

ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ В ИРЭ НАН УКРАИНЫ

Ю. В. Корниенко

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: milv@ire.kharkov.ua*

Обзор исследований и разработок, выполненных в ИРЭ НАНУ в области аналоговой и цифровой обработки изображений за почти 40-летний период. Кратко излагаются научные основы обработки изображений, история возникновения этих работ в ИРЭ, основные этапы фундаментальных и прикладных исследований. Описаны созданные в ИРЭ на первых этапах работы когерентно-оптическая установка и система цифровой обработки изображений. Кратко изложена суть исследований, проводимых в ИРЭ в последнее время. Ил. 2. Библиогр.: 118 назв.

Ключевые слова: фильтрация изображений, байесовский статистический подход, видение сквозь турбулентную атмосферу.

В 1960-е гг. в разных областях науки и техники постепенно начало созревать понимание того, что богатый опыт фильтрации сигналов, накопленный в радиотехнике и при создании систем автоматического управления, должен быть использован для обработки изображений, т. е. сигналов, определяемых функцией точки на плоскости. Такая потребность давно существовала в следующих научных направлениях: наблюдательной астрономии, биологической микроскопии, медицинской рентгенокопии, дефектоскопии, радиолокации, акустической локации и т. д. Пожалуй, особенно остро этот вопрос стоял в отношении изображений поверхности планет, получаемых с помощью космических аппаратов. Они были подвержены действию помех при передаче по радиоканалу и содержали ряд других дефектов. Из-за этого огромные затраты на запуск космического аппарата далеко не всегда окупались получаемыми научными результатами. С другой стороны, из-за большого объема информации, поступающей из некоторых космических экспериментов, назревал вопрос об автоматизации анализа полученных изображений.

Институт радиофизики и электроники (ИРЭ АН УССР, ныне ИРЭ им. А. Я. Усикова Национальной академии наук Украины (ИРЭ НАНУ)) был подходящим местом для развертывания работ в этом направлении. В число главных направлений в Институте входили радиолокация и исследование распространения радиоволн в среде со случайными неоднородностями показателя преломления. В этих направлениях еще в 1950-е гг. был выполнен большой объем исследований и получены весьма значимые результаты. Естественным логическим продолжением этих достижений могло стать развертывание исследований по обработке изображений, в частности, с целью преодоления мешающего влияния атмосферы и формирования изображений по радиолокационным сигналам. Кроме того, в Институте

был хороший коллектив квалифицированных физиков-теоретиков, которые могли создать необходимую атмосферу для творчества в области теории обработки изображений и дать правильную оценку получаемым результатам.

Все эти обстоятельства привели к тому, что директор ИРЭ академик АН УССР А. Я. Усиков взял курс на развитие исследований по обработке изображений. С 1970 г. эта работа стала вестись планомерно. Неустанная забота А. Я. Усикова об этой работе, его увлеченность этими исследованиями, живой интерес к каждому, даже самому маленькому результату обеспечили успех этого дела. Неоценимую поддержку развитию этих работ оказал президент Академии наук УССР Б. Е. Патон.

Цель данной статьи – окинуть ретроспективным взглядом исследования в этой области, выполненные в ИРЭ НАНУ за почти 40-летний период, на фоне идейной основы, которая была заложена еще классиками, развитая в наше время и теперь может служить надежным фундаментом при решении теоретических вопросов обработки изображений и ее применения в науке и технике.

1. Фильтрация сигналов. Краткая история вопроса. Фильтрация сигналов впервые появилась в телефонной и телеграфной связи как средство разделения нескольких сигналов, передаваемых по одной проводной линии. С появлением радиосвязи она стала неотъемлемым элементом техники приема радиосигналов, необходимым для разделения сигналов разных радиостанций. Дальнейшее развитие радиотехники значительно расширило круг задач фильтрации, появились задачи восстановления правильной формы сигнала, искаженного при передаче по каналу связи или через усилительный тракт, и подавления помех различной природы. Это требовало развития теории электрических цепей и методов синтеза электрических фильтров с заданными параметрами.

С появлением радиолокации возникли задачи обнаружения сигнала на фоне случайных и регулярных помех, оценки параметров сигнала, распознавания объектов различных классов по отраженным от них сигналам, определения траектории движущегося объекта по приходящему от него сигналу. Важность этих задач для обороны способствовала привлечению большого числа специалистов высокого ранга к исследованиям в этой области. Н. Винер во время второй мировой войны работал над прогнозированием движения самолета в условиях зенитного обстрела, и именно это привело к появлению знаменитого винеровского фильтра.

Бурный технический прогресс в середине XX в. способствовал возникновению ряда теоретических дисциплин, в том числе теории информации (основы которой были заложены К. Шенноном), призванных дать строгое математическое описание принципиальным возможностям использования сигналов для передачи информации и их преобразования из одной формы в другую. Появилось понятие количества информации по Шеннону, актуальное при описании передачи и хранения информации (наряду с уже известным тогда понятием информации по Фишеру, весьма актуальным при рассмотрении ряда других задач). С этого момента теория фильтрации сигналов приобрела черты строгой математической теории. Заметим для дальнейшего, что теория информации является в своей основе статистической теорией, и это придало тот же характер и ряду задач фильтрации сигналов.

Другим источником задач такого рода стал прогресс в области систем автоматического управления.

Развитие космических исследований и некоторых других областей науки и техники (например, биологической микроскопии) поставило на повестку дня задачу обработки изображений с целью улучшения их качества (гамма-коррекция, повышение разрешения), автоматизации анализа содержащейся в них информации и извлечения из них количественных характеристик изображенных объектов (подсчет клеток в биопрепарате или кратеров на Луне, их классификация по заданным признакам и т. п.). К этому классу принадлежит и технологическая задача определения конструктивных параметров микросхемы с различными целями, в частности, для контроля качества производства. Все это расширило класс сигналов, подлежащих фильтрации: с этого времени объектом фильтрации стали не только сигналы, выражаемые функциями времени, но и сигналы, выражаемые функциями двух пространственных координат (пространственная фильтрация [1]).

Переход от сигналов, описываемых функциями одной переменной, к сигналам, опи-

сываемым функциями двух переменных, не был тривиальным, как это могло бы показаться при скользком взгляде. Переход от одномерной области определения функции к двумерной породил ряд новых свойств, трудностей и возможностей, которых не было в случае временных сигналов. Достаточно взглянуть на теорему Найквиста – Котельникова, которая выглядит в этих двух случаях по-разному, поскольку симметричное периодическое расположение точек отсчета с заданным шагом на вещественной оси можно осуществить единственным образом (с точностью до величины шага и положения начала отсчета), а на плоскости – бесконечным числом способов (в квадратной или гексагональной решетке с произвольной ориентацией). Другим примером может служить задача восстановления сигнала по квадрату модуля его фурье-образа, возможность однозначного решения которой существенно отличается в одномерном и двумерном случае.

2. Некорректность задач фильтрации в простейшей постановке. Обычно задача фильтрации ставится следующим образом. Пусть изображение $u(x, y)$ подвергается искажающему воздействию, которое выражается известным оператором L , в результате чего получается изображение $v(x, y)$, измеряемое в ходе физического эксперимента. Зная $v(x, y)$, требуется найти $u(x, y)$. Таким образом, по своей природе эта задача относится к числу обратных задач физики, большинство которых в прямолинейной постановке оказываются некорректными. Происходит это по следующим причинам.

Измерения, в результате которых становится известным изображение $v(x, y)$, всегда производятся с конечной погрешностью. Поэтому связь между u и v в действительности выражается соотношением

$$Lu(x, y) = v(x, y) + n(x, y), \quad (1)$$

где $n(x, y)$ – некоторая реализация шума, неизвестная в силу своего случайного характера. Таким образом, как и при всяком измерении, абсолютно точное определение $u(x, y)$ невозможно. Возможным остается только определение $u(x, y)$ с некоторой случайной погрешностью, которая, конечно, обращается в ноль при $n(x, y) = 0$.

При этом до недавнего времени было распространено следующее рассуждение. Будем решать уравнение (1), воздействуя на обе части равенства оператором L^{-1} и не обращая внимания на второе слагаемое справа. Тогда мы получим выражение для $u(x, y)$, отличающееся от истинного на слагаемое $L^{-1}n(x, y)$, которое бу-

дет как угодно мало для достаточно малого $n(\mathbf{r}, y)$. (Для простоты будем считать оператор L линейным.) Такое рассуждение верно во многих случаях, но не всегда: для этого нужно, чтобы оператор L^{-1} был непрерывным. Между тем, в обратных задачах физики оператор L обычно бывает сглаживающим и, следовательно, L^{-1} не является непрерывным [2]. Поэтому погрешность в определении $u(\mathbf{r}, y)$ может быть как угодно большой при как угодно малом $n(\mathbf{r}, y)$.

Более того, уравнение (1) может вообще не иметь решения. Пусть M – множество функций $u(\mathbf{r}, y)$, на котором определен оператор L . Обратный оператор L^{-1} , естественно, определен на множестве LM , и потому в отсутствие шума уравнение (1) всегда имеет решение. Однако шумовая добавка $n(\mathbf{r}, y)$ может вывести правую часть за пределы множества LM , где оператор L^{-1} не определен.

