах под руководством доцента Е.Г. Лебедько проводились исследования законов отражения лазерного излучения от нестационарных поверхностей и протяженных объектов, исследования в области теории идентификации объектов по их излучению в сложной фоновой ситуации. Создан комплекс для лазерной локации крупногабаритных морских объектов сложной конфигурации и водной поверхности. В этих работах принимали участие доценты О.П. Тимофеев и С.Б. Лукин.

В 70-90 годах под руководством Л.Ф. Порфирьева был разработан ряд астродатчиков, систем астроориентации и космической навигации (В.И. Калинчук, А.Л. Андреев, С.Н. Ярышев).

С 1992 г. заведующим кафедрой является заслуженный деятель науки Российской Федерации, профессор Э.Д. Панков. В 1992 году кафедра была переименована в кафедру оптико-электронных приборов и систем (ОЭПиС).

Под руководством Э.Д. Панкова в 70-90-х годах были проведены разработки ряда оптико-электронных приборов и систем специального и гражданского применения, нашедших практическое внедрение и способствующих научно-техническому прогрессу и укреплению обороноспособности нашей страны.

В частности, исследования и разработки в области линейных и угловых измерений позволили приступить к решению общей проблемы согласования отсчетных баз на нестационарно деформируемых объектах с помощью оптико-электронных систем.

В рамках указанной проблемы доцентом И.А. Коняхиным проводились исследования, результаты которых можно классифицировать как разработку теории построения автоколлимационных систем с компонентами нарушенной типовой конфигурации.

В то же время доцентом В.В. Коротаевым разработан ряд поляризационных приборов и измерительных установок. Теоретическим результатом работ явилась разработка методологии анализа поляризационных свойств оптических систем с изменяющейся ориентацией элементов. По результатам указанных работ В.В. Коротаев (в 1997 г.) и И.А. Коняхин (в 1998г.) защитили диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук.

Применение многоэлементных приемников в системах пеленгации дало толчок развитию телевизионных систем технического зрения, измерительных телевизионных систем и систем обработки изображений. Результаты этих исследований были использованы доцентом А.Л. Андреевым при постановке учебных курсов «Оптико-электронные системы с ЭВМ», «Специализированные аппаратные и программные средства ОЭП», «Автоматизированные телевизионные вычислительные комплексы», а также доцентом С.Н. Ярышевым при постановке им в 1993 году учебной дисциплины «Видеотехника».

Указанные курсы обеспечиваются лабораторным практикумом на рабочих мест. оснащенных персональными компьютерами, базе объединенными в локальную сеть. Рабочие места оснащены аппаратными и цифровой обработки программными средствами видеозаписи И изображений. В этот период Г.Н. Грязиным были подготовлены дисциплинам: «Телевизионные системы», «Прикладное телевидение и телевизионно-вычислительные комплексы» (совместно с А.Л. Андреевым).

На основе обобщения методик расчета оптико-электронных систем различного назначения и принципа действия в 1981 году были развернуты работы по созданию элементов систем автоматизированного проектирования ОЭП. За период с 1981 по 1987 год под руководством И.А. Коняхина были разработаны оригинальные пакеты прикладных программ расчета параметров систем измерения пространственного положения объектов.

Развитие компьютерной техники и программного обеспечения общего назначения позволило создать проблемно-ориентированное программное обеспечение поддержки проектирования ОЭП на системотехническом уровне.

По результатам научных работ сотрудниками кафедры ОЭПиС выпущено в свет 15 монографий, 11 учебников и учебных пособий. На кафедре подготовлено 14 докторов наук, а также более 110 кандидатов наук.

На разработки кафедры получены авторские свидетельства СССР и патенты Российской Федерации на более чем 200 изобретений. Наибольший вклад в изобретательскую деятельность внес Э.Д. Панков - автор 123 изобретений, из которых 33 внедрены в промышленности.