Таким образом, рассматриваемая физическая задача восстановления $u(\mathbf{r}, y)$ в буквальном понимании является математически некорректной, и требуется другая, математически корректная, ее формулировка.

К этому можно подойти с разных позиций. Наиболее распространенные подходы рассматриваются в следующих разделах.

3. Различные подходы к фильтрации изображений. Здесь, прежде всего, хотелось бы подчеркнуть, что в этом и трех следующих разделах речь будет идти о подходах к задачам фильтрации изображений, а не о методах их решения, т. е. о способах формулировки практической задачи на языке математики до попыток ее решить, поскольку всякая математическая задача, перед тем, как ее решать, должна быть корректно поставлена.

Поскольку запрос на развитие методов обработки изображений исходил из практической сферы деятельности, большинство результатов на первом этапе развития этой области имело прагматический характер и было получено эмпирическим или полумэмпирическим путем.

Тем не менее, уже первые результаты в этом направлении показали широкие перспективы, которые открылись перед обработкой изображений, в частности, космических. Ярким примером этому может служить обработка изображений Марса, полученных космическим аппаратом «Маринер-4» [3].

К числу первых попыток сформулировать математически обоснованные методы фильтрации астрономических изображений с це-

лью их восстановления следует отнести работы [4-6]. В работе [4] предложено устранять замыкающее влияние атмосферы на изображения планет путем постдетекторной обработки, состоящей в решении интегрального уравнения

$$\int g(\mathbf{r} - \mathbf{r}') u(\mathbf{r}') dS_{r'} = v(\mathbf{r}), \quad (2)$$

где $u(\mathbf{r})$ – неизвестная яркость в исходном изображении, зависящая от радиуса-вектора \mathbf{r} ; $v(\mathbf{r})$ – зарегистрированная яркость и $g(\mathbf{r} - \mathbf{r}')$ – ядро замытия (аппаратная функция, функция рассеяния точки), которое характеризует состояние атмосферы, быстро убывает на бесконечности и может быть приближенно представлено гауссовой функцией или их комбинацией.

В работе [5] показана некорректность задачи в такой постановке и предложен путь корректной постановки и решения задачи с учетом шумового слагаемого в правой части (2), состоящий в байесовской оценке компонент Фурье изображения и приводящий к винеровскому фильтру для изображений. Почти одновременно винеровский фильтр как средство восстановления изображений, замытых турбулентной средой, был предложен в более известной работе [6].

4. Эмпирический подход к фильтрации изображений. Это наиболее распространенный подход специалистов-прагматиков, которые хотят получить практически полезный результат, не вдаваясь в подробности его теоретического обоснования. Обычно сообщение о таком результате содержит критический анализ уже известных алгоритмов, изложение предлагаемого алгоритма, примеры, иллюстрирующие его возможности, и соображения, позволяющие считать, что этот алгоритм лучше ранее известных [7]. При этом преимущества алгоритма оцениваются, главным образом, по его техническим характеристикам: сложность алгоритма, время его выполнения, необходимость дополнительных исходных данных и т. д. Такой алгоритм может давать результаты, лучшие, чем ранее известные алгоритмы, но их оценка обычно носит субъективный характер из-за отсутствия четких математических критериев качества.

Типичным примером этого является так называемая инверсная фильтрация [8]. Как уже было сказано в разд. 3, если связь между истинным изображением $u(\mathbf{r}, y)$ и результатом его регистрации описывается равенством (1), попытка «восстановить» изображение, т. е. найти $u(\mathbf{r}, y)$, воздействуя на результат регистрации оператором L^{-1} , обратным искажающему оператору L , может привести к бессмысленному результату. Отсюда следовало бы сделать вывод о необходимости более детальной математической

проработки вопроса. Однако многие авторы пошли по другому пути. Поскольку трудность происходит от недостаточной гладкости зарегистрированного изображения, они предлагают предварительно сгладить его в достаточной степени некоторым оператором \hat{S} , а затем уже применять к полученному результату процедуру восстановления оператором L^{-1} .

Такой подход дает на практике неплохие результаты. Однако остается неясным, до какой степени следует сглаживать исходное изображение. Кроме того, при сравнении двух результатов восстановления, полученных с разными операторами \hat{S} , остается неясным, по какому критерию следует их сравнивать.

5. Применение методов регуляризации.

Под регуляризацией понимается «использование той или иной формы отбора допустимых решений при построении устойчивых к исходной информации приближенных решений некорректно поставленных задач» [9].

Под некорректно поставленной задачей понимается задача, не являющаяся корректно поставленной по Адамару.

Задача отыскания неизвестного объекта u из пространства U по известному v из пространства W из уравнения

$$T \mathcal{C} \stackrel{\sim}{=} v \quad (3)$$

называется корректно поставленной по Адамару [10], если для каждого $v \in W$ существует единственное и устойчивое решение $u \in U$.

В работе [9] не уточняется, что такое «допустимое решение», однако в работе [2] слово «решение» в подобном контексте берется в кавычки или заменяется словами «обобщенное решение» или «квазирешение», хотя часто выражение «приближенное решение» употребляется там и в случаях, когда точное решение не существует, и речь может идти только о квазирешении, но не о приближенном решении в традиционном для математики смысле.

Под квазирешением понимается такой элемент $u_0 \in U$, для которого $T \mathcal{C} \stackrel{\sim}{\approx}$ в некотором смысле наименее отличается от v , например, достигает минимума расстояние $\delta \mathcal{C} \mathcal{C} \stackrel{\sim}{\approx} u$ между $T \mathcal{C} \stackrel{\sim}{\approx}$ и v в пространстве W [11]. Если решение уравнения (1) существует, оно совпадает с квазирешением, поскольку для разумно введенного расстояния $\delta \mathcal{C} \mathcal{C} \stackrel{\sim}{\approx} v_2$ всегда $\delta \mathcal{C} \mathcal{C} \stackrel{\sim}{\approx} v \stackrel{\sim}{=} 0$.

Под методом регуляризации понимается «метод построения приближенных решений некорректных задач, состоящий в том, что в качестве приближенного решения некорректных задач берутся значения регуляризующего оператора с

учетом приближенного характера исходной информации» [12].

Некоторая специфика приведенных определений регуляризации и метода регуляризации адекватно отражает тот реальный факт, что в методе регуляризации содержится значительная степень произвола, не ограниченного математическими соображениями и отражающего разнообразие физических соображений, которыми может быть дополнена математическая основа метода. Однако эти физические соображения пока не получили математически корректной формы, и ситуация похожа на ту, в которой находилась в прошлом теория вероятностей, когда физики считали ее математической теорией, а математики – физической.

Существует целый ряд методов регуляризации:

- метод подбора (когда пространство U считается конечномерным);

- метод В. К. Иванова [11] (основанный на минимизации невязки, т. е. расстояния δ между Tu и v);

- метод М. М. Лаврентьева (в котором исходное уравнение (1) заменяется близким к нему и таким, что его решение существует и единственно), близкий к методу Лаврентьева метод квазиобращения;

- метод Филлипса (в котором из числа «возможных» квазирешений выбирается то, которое обладает наибольшей гладкостью) и его модификация, предложенная Туоми и дающая квазирешение, более похожее на истинную искомого функцию.

Наконец, широкое применение нашел метод регуляризации по А. Н. Тихонову [13], основанный на применении регуляризующего оператора, зависящего от параметра регуляризации, взамен оператора T^{-1} . Будучи основанным на других идеях, он практически совпадает с методом Филлипса – Туоми, за исключением одного: неопределенность параметра регуляризации α , являющаяся недостатком в методе Филлипса – Туоми, выступает в методе Тихонова как естественная черта метода. В ряде работ, развивающих идеи А. Н. Тихонова, предпринимались попытки устранить эту неопределенность. Однако вряд ли это можно сделать в рамках одних только математических соображений, так как здесь мы сталкиваемся с вопросом об априорной информации относительно искомого математического объекта, а решение этого вопроса относится, скорее, к области физики, чем математики.

Таким образом, здесь мы впервые встречаемся с вопросом об априорной информации, которая в реальных задачах фильтрации сигналов играет весьма существенную роль и подлежит учету. Регуляризация, по сути, представляет со-

бой учет априорной информации об искомом решении физической задачи [2], однако делается это в скрытом виде, без явной формулировки, в чем эта информация состоит.

Методы регуляризации некорректных задач восходят к далекому прошлому, хотя в то время они и не выделялись в отдельную дисциплину. Одним из первых методов регуляризации был метод наименьших квадратов [14, 15]. Если в уравнении (1) u принадлежит n -мерному евклидову пространству U , v – m -мерному евклидову пространству W , а T – линейный оператор, отображающий u в v , причем $m > n$, задача определения u по известному v является некорректной, поскольку (1) в этом случае представляет собой переопределенную систему линейных алгебраических уравнений, которая при наличии случайных погрешностей в правой части становится несовместной. В качестве квазирешения уравнения (1) метод наименьших квадратов в этом случае предписывает принять за искомое значение u такое u_0 , которое обеспечивает минимум сумме квадратов компонент вектора $v - T u_0$. Таким образом, это простейший пример метода квазирешения В. К. Иванова с расстоянием δ , в качестве которого выступает обычное расстояние в евклидовом пространстве.

Метод наименьших квадратов легко распространяется на случай гильбертова пространства. Именно таким путем получен знаменитый винеровский фильтр [16] (см. разд. 2; применительно к изображениям он получен в работе [5]).

Заметим, однако, что в случае метода наименьших квадратов и винеровского фильтра выбор расстояния δ сделан не по произволу исследователя, а из теоретико-вероятностных соображений (см. разд. 6). Это принципиально отличает их по сути от методов регуляризации, к числу которых их можно отнести по форме, но не по идейной основе.

6. Статистический подход. Статистический подход к фильтрации сигналов основан на представлении о сигнале как об элементе некоторого статистического ансамбля и состоит в применении для его статистической оценки теории оптимальных статистических решений [17].

Общеизвестно, что физические задачи можно разделить на два класса: прямые, в которых требуется найти неизвестные следствия по известным причинам, и обратные, в которых требуется найти неизвестные причины по известным следствиям. (Считается [18], что эту классификацию ввел А. Н. Тихонов [19]. В то же время трудно отделаться от мысли, что П. С. Лаплас в 1774 г. имел в виду то же самое и, сверх того, вероятностную природу обратных задач, назвав свой зна-

менитый труд [20] «Мемуар о вероятности причин по событиям».)

Когда исследуемые объекты и процессы описаны в точных математических выражениях, т. е. имеется их математическая модель [21], физическая задача может быть сформулирована как математическая, и появляется возможность решать ее математическими методами. При этом корректность ее постановки определяется совершенством математического описания объектов и процессов, фигурирующих в физической задаче. Если в результате математическая задача оказывается некорректно поставленной, это говорит о несовершенстве принятого математического описания физической задачи и необходимости более аккуратной ее формулировки. С этой точки зрения некорректность постановки математической задачи не является внутренней проблемой математики: она относится к области физики, где и должна быть преодолена.

Практика показывает, что прямые задачи физики легче поддаются корректной математической формулировке. Обратные же физические задачи, наоборот, очень часто приводят к некорректно поставленным математическим задачам. Но это связано с их физической, а вовсе не математической спецификой. Если математическая модель адекватно описывает физическую реальность на основе математически корректной физической теории, если при этом v в уравнении (1) известно точно, то решение уравнения (1) обязательно существует и совпадает с тем истинным u , которое породило обнаруженное в эксперименте v . Проблема некорректности возникает в тот момент, когда за истинное v принимают показания измерительных приборов, которые в действительности никогда не показывают истинного v , а показывают лишь v , искаженное случайными погрешностями (обозначим его через V). В этой ситуации результат V , полученный при измерении v , может легко выйти за пределы области определения оператора T^{-1} , и требование найти u непосредственно из уравнения (1) становится бессмысленным. Тогда необходимость сформулировать задачу математически корректно должна стать заботой физика, а не математика.

Отправной точкой на пути к корректной постановке математической задачи, к которой сводится обратная физическая задача, является тот факт, что результат V является при фиксированном v случайным элементом некоторого вероятностного пространства (т. е., говоря на языке физики, статистического ансамбля), который следует характеризовать распределением вероятностей, обычно плотностью вероятности $\rho(u|v)$ или, если речь идет об оценке u на основании уравне-

ния (1), плотностью $\rho(u)$, в которую u входит в качестве параметра. Апостериорная плотность вероятности $\rho_{\text{по}}(u)$ (после эксперимента), характеризующая распределение вероятностей с учетом результата эксперимента по измерению v , определяется известной формулой Байеса [17]

$$\rho_{\text{по}}(u) = \frac{\rho_{\text{до}}(u) \rho(v|u)}{\rho(v)}, \quad (4)$$

где $\rho_{\text{до}}(u)$ (до эксперимента) – априорная плотность вероятности, характеризующая априорное распределение в ансамбле, к которому принадлежит u . Имея апостериорное распределение для u , можно ставить задачу оптимальной статистической оценки u , для чего, однако, надо сначала сформулировать критерий оптимальности.

Для этого вводится функция потерь $L(u, u^*)$, определяющая величину потерь, обусловленных тем, что при истинном значении искомой величины u для нее дается оценка u^* . Эта функция отражает интересы потребителя в конкретной ситуации, является внешней по отношению к этой теории и не может быть выведена из каких-либо ее положений. Наилучшей считается такая оценка, при которой апостериорное математическое ожидание значения функции потерь достигает минимума. Такой подход к задаче называют байесовским статистическим подходом [17].

В случае квадратичной функции потерь

$$L(u, u^*) = |u^* - u|^2, \quad (5)$$

наиболее часто используемой на практике, оптимальной оценкой u является его апостериорное математическое ожидание.

Если эксперимент производится с достаточно высокой точностью, апостериорное распределение обычно оказывается гауссовым, и апостериорное математическое ожидание u совпадает с тем значением u , при котором $\rho_{\text{по}}(u)$ достигает максимума. Таким образом, в этом случае оценки по апостериорному среднему и по максимуму апостериорной плотности вероятности совпадают друг с другом.

Если в (4) априорная плотность вероятности $\rho_{\text{до}}(u)$ имеет широкий максимум и, таким образом, мало изменяется в пределах максимума второго сомножителя, ее изменением можно пренебречь и оценивать u по максимуму второго сомножителя. Такая оценка называется оценкой по максимуму правдоподобия [22]; функцией правдоподобия называют второй сомножитель в числителе (4); ее логарифм называют логарифмической функцией правдоподобия.

Байесовский статистический подход, не будучи сформулированным подробно, издавна

применялся на практике. По-видимому, первыми значительными примерами его применения явились метод наименьших квадратов К. Ф. Гаусса [14, 15] и теория ошибок П. С. Лапласа [20]. Тем не менее, четкая последовательная его формулировка [23] появилась только в 1950 г. (вероятно, под влиянием необходимости эффективно обрабатывать радиолокационные сигналы). Первая обстоятельная монография по этому вопросу [17] появилась и того позже, в 1970 г., когда уже начинались исследования, которым посвящена данная работа. (Отметим, что когда в ИРЭ АН УССР выполнялась работа по светолокации Луны [24] (1963-1966 гг.), эта теория еще не была опубликована, и ее пришлось строить самостоятельно, опираясь только на идеи классиков, чтобы решить задачу оптимального накопления слабого светолокационного сигнала в режиме счета фотонов [25]. Поэтому в работе [24] нет ссылок на работы [17, 23]).

По-видимому, главными потребителями теории оптимальных статистических решений, помимо чисто прикладных областей, являются экспериментальная физика, наблюдательная астрономия и обработка сигналов. Но хотя эта теория и не является неожиданностью в этих областях науки, проникает она туда, как видно из литературы, очень медленно. Видимо, это и послужило стимулом для появления обстоятельного обзора [18], по сути, посвященного пропаганде статистического подхода как самого естественного для физики.

В этом обзоре обстоятельно и ясно изложена ситуация, сложившаяся вокруг некорректных задач, и изложен корректный статистический подход к их постановке и решению. И хотя авторы с оглядкой на специалистов по некорректным задачам иногда пользуются термином «статистическая регуляризация», они не пытаются скрыть тот очевидный факт, что некорректная задача – это просто неправильно поставленная задача, и вместо того, чтобы пытаться ее решать, лучше сначала поставить ее математически правильно, для чего самым естественным является статистический подход.

Однако вопросы обработки изображений в этой работе не затрагиваются. И в монографии [17], и в обзоре [18] u считается числом или, в крайнем случае, вектором конечномерного векторного пространства. В действительности же возможности этой теории не ограничиваются этими случаями: результаты, изложенные в [18], по большей части применимы и к случаю, когда u является вектором гильбертова пространства, что весьма типично в теории обработки сигналов. Но в то же время для этого случая характерны и некоторые особенности, которые требуют специального рассмотрения (см. разд. 7).

Применительно к изображениям описанный здесь статистический подход сформулирован в работах [26, 27].

7. Математические основы статистического подхода. Базовой математической теорией, на которой основан статистический подход к фильтрации изображений, является теория вероятностей.

Первые идеи теории вероятностей принадлежат Б. Паскалю, П. Ферма, Х. Гюйгенсу и Я. Бернулли (закон больших чисел). Важным шагом на пути к применению теории вероятностей в научных исследованиях стало создание теории ошибок П. С. Лапласом [20] («Мемуар о вероятности причин по событиям», 1774 г.) и К. Ф. Гауссом [14] («Теория движения небесных тел, вращающихся вокруг Солнца по коническим сечениям», 1809 г.), в которой развит и обоснован знаменитый метод наименьших квадратов, впервые сформулированный в работе А. М. Лежандра («Новые методы определения орбит комет», 1805 г.) [28].

Развитие математической статистики явилось еще одной опорой для современной теории фильтрации. Математическая статистика ведет свое начало от классиков теории вероятностей Я. Бернулли, П. С. Лапласа и С. Пуассона [29]. Существенным для фильтрации разделом является теория статистических решений, в современном виде развитая Вальдом [23]. Обстоятельное ее изложение содержится в книге [17]. В значительной своей части она основана на формуле Т. Байеса [30].