При заявлении научно-педагогической школы «Оптико-электронное приборостроение» в 2009 году были сформулированы следующие основные научно-технические результаты, достигнутые в период с 1938 по 2009 годы:

- разработаны принципы построения военных оптико-механических приборов;
- разработаны принципы построения точных механизмов;
- разработаны принципы построения оптико-электронных приборов с оптической равносигнальной зоной;
- систематизированы теоретические основы и принципы построения оптико-электронных приборов;
- разработаны методы описания импульсных сигналов, идентификации и классификации объектов в системах нестационарной лазерной локации;
- разработаны теория, принципы построения и методы расчета импульсных телевизионных систем наблюдения быстродвижущихся объектов;
- обнаружен термоупругий эффект в кристаллическом кварце и создан новый тип приемников оптического излучения;
- разработана теория построения автоколлимационных систем с компонентами нарушенной типовой конфигурации;
- разработана методология анализа поляризационных свойств оптических систем с изменяющейся ориентацией элементов;
- систематизированы теоретические основы и принципы построения измерительных систем на основе матричных фотопреобразователей;
- разработаны основы построения ОЭС согласования отсчетных баз на нестационарно деформируемых объектах.

Основоположники научной школы:

- Солодилов Константин Евгеньевич, заведующий кафедрой с 1938 г. по 1942 г., профессор;
- Цуккерман Семен Тобиасович, заведующий кафедрой с 1947 г. по 1972 г., профессор;
- Мирошников Михаил Михайлович, директор ГОИ, д.т.н., профессор, профессор кафедры ОЭП с 1967 г. по 1978 г.; член-корреспондент Российской Академии наук, Герой Социалистического Труда, лауреат Ленинской премии.
- Порфирьев Леонид Федорович, заведующий кафедрой с 1972 г. по 1992 г., д.т.н., профессор, Заслуженный деятель науки и техники РСФСР.

С 2007 г. заведующим кафедрой является почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, профессор В.В. Коротаев.

На кафедре была открыта подготовка по новой специализации инженеров «Оптико-электронные приборы и системы обработки видеоинформации» и новая магистерская программа «Оптико-электронные методы и средства обработки видеоинформации».

В 2007 году был создан научно-образовательный центр оптико-электронного приборостроения (НОЦ ОЭП).

Научно-образовательный центр оптико-электронного приборостроения выполняет научно-исследовательские И опытно-конструкторские работы по созданию видеоинформационных и информационно-измерительных приборов различного назначения, высокоточных приборов для измерения линейных, угловых и других физических величин в промышленности, энергетике, на транспорте, а также систем технического зрения и обработки видеоинформации. К выполнению научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ широко привлекаются студенты, аспиранты, молодые специалисты, молодые кандидаты наук. Научно-образовательный центр является активным Федеральной участником целевой программы «Научные И научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

Направления научных исследований кафедры ОЭПиС в 2007-2011 годах

Развитие теоретических основ и принципов построения оптико-электронных приборов и систем, в том числе:

- видеоинформационных измерительных систем;
- видеоинформационных систем наблюдения;
- видеоинформационных импульсных систем наблюдения быстродвижущихся объектов;
- комплексированных телевизионно-тепловизионных систем наблюдения,
- ОЭПиС обеспечения техносферной безопасности;
- ОЭПиС согласования отсчетных баз на нестационарно деформируемых объектах;
- автоколлимационных систем с компонентами нарушенной типовой конфигурации;
- ОЭПиС цветового и спектрального анализа объектов;
- фотометрических систем аттестации ОЭПиС, источников и приемников оптического излучения;
- систем лазерной локации с нестационарным облучением;
- ОЭС сепарации полезных ископаемых.

По результатам исследований в этот период на кафедре были защищены 14 диссертаций на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Идет активное пополнение преподавательского состава молодыми кандидатами наук. В настоящее время на кафедре работает 7 кандидатов наук в возрасте до 35 лет.

Мы занимаемся разработкой оптико-электронных приборов и систем в целом:

- ✓ системотехническое проектирование,
- ✓ разработка (выбор) оптической системы,
- ✓ разработка конструкции,
- ✓ разработка (выбор) электроники и средств обработки информации,
- ✓ разработка программного обеспечения,
- ✓ сборка, юстировка, настройка и испытания.

Заказчикам мы сдаем законченное изделие.

По итогам конкурсов ведущих научно-педагогических коллективов СПбГУ ИТМО 2007-2010 годов кафедра занимала призовые места.

Подробная информация о кафедре ОЭПиС имеется на сайте кафедры: http://oeps.ifmo.ru/

Андрей Леонидович Андреев

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ВИДИОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Учебное пособие

В авторской редакции А.Л. Андреев Редакционно-издательский отдел НИУ ИТМО Зав. РИО H.Ф. Гусарова Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99 Подписано к печати Заказ № Тираж Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел

Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