Сложность методов теории статистических решений существенно зависит от математической природы случайных элементов (обобщение понятия случайной величины, введенное Фреше в 1948 г.), с которыми приходится иметь дело при решении конкретной практической задачи. Задачи обработки сигналов вообще и фильтрации изображений, в частности, требуют для своего строгого рассмотрения оперировать с понятиями функциональных пространств и, следовательно, пользоваться идеями функционального анализа. При этом повышаются требования к строгости теории вероятностей как математической теории, которым теория вероятностей в ее классическом виде уже не удовлетворяет. Проблема аксиоматического обоснования теории вероятностей фактически существовала с самого начала ее развития. В явном виде ее впервые поставил на повестку дня Д. Гильберт; первые попытки решить ее были сделаны С. Н. Бернштейном (г. Харьков, 1917 г.) и Р. Мизесом, а успешное решение ее принадлежит А. Н. Колмогорову [31, 32].

Простейшие задачи фильтрации сигналов позволяют исследователю ограничиться рассмотрением конечномерного пространства сигналов.

Такое положение имеет место в задачах выделения радиолокационного и светолокационного сигнала на фоне регулярных и случайных помех, в задаче светолокационного определения параметров орбиты небесного тела при очень слабом отраженном сигнале, в задачах, где сигналом является зависящее от времени изображение объекта ограниченного класса и в ряде других задач. При рассмотрении таких задач естественно описывать статистические свойства сигнала и шума в терминах плотности вероятности, под которой понимается производная Радона-Никоидима [33] от вероятности множества по некоторой естественной его мере, в качестве которой часто выступает мера Лебега [34] в декартовом пространстве параметров сигнала (т. е. практически объем в пространстве параметров). Этот подход, к сожалению, вызывает затруднения при переходе к сигналам, принадлежащим бесконечномерному пространству, из-за того, что не всегда удается ввести желаемую плотность вероятности. Это обстоятельство вынуждает исследователя подняться на более высокую ступень математической культуры и привлечь в качестве инструмента понятия функционального анализа и теории меры.

Опираясь с бесконечномерным пространством, приходится считаться с тем фактом, что мера Лебега, столь естественная в конечномерных пространствах, не имеет аналога в бесконечномерном пространстве: в этом случае не существует не только меры, инвариантной относительно сдвигов (подобно мере Лебега), но даже меры, инвариантной относительно произвольных поворотов [35]. К счастью, на случай бесконечномерного пространства удастся успешно распространить понятие гауссовской меры, т. е. вероятностной меры, плотность которой относительно обычного объема (в конечномерном случае) является гауссовой функцией [35]. Это создает основу для постановки и решения статистических задач, в которых случайными элементами являются векторы бесконечномерных пространств.

Проблему введения вероятностной меры в бесконечномерном пространстве удалось решить Н. Винеру в 1923 г. [36, 37] (отправляясь от рассмотрения броуновского движения) и в более общем виде А. Н. Колмогорову в 1931 г. [31, 32] на основе понятий цилиндрического множества и цилиндрической меры, которые позволяют определить вероятностную меру в бесконечномерном пространстве через последовательность вероятностных мер в конечномерных пространствах неограниченно возрастающей размерности. В работах [36, 37] введена вероятностная мера в пространстве непрерывных вещественных функций на интервале $[0; 1]$, ныне называемая винеровской мерой, которая явилась, по-видимому, первой

мерой, определенной в бесконечномерном пространстве. В работе [31] А. Н. Колмогоровым была сформулирована и доказана теорема о согласованных распределениях (определяющих вероятностную меру в бесконечномерном пространстве), которая является основой теории бесконечномерных вероятностных пространств. С этого времени идейный фундамент теории вероятностей стал достаточно прочным, чтобы послужить основой для теории фильтрации сигналов.

Дальнейшее развитие теории меры в бесконечномерных пространствах также имеет определенное отношение к теории фильтрации сигналов, поскольку помогает ответить на вопрос: до каких пределов можно распространять обычные представления о плотности вероятности на случай бесконечномерного пространства сигналов? С этой точки зрения заслуживают внимания следующие результаты.

В 1944 г. Р. Камерон и В. Мартин [38] установили квазиинвариантность винеровской меры относительно сдвигов на произвольную функцию, производная от которой есть функция с ограниченной вариацией. Иначе говоря, новая мера, полученная путем такого сдвига, остается эквивалентной исходной мере, т. е. всюду имеет по ней конечную и отличную от нуля производную Радона-Никодима. Более того, сдвиг на функцию, не принадлежащую этому классу, порождает меру, ортогональную исходной, т. е. имеющую производную Радона-Никодима по исходной мере, везде равную либо нулю, либо бесконечности.

В 1958 г. Фельдман [39] и независимо Гаек доказали, что любые две гауссовы меры либо эквивалентны, либо ортогональны. Таким образом, второй пункт предыдущего результата оказывается естественным следствием первого.

В 1944 г. С. Какутани [40] сформулировал и доказал свою известную теорему о бесконечном произведении мер. Она утверждает, что если имеется две последовательности мер, попарно эквивалентных друг другу, то две меры, каждая из которых определена как бесконечное произведение элементов своей последовательности, всегда либо эквивалентны, либо ортогональны друг другу. В отличие от предыдущих результатов, этот результат относится к любым, а не только к гауссовым мерам.

Эти результаты проливают свет на вопрос о том, в каких случаях существует плотность вероятности по мере, заменяющей в бесконечномерном случае объем, к которому мы привыкли, имея дело с конечномерными пространствами сигналов.

8. Начало исследований по обработке изображений в ИРЭ АН УССР. Исследования по обработке изображений в ИРЭ АН УССР с

самого начала велись при участии сотрудников других организаций и прежде всего Главной астрономической обсерватории АН УССР и Астрономической обсерватории Харьковского государственного университета. В качестве первой задачи, требующей для своего решения обработки изображений, было предложено исследование фигуры Меркурия с целью определить, насколько она отличается от сферы. (Задачу предложил сотрудник АО ХГУ Л. А. Акимов.) Поскольку наземные наблюдения Меркурия крайне затруднены влиянием земной атмосферы (Меркурий виден только на светлом небе и на небольшой высоте над горизонтом), о его форме в то время почти ничего не было известно, и даже существовала гипотеза, что Меркурий – это астероид неправильной формы. Для решения этой задачи предлагалось воспользоваться предстоящим прохождением Меркурия по диску Солнца 9 мая 1970 г. В этом случае Меркурий можно было видеть на большой высоте и фотографировать с мгновенной экспозицией, что существенно снижает влияние атмосферы. Было решено сделать большое количество снимков и при дальнейшей их обработке выполнить накопление сигнала, но путем суммирования не изображений, которые под влиянием атмосферы дрожат и деформируются, а их пространственных спектров (т. е. квадратов модулей их фурье-образов). Предполагалось выполнить преобразование Фурье с помощью когерентно-оптической установки, а суммирование спектров – фотографическим путем. Этот замысел родился до появления известной работы Лабейри [41].

9 мая 1970 г. была произведена съемка Меркурия на фоне диска Солнца. Чтобы застраховаться от плохой погоды и возможных технических неполадок, съемка велась из трех пунктов: ГАО АН УССР (г. Киев), АО ХГУ (пос. Граково) и Астрофизического института АН Узбекской ССР (г. Ташкент). Во всех трех пунктах съемка прошла удачно. Было накоплено большое количество первичного материала. Для его обработки требовалась когерентно-оптическая установка.

Первые эксперименты по освоению когерентно-оптической обработки изображений были проведены летом 1970 г. на АО ХГУ совместно сотрудниками ИРЭ АН УССР и АО ХГУ. Для фурье-преобразования использовался астрономический объектив диаметром 10 см. Были успешно получены пространственные спектры изображений Луны и ряд других результатов. К этому времени в ИРЭ АН УССР был сдан новый корпус (теперь это главный корпус) и работы были перенесены туда. Там был создан новый вариант установки с диаметром линз 30 см. Накопленный ранее опыт подсказал, как сделать установку с низким уровнем пространственного шума (см. разд. 11).

Обработка полученных изображений позволила лучше понять характер влияния атмосферных неоднородностей на астрономическое изображение. Однако чувствительность эксперимента к форме Меркурия оказалась ниже ожидаемой из-за фазовых искажений в подложке и эмульсионном слое фотопленки. Применение иммерсии позволило улучшить ситуацию, но искомый эффект остался по-прежнему за пределами чувствительности метода. Последующие исследования Меркурия с помощью космических аппаратов показали, что его форма очень мало отличается от сферы.

С точки зрения планетной астрономии это можно было бы считать неудачей. Хотя есть и другая формулировка, более привычная в научных кругах: было установлено, что отклонение фигуры Меркурия от сферы меньше погрешности эксперимента. Но результатом выполненной работы стало создание когерентно-оптической установки, пригодной для решения научных и практических задач, первой в Украине, одной из первых в СССР, с рекордно низким уровнем пространственного шума.

9. Когерентно-оптическая установка ИРЭ АН УССР. Первоначально установка была сделана по общеизвестной схеме [42] лишь с незначительными изменениями.

Световая волна, которую можно считать плоской и однородной в пределах фурье-преобразующей линзы, формировалась из волны на выходе газового лазера с помощью телескопической системы, состоящей из линзы малого диаметра и линзы большого диаметра.

Такая установка вполне способна нормально функционировать, однако обычно в ее схему вносят различные усовершенствования. Например, стремление сделать ее возможно более короткой (первые метры) приводит к необходимости применять фурье-преобразующие объективы большой светосилы; тогда для уменьшения aberrаций их приходится делать многолинзовыми. Именно по этому пути пошли разработчики в США и в ГОИ АН СССР. Когда в ИРЭ начинались первые исследования в этом направлении, об этих разработках ничего не было известно. Первый вариант установки давал слишком высокий пространственный шум. Тщательное исследование показало, что источником шума является рассеяние света на микроскопических пузырьках воздуха в линзе L_0 . Здесь играл роль малый диаметр светового пучка; при большом диаметре пучка эффект выражен слабее, поскольку поток рассеянного света усредняется по значительно большему числу центров, рассеивающих свет, и относительная флуктуация его интенсивности становится меньше.

Попытки найти линзы из стекла, содержащего меньше пузырьков воздуха, не увенчались успехом, поэтому было решено изменить схему так, чтобы исключить линзу L_0 , а большое сечение пучка получить за счет его естественного дифракционного расширения. Это сделало установку очень длинной (более 20 м), но резко снизило уровень пространственного шума. Другим важным источником пространственного шума было отражение света от оптических поверхностей, но поскольку мы не стремились создать компактную установку, лишних оптических поверхностей у нас не было. Третьим по важности источником шума была пыль, но борьба с ней требовала не столько каких-то особых конструктивных решений, сколько чистоты помещения и аккуратной работы. Еще одним заметным источником помехи был фазовый шум, вызванный флуктуациями оптической длины лучей из-за температурных флуктуаций показателя преломления лабораторного воздуха. Борьба с ним велась различными мерами по ограничению конвекции, в частности, путем заключения светового пучка в трубу.

Однако фазовые искажения возникали не только в оптических элементах установки и в окружающем воздухе, но и в транспарантах, и это сильно затрудняло работу. Чтобы свести этот эффект к минимуму, была применена иммерсия: транспарант погружался в жидкость с близким показателем преломления. Это требовало использования специальных кювет, приводило к увеличению числа оптических поверхностей, отражающих свет и потому способствующих увеличению пространственного шума.

Учет всех этих обстоятельств и соображений в конечном счете привел к схеме установки, приведенной на рис. 1 [26, 43]. Чтобы обеспечить возможность иммерсии транспарантов без специальных кювет, использовались надлежащим образом расположенные пары плосковыпуклых линз. Выходное зеркало лазерного резонатора S играло роль точечного источника света, а линза L_1 , в фокусе которой расположен этот источник, служила коллиматором: с его выхода на транспарант T_1 , помещенный между линзами L_1 и L_2 и залитый иммерсионной жидкостью, поступал первичный параллельный пучок света. Линзы L_2 и L_3 составляли первый фурье-преобразующий объектив; транспарант с исходным изображением T_1 был расположен в его передней фокальной плоскости, близкой к фокальной плоскости линзы L_3 , а в его задней фокальной плоскости, близкой к фокальной плоскости линзы L_2 , был расположен транспарант с частотным фильтром T_2 , также погруженный в иммерсионную жидкость между линзами L_3 и L_4 .

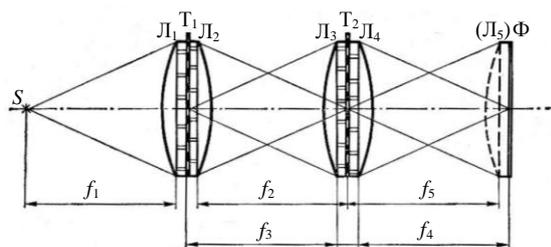


Рис. 1. Схема когерентно-оптической установки

Обратное преобразование Фурье осуществлялось аналогичным объективом, образованным линзами L_4 и L_5 , в задней фокальной плоскости которого помещалась регистрирующая фотопленка. Поскольку задняя фокальная плоскость этого объектива близка к плоской поверхности линзы L_5 , отсутствие в системе этой линзы изменило бы лишь фазу поля на пленке, а так как пленка регистрирует лишь интенсивность, а не фазу, отсутствие этой линзы вообще не будет ощущаться. В реальной установке линзы L_5 не было, поэтому на схеме она изображена пунктиром. При регистрации пространственных спектров изображений второй фурье-преобразующий объектив был не нужен; по уже изложенным соображениям он устранялся из установки вместе с линзой L_3 , а в фокальную плоскость линзы L_2 помещалась регистрирующая фотопленка.

Эта установка позволяла решать многие задачи линейной однородной фильтрации, в частности, восстанавливать замытые изображения. Малое число оптических поверхностей в оптическом тракте и применение иммерсии уменьшали рассеяние света, исключительно вредное при работе с когерентным светом, и позволяли получать изображения высокого качества. Например, с помощью этой установки удалось эффективно обработать некоторые изображения Луны с КА «Лунар – Орбитер», составленные из отдельных полос. После обработки изображение выглядело как единое целое.

10. Система цифровой обработки изображений ИРЭ АН УССР [44-46, 26]. Описание системы цифровой обработки изображений следует начать с напоминания о том, что дискуссия о целесообразности ее создания велась в 1970-1971 гг., когда эпоха микросхем в СССР по-настоящему еще не началась, а цифровая техника вызывала у многих специалистов по радиотехнике суеверный ужас. Были люди, которые горячо утверждали, что число схмотехнических элементов в устройстве вывода изображений не может быть меньше числа пикселей в выводимом изображении.

На фоне современного состояния вычислительной техники и компьютерной графики описываемая ниже система может показаться ко-

му-то попросту убогой. Но смотреть на нее свысока будет так же неблагородно, как и на кремневые инструменты древнего человека. К этому еще следует добавить, что когда работа начиналась, в Институте стоял мощный хор голосов, предрекавших неизбежный провал работы из-за ее огромной сложности.

Работа над системой начиналась в 1971 г. В этот год проводилась пробная разработка отдельных узлов устройства вывода изображений с целью уточнить представления о степени сложности предлагаемой работы. С самого начала 1972 г. работа выполнялась широким фронтом. Руководителем группы был А. А. Бабичев. В 1973 г. благодаря поддержке президента АН УССР Б. Е. Патона и сотрудника ЦК КПСС И. В. Илларионова группой была получена новейшая ЭВМ ЕС 1020, только что запущенная в производство (архитектура *IBM/360*, 30 тыс. операций в секунду, 4-6 тыс. операций с плавающей точкой в секунду, цена полного комплекта 900 тыс. руб., цена центрального процессора с памятью 64 Кб – 600 тыс. руб.). С этого времени началось создание системы в ее окончательном виде. Большой вклад на этом этапе работы внес сотрудник ГАО АН УССР В. Г. Парусимов.

Система состояла из центрального процессора ЕС 2020 с памятью 64 Кб, а позже 128 Кб, двух дисковых накопителей завода ИЗОТ (Болгария) ЕС 5052 (по 7,25 Мб) с контроллером ЕС 5551М, двух накопителей на магнитной ленте ЕС 5012 (тоже ИЗОТ, по 20 Мб) с контроллером ЕС 5525 и пишущей машинки «Консул». Это были серийные устройства. Кроме того, в систему входили уникальные устройства нашей собственной разработки: электронное устройство ввода-вывода монохромных и цветных изображений (главный разработчик Н. К. Заец), текстовый монитор (32×64 символа на экране, произвольный набор символов, определяемый кодовой таблицей, хранящейся в оперативной памяти машины) и полутоновый монитор (1024×1024 элемента, 256 уровней серого). Позже к ним добавились механические устройства ввода и вывода монохромных изображений на базе фототелеграфного аппарата «Нева» (С. А. Каныгин). Контроллер специализированных внешних устройств разрабатывался при участии В. Г. Парусимова. В создании аппаратуры участвовали Н. Попов, Е. В. Здор, И. Г. Скуратовский. Большой вклад во все разработки внес руководитель группы А. А. Бабичев. Большой творческий вклад в конструирование аппаратуры внес механик Н. Ф. Усачев. Добиться надежной работы машины очень помогла нам работавшая бесплатно Наталья Елькевич, в дальнейшем машину обслуживали Л. В. Еленский, а позже В. Г. Епифанов.

Общий вес аппаратуры, входящей в систему, составлял около 5 т, из них серийные устройства машины составляли около 4 т.

К лету 1975 г. аппаратная часть системы была в основном готова, и надлежало приступить к решению первой задачи, которая уже была поставлена перед группой: обработка изображений Марса, которые как раз начали поступать с АМС «Марс-4» и «Марс-5». Никакого программного обеспечения в это время еще не было: к его созданию только предстояло приступить. Все же зимой 1976 г. обработка изображений Марса уже шла полным ходом. Основным исполнителем этой работы был В. Г. Парусимов.

Этому предшествовало создание программного обеспечения, причем не только прикладного, но и системного. Комплект серийного оборудования у нас был неполным и потому недостаточным для организации работы машины под управлением стандартной операционной системы. Но это было не главным. Мы уже понимали, какой большой путь надо пройти сквозь дебри универсального программного обеспечения, чтобы дойти до конкретных задач, которые нам надлежит решать. Более поздний опыт работы с операционной системой ОС-6 подтвердил наши представления: машина заказчика ЕС 1033 (150 тыс. операций в секунду) под управлением ОС-6 иногда работала медленнее, чем у нас ЕС 1020 под управлением нашей самодельной операционной системы. При управлении аппаратурой в реальном масштабе времени это иногда приводило к полному нарушению ее работы и необходимости переделки ее под более слабую машину. К пониманию того, что операционная система для широкого потребления – это не только благо, но иногда и тормоз прогресса, и даже мина замедленного действия, приходили многие, но достаточно сослаться на книгу В. Кулакова [47].

Конечно, за принятое решение нам приходилось и платить. Например, мы не могли воспользоваться стандартными трансляторами, даже ассемблером, и приходилось писать программы прямо в коде машины. Только позже удалось сделать свой ассемблер, имеющий некоторые преимущества перед общепринятыми. Но этот опыт показал, что программирование на низком уровне воспитывает у программиста чувство ответственности за принимаемые решения.

В создание программного обеспечения большой вклад внесли В. Г. Парусимов, Д. Г. Станкевич, И. А. Дулова и Л. В. Еленский.

Модифицированные варианты нашей системы цифровой обработки изображений с использованием более мощных ЭВМ под управлением ОС-6 и СВМ (Система Виртуальных Машин) были созданы в рамках хозяйственных ра-

бот для организаций Министерств радио промышленности и общего машиностроения.

С уходом в прошлое машин Единой Системы ушла вместе с ними и наша операционная система. Но прошло время, и ее наивная простота выплыла из памяти и вдохновила сотрудников на новую разработку, описанную в разд. 19.

11. Теоретические исследования по обработке изображений в ИРЭ АН УССР.

Первые теоретические исследования по обработке изображений в ИРЭ АН УССР были начаты в 1969 г. и касались определения рельефа участка поверхности планеты по его изображениям. В конце 1960-х гг. в Лаборатории сравнительной планетологии Института космических исследований АН СССР под руководством К. П. Флоренского велись исследования по кратерной статистике на Луне. Результаты этих исследований должны были существенно расширить представления о геологической истории Луны. Для исследования использовались изображения поверхности Луны, полученные американским космическим аппаратом «Лунар – Орбитер». Предстояло обработать обширный материал, проанализировав каждый изображенный на снимках кратер. Это требовало очень большого объема работы, и возник вопрос о возможности ее автоматизации. Исследование этого вопроса было поручено АО ХГУ, где оно проводилось преимущественно Л. А. Акимовым в рамках хозяйственной темы, выполнявшейся под руководством академика АН УССР Н. П. Барабашова. В рамках этой темы была выполнена работа [48], в которой был проанализирован ряд существовавших в то время возможностей аналоговой обработки изображений и подчеркивалось, что единственное радикальное решение задачи можно найти только на пути применения цифровой обработки изображений. В этой же работе была проанализирована степень сложности задачи распознавания кратеров на Луне и было предложено в качестве первого шага при анализе изображений определение рельефа исследуемой поверхности по имеющимся ее изображениям.

Эта работа послужила толчком для развития исследований по восстановлению рельефа и автоматическому анализу его форм. Первые исследования проводились совместно с сотрудником ГАО АН УССР В. Г. Парусимовым. К тому времени в ГАО под руководством И. К. Коваля при участии Л. Р. Лисиной [49] уже велись исследования рельефа отдельных районов Луны по наземным снимкам. Для восстановления рельефа использовался метод ван Диггелена [50]. Однако две проблемы затрудняли работу. Практическая проблема состояла в том, что фотометрирование изображений приходилось выполнять вручную, что требовало огромного объема рутинной рабо-

ты. Принципиальная проблема состояла в том, что метод ван Диггелена давал результаты, неустойчивые к погрешностям фотометрии.

Для решения первой проблемы В. Г. Парусимов при поддержке директора ГАО АН УССР И. К. Коваля начал разработку автоматического цифрового двухкоординатного микрофотометра АЦМФ-ХУ.

Вторая проблема потребовала детального анализа математической стороны метода ван Диггелена и привела к появлению работы [51], в которой была показана некорректность метода ван Диггелена и предложен путь ее преодоления на основе статистического подхода к фильтрации изображений (см. разд. 6).

Следующая работа этого цикла [52] была посвящена поиску формальной процедуры распознавания форм рельефа на Луне. Ее результатом стал алгоритм распознавания, основанный на анализе матрицы вторых производных высоты по координатам.

Статистический подход к фильтрации изображений развивался и в других направлениях:

- обобщение винеровского фильтра на случай, когда сигнал и шум являются реализациями слабо нестационарных процессов;

- фильтрация сигналов, принадлежащих конечномерному пространству, в частности, в случае квантового шума [53].

Сюда относятся и прикладные задачи определения параметров траектории объекта по серии изображений с изменяющейся проекцией и аналогичные задачи для потока таких объектов.

Важное место в этих исследованиях всегда занимали задачи преодоления мешающего влияния атмосферы при наземных наблюдениях. Об этом говорится в разд. 16.

12. Алгоритмы цифровой обработки изображений. Для решения практических задач необходимо иметь между теорией и техническими средствами обработки изображений промежуточное звено – комплекс алгоритмов, основанных на имеющихся теоретических посылах и ориентированных на реализацию с помощью имеющихся технических средств. Первые результаты в этом направлении были описаны в работах [44, 45, 26]. Ниже приводятся примеры таких алгоритмов.

1. *Линейная однородная фильтрация с помощью преобразования Фурье.* Преобразование заданного изображения линейным однородным оператором.

2. *Представление изображения в условных цветах.* Для подчеркивания слабых контрастов яркости в исходном изображении путем перевода их в контрасты цвета, а также для построения цветных схем и карт.

3. *Подавление локальных помех.* Устранение отдельных локальных дефектов, вызванных воздействием помехи, значительно превышающей сигнал.

4. *Сглаживание.* (Подавление мелких деталей в кадре.) Линейная фильтрация исходного изображения сглаживающим фильтром с заданной частотной характеристикой.

5. *Подавление нижних пространственных частот.* Частичное подавление нижних пространственных частот с целью повышения контраста мелких деталей.

6. *Выравнивание яркости.* Уменьшение диапазона яркостей одновременно с повышением контраста деталей. Производится фильтрация поля логарифмов яркостей в соответствии с алгоритмом 5.

7. *Гамма-коррекция.* Изменение коэффициента контрастности изображения, исправление характеристики тракта. Выполняется поэлементное функциональное преобразование кадра с заданной передаточной характеристикой.

8. *Одномерная свертка.* Линейная однородная фильтрация в специальных случаях. Непосредственно в координатном представлении вычисляется одномерная построчная свертка изображения с заданной таблицей ядра.

9. *Двумерная свертка.* Линейная однородная фильтрация в специальных случаях, когда ядро $K(x, y)$ может быть представлено в виде произведения $X(x)Y(y)$.

10. *Прямая двумерная свертка.* (Линейная однородная фильтрация в случае малого радиуса ядра.) Непосредственно вычисляется двумерная свертка.

11. *Трансформация.* Преобразование изображений к другой проекции.

12. *Фильтрация с плавающим порогом.* Подавление локальных помех в случае, когда амплитуда помехи меньше изменения сигнала. Для обнаружения помехи используется изображение, в котором подавлены нижние частоты.

13. *Предварительная оценка параметров движущегося точечного объекта по последовательности его изображений.* Для предварительного определения параметров траектории с точностью, при которой они могут быть использованы в качестве исходных данных для алгоритма 14.

14. *Уточнение параметров траектории движущегося объекта по последовательности его изображений.* Для уточнения параметров траектории движущегося объекта, предварительно определенных с помощью алгоритма 13.

15. *Совмещение изображений.* Для последующей совместной обработки.

16. *Быстрое совмещение изображений.* Для получения исходного приближения, используемого в предыдущем алгоритме.

17. *Грубое совмещение изображений.* Для получения исходного приближения в случае, когда исходные изображения имеют большой формат.

18. *Вычисление рельефа поверхности по полю наклонов.* Поле наклонов может быть получено по данным фотометрии или радиолокации.

19. *Классификация областей.* Подготовка данных для распознавания специфических образований рельефа топологическими методами. Этот алгоритм может быть полезен и вне связи с исследованием рельефа.

20. *Интерполяция изображения с малым числом уровней квантования.* Уровни считаются расположенными через равные интервалы яркости.

21. *Бигармоническая интерполяция карты.* Бигармоническая интерполяция функции, заданной на системе изолиний.

22. *Билинейная интерполяция карты.* Для подготовки исходного приближения, используемого в предыдущем алгоритме.

23. *Построения двумерной гистограммы.* Для анализа статистической связи между двумя изображениями.

24. *Выделение кластеров на двумерной гистограмме.* В практических задачах определение кластера обычно не бывает строгим. Поэтому полученный с помощью этого алгоритма результат нуждается в дополнительном анализе и, возможно, коррекции.

25. *Построение карты классов.* Для представления в виде карты результатов анализа связи между значениями величин, представленных двумя изображениями.

25. *Синтез изображения поверхности по ее рельефу.* Для моделирования изображения поверхности, имеющей заданный рельеф.

27. *Синтез изображения молекулы по ее структуре, заданной координатами атомов.* Представляет интерес при неформальном анализе сложных пространственных соотношений между взаимодействующими макромолекулами биополимеров.

28. *Построение стереопары.* Строится пара изображений с направлениями на наблюдателя, образующими угол 0,1-1 рад в плоскости, параллельной строкам изображения.

Следующие алгоритмы являются примерами топологических операций над изображениями.

29. *Пополнение множества соседними элементами.* Этот алгоритм, в частности, полезен при подготовке исходных данных для алгоритма подавления локальных помех.

30. *Пополнение области соседними элементами.* Алгоритм, аналогичный предыдущему для случая, когда в кадре выделено несколько непересекающихся множеств.

13. Применение системы цифровой обработки изображений в научных исследованиях. Созданная в ИРЭ система цифровой обработки изображений открывала принципиально новые возможности для исследований в самых разных областях науки, где приходится иметь дело с изображениями. Но для ее практического использования требовалось тесное взаимодействие специалистов по обработке изображений со специалистами в соответствующей области науки. Это ставило перед участником такой кооперации трудную задачу проникновения в область компетенции его компаньонов и временами затрудняло взаимодействие. Все же удалось выполнить ряд предварительных исследований совместно с кардиологами, работавшими под руководством Л. Т. Малой (по анализу изображений кровеносных сосудов), по обработке дефектоскопических рентгенограмм для Института электросварки им. Е. О. Патона, по обработке медицинских рентгенограмм для Института ортопедии и травматологии им. М. И. Ситенко, по обработке изображений планет, замкнутых земной атмосферой. Особенно успешным было взаимодействие с харьковскими и московскими планетологами (Астрономическая обсерватория ХГУ, Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского АН СССР и Центральный научно-исследовательский институт геодезии, аэрофотосъемки и картографии) по исследованию Луны и Венеры. Историю и результаты исследований, выполненных совместно с ними, можно найти в работах [54-72].

14. Прикладные исследования по обработке изображений в ИРЭ АН УССР. В 1974 г. началось хоздоговорное сотрудничество нашей группы с ЦНИИ «Комета» [73] (Министерство радиопромышленности), который возглавлял Анатолий Иванович Савин [74]. В нашу задачу входило создание системы цифровой обработки изображений на базе ЭВМ ЕС 1033, разработка теории и алгоритмов, создание комплекса программ, реализующих эти алгоритмы и предназначенных для работы в среде операционной системы ОС-6 (аналог OS/360). «Комета» оказывала нам большую поддержку, снабжая нас труднодоступными материалами, комплектующими, а иногда и станками. В 1980 г. работа была завершена и успешно сдана. Наша система проработала там много лет. Взаимодействие с «Кометой» оставило у нас теплые воспоминания.

В 1981-1982 гг. путем компьютерного моделирования выполнялось исследование влияния параметров телевизионного сигнала на распознаваемость морских объектов, наблюдаемых из космоса.

В 1981-1985 гг. была создана система цифровой обработки изображений на основе

ЭВМ ЕС 1061 для одной из организаций Министерства общего машиностроения.

В 1986-1987 гг. для той же организации выполнялась работа по усовершенствованию программ управления системой.

После этого с той же организацией велись переговоры о значительном расширении фронта этих работ, однако приближалась историческая эпоха, неблагоприятная для этих исследований.

Последняя тема, которую можно отнести как к прикладным, так и к фундаментальным, по нейрокомпьютерам, была основана на широкой межведомственной кооперации (ИРЭ, ХАИ, Институт кибернетики АН УССР, Центр подготовки космонавтов, ГАО АН УССР, МВО СССР и т. д.) и имела хорошее госбюджетное финансирование. Она была начата в 1990 г. и вскоре прекращена из-за развала СССР.

15. Определение рельефа и радиооптических характеристик поверхности планеты по ее изображениям. Этот и следующий разделы посвящены исследованиям по обработке изображений, выполняемым в ИРЭ НАНУ последние годы. Это, главным образом, развитие фотометрического метода определения рельефа участка поверхности планеты по его оптическим или радиолокационным изображениям и развитие методов преодоления мешающего влияния атмосферных неоднородностей на разрешающую способность астрономических инструментов.

Возможность определения рельефа участка поверхности по серии его изображений методом ван Диггелена (упомянутым в разд. 11) основана на зависимости видимой яркости элемента поверхности от его ориентации при фиксированных направлениях освещения и наблюдения. Это позволяет, зная фотометрические свойства поверхности, определить по двум изображениям поле наклонов, а затем, интегрируя поле наклонов, найти рельеф. Идея этого метода была изложена в работе [50].

Недостатком метода ван Диггелена является то, что он хорошо работает только в отсутствие шума. При наличии шума проявляется некорректность задачи определения рельефа по полю наклонов: измеренное поле наклонов из-за присутствия шумовой добавки имеет ненулевой ротор и потому не является градиентом никакого рельефа. На это было указано в работе [51], в которой был предложен корректный статистический подход к этой задаче, приводящий в простейшем случае к уравнению Пуассона для искомого рельефа. В этой работе заданным считается поле наклонов; вопрос об отыскании поля наклонов по исходным изображениям оставлен в стороне. Между тем, решение этой задачи требует знания оптических (радиооптических) парамет-

ров исследуемой поверхности, которые могут быть неизвестны. Более того, эти параметры могут зависеть от координат, причем неизвестным образом. Поэтому была необходима новая, более общая постановка задачи, в которую входило бы и одновременное определение оптических параметров как функций координат. С другой стороны, если исследователя интересуют только оптические характеристики поверхности и не интересует рельеф, он все равно вынужден его учитывать, так как яркость элемента поверхности, по которой определяются его оптические характеристики, зависит не только от них, но и от его ориентации, т. е. в конечном счете от рельефа. Если рельеф исследуемого участка заранее не известен, его надо определять вместе с оптическими параметрами.

В общем виде задача была поставлена и решена в работе [75], где требуется найти рельеф поверхности и зависимость ее фотометрических параметров от координат по достаточному количеству исходных изображений. При этом изображения не обязательно совмещены и могут быть замыты известным ядром (каждое своим). Погрешности этого метода исследованы в работе [76], а практическая проверка метода на компьютерной модели выполнена в работах [77-81].

Метод, описанный в работе [75], будучи основанным на статистическом подходе, пригоден как при избытке, так и при недостатке экспериментальных данных. В последнем случае недостаток восполняется априорной информацией, содержащейся в априорном распределении рельефа и фотометрических параметров. Этот момент в последнее время начал становиться актуальным, так как планирование космических экспериментов часто проводится без заботы о том, как будут обрабатываться полученные изображения; в частности, рельеф часто приходится определять по единственному изображению. В связи с этим была выполнена работа [77], в которой более детально рассмотрена задача определения наиболее вероятного рельефа по единственному снимку и результат проверен экспериментально на компьютерной модели.

Использование компьютерной модели для практической проверки метода не только упрощает задачу, но и делает получаемый результат более достоверным. Это происходит потому, что рельеф, который должен получиться в идеальном случае, при этом заранее известен и может быть использован для сравнения с фактически полученным рельефом.

Тем не менее, многие специалисты считают метод прошедшим окончательную проверку только тогда, когда он успешно применен к реальным экспериментальным данным. Поэтому данному вопросу посвящена статья [81], в кото-

рой помимо модельных экспериментов приводятся результаты определения рельефа участков поверхности Марса по одиночным изображениям, полученным американским космическим аппаратом «*Mars Express*». Получено хорошее согласие с данными альтиметрии.

16. Проблема видения сквозь турбулентную атмосферу. Случайные неоднородности показателя преломления в среде распространения порождают искажения фазового фронта волны, приходящей от наблюдаемого объекта. Это приводит к потере разрешающей способности инструмента, в частности, при наблюдении естественных или искусственных заатмосферных объектов. Теоретический анализ функционирования телескопа при наблюдении сквозь среду, создающую фазовые искажения [82], показывает, что в этом случае мгновенное изображение объекта в фокальной плоскости телескопа оказывается сверткой истинного изображения объекта с атмосферно-апертурным ядром, которое, в свою очередь, является сверткой дифракционного ядра телескопа (определяемого его апертурой) с атмосферным ядром, которое определяется мгновенным состоянием атмосферы. Атмосферное ядро случайным образом изменяется со временем; это изменение характеризуют «временем замороженности» атмосферы, в течение которого изменением ядра можно пренебречь. Всякая регистрация изображения требует времени, которое называют временем экспозиции; зарегистрированное изображение оказывается результатом усреднения изображения по времени экспозиции. Если время экспозиции меньше времени замороженности атмосферы, зарегистрированное изображение можно считать мгновенным. В остальных случаях оно отличается от мгновенного изображения, причем в худшую сторону.

Таким образом, изображение, зарегистрированное в фокальной плоскости телескопа, подвержено действию двух искажающих факторов: регулярного, обусловленного ограничением его пространственного спектра апертурой телескопа, и случайного, т. е. шума. Шум включает в себя по меньшей мере три составляющих:

- атмосферный шум, искажающий фазы фурье-компонент изображения;
- шум панорамного светоприемника или радиоприемника;
- квантовые флуктуации светового потока.

Первая составляющая шума является мультипликативной (в плоскости пространственных частот), вторая обычно является аддитивной, а третья имеет сложный характер, определяемый свойствами пуассоновского процесса (каковым является процесс регистрации слабого некогерентного потока электромагнитной энергии). При достаточно большой интенсивности сигнала

квантовый шум тоже является приближенно аддитивным.

Усреднение атмосферного ядра по времени экспозиции приводит к значительному подавлению высших пространственных частот и существенному снижению разрешающей способности телескопа [82]: атмосфера порождает как шум, так и регулярное искажение спектра изображения. Это искажение, в принципе, можно устранить пространственной фильтрацией изображения [4]; в случае аддитивного гауссова шума регистрации оптимальным является винеровский фильтр [5]; однако при реальных значениях отношения сигнал – шум достижимое после фильтрации разрешение значительно ниже дифракционного предела.

Борьба с шумом, если нет возможности устранить его, ведется путем накопления сигнала. Обычное усреднение регистрируемого изображения по времени является оптимальным накоплением сигнала в случае аддитивного шума. Однако это не относится к мультипликативному шуму. В случае мультипликативного шума оптимальное накопление сигнала состоит в геометрическом усреднении сигнала, т. е. в интегрировании по времени его логарифма (в данном случае логарифмов фурье-компонент изображения) [83]. Для случая чисто фазового шума такое накопление было предложено в работе [84].

Аддитивное накопление сигнала осуществляется легко: для этого просто надо получать изображение объекта с длительной экспозицией. Однако оно приводит к резкому снижению разрешающей способности системы телескоп – атмосфера.

Было предложено много идей, как исключить или ослабить это влияние, применяя другие способы накопления сигнала. В ИРЭ исследование этого вопроса велось с самого начала работ по обработке изображений. Самая первая задача, с которой начинались исследования по обработке изображений в ИРЭ (см. разд. 11), тоже относилась к этому классу. При ее решении фактически использовался метод спекл-интерферометрии еще до того, как он был предложен в работе [41] и стал называться методом Лабейри.

Этот метод основан на другом способе накопления сигнала: вместо получения изображения с длительной экспозицией регистрируют большую серию короткоэкспозиционных изображений. Обработывая эту последовательность, находят энергетический спектр (квадрат модуля его фурье-образа) вплоть до дифракционной границы полосы пропускания телескопа. Однозначно восстановить изображение объекта по его спектру в общем случае нельзя, так как приписывая фазам фурье-компонент произвольные значения, мы получим каждый раз новое изображение.

Тем не менее, существует возможность однозначно реконструировать изображение по его спектру, используя априорную информацию об объекте. В частности, в работе [85], а позже в [86] было показано, что для этого достаточно, чтобы объект имел конечную протяженность.

В работе [85] был предложен итерационный алгоритм реконструкции изображения по спектру и показано, что процесс будет сходиться, если исходное приближение выбрано с достаточно малой погрешностью. Однако при произвольном выборе начального приближения сходимость не гарантируется. Компьютерные эксперименты, описанные в работе [87], подтверждают хорошую сходимость процесса к правильному результату при малой начальной погрешности и возможность захвата процесса в «ловушки» (т. е. сходимость к неправильному результату) при произвольном выборе начального приближения. Эти эксперименты требовали больших затрат машинного времени, из-за чего их в то время пришлось прекратить. Нынешние возможности вычислительной техники позволили возобновить эти исследования на новом уровне [88].

Спекл-интерферометрия не является оптимальным накоплением сигнала, поскольку не использует содержащуюся в последовательности изображений информацию о фазах фурье-компонент изображения. Таким образом, возможности традиционного телескопа еще не исчерпаны, и следует искать новые, более совершенные способы извлечения информации об объекте из последовательности изображений, получаемых с помощью традиционного телескопа. В то же время задачу видения сквозь турбулентную атмосферу следует ставить шире, а именно как задачу максимального извлечения информации об объекте из поля приходящей от него волны. Это означает, что, помимо поиска новых способов обработки изображений, получаемых старым способом с помощью традиционного телескопа, следует искать новые способы формирования изображений, более эффективные при наблюдении сквозь среду с фазовыми искажениями.

Такие исследования велись в ИРЭ НАНУ. Некоторые соображения и результаты изложены в следующих разделах.

17. Пространственное накопление сигнала. В силу теоремы ван Циттерта – Цернике взаимная интенсивность поля волны, приходящей от объекта, для пары точек \vec{r}_1, \vec{r}_2 в плоскости наблюдателя

$$K \langle \vec{r}_1, \vec{r}_2 \rangle = \langle E \langle \vec{r}_1 \rangle E \langle \vec{r}_2 \rangle \rangle \quad (6)$$

при распространении волны в свободном пространстве зависит только от

$$\vec{c} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1, \quad (7)$$

не зависит при фиксированном \vec{c} от положения этой пары точек в плоскости наблюдателя и равна значению фурье-образа распределения яркости по объекту для пространственной частоты \vec{c} . Здесь E – напряженность поля в этих точках, а треугольные скобки означают усреднение по ансамблю.

Поскольку поле в задней фокальной плоскости телескопа является фурье-образом поля в передней фокальной плоскости, это приводит к тому, что распределение интенсивности в задней фокальной плоскости телескопа оказывается перевернутым изображением объекта. Рассматривая с этой точки зрения отдельную фурье-компоненту этого изображения, мы увидим, что ее можно записать в виде интеграла [82]

$$I(\vec{c}) = \int A(\vec{c} - \vec{c}') I_0(\vec{c}') dS_{c'}, \quad (8)$$

где $A(\vec{c})$ – апертурная функция телескопа, равная единице внутри апертуры и нулю за ее пределами, $I(\vec{c})$ – фурье-образ истинного изображения, а $dS_{c'}$ – элемент площади апертуры в окрестности точки \vec{c}' . Это значит, что передача телескопом этой фурье-компоненты изображения состоит в суммировании вкладов всех пар элементов площади апертуры, расположенных так, что соединяющий их вектор равен \vec{c} (рис. 2). При отсутствии фазовых искажений все эти пары вносят один и тот же вклад (в силу теоремы ван Циттерта – Цернике), поэтому суммарный вклад просто равен фурье-компоненте истинного изображения, умноженной на площадь области, заштрихованной на рис. 2. Это определяет частотную характеристику телескопа, плавно убывающую с ростом $|\vec{c}|$ и достигающую нуля при $|\vec{c}|$, равном диаметру телескопа.

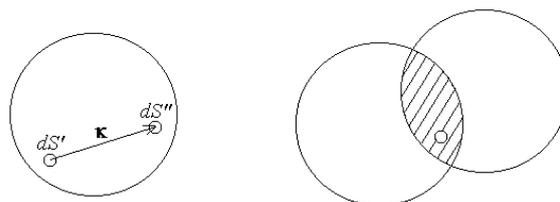


Рис. 2. Передача фурье-компоненты $\tilde{I}(\vec{c})$ парой элементов площади апертуры dS' и dS'' . Площадь заштрихованной области является мерой множества точек апертуры, участвующих в передаче этой фурье-компоненты

По аналогии с интегрированием сигнала по времени такое интегрирование взаимной интенсивности по площади можно рассматривать как пространственное накопление сигнала [83, 89, 82]. Его аддитивность физически присуща принципу действия телескопа. В присутствии адди-

тивного шума такое накопление является оптимальным. Иначе обстоит дело при наличии случайных фазовых искажений, даже в отсутствие шума регистрации. Как уже было сказано, в этом случае аддитивное накопление не является оптимальным, так как приводит к подавлению высоких пространственных частот даже для мгновенных изображений [82].

Возникает вопрос: как осуществить в этом случае более эффективное накопление сигнала? Идею подсказывает аналогия со спеклинтерферометрией. В ней эффект достигается разделением одной длительной экспозиции на множество коротких, практически мгновенных. Аналогично можно поступить и при пространственном накоплении сигнала, разделив одну большую апертуру на множество субапертур, достаточно малых, чтобы в пределах каждой из них можно было пренебречь зависимостью величины фазового искажения от координат. Обозначая номера субапертур латинскими буквами, а номера фурье-компонент неискаженного изображения объекта – греческими, влияние фазовых искажений в среде на фазы взаимной интенсивности поля можно выразить соотношением

$$\varphi_\nu + \delta_j - \delta_i = \psi_\mu, \quad (9)$$

где φ_ν – фаза ν -й фурье-компоненты; δ_i и δ_j – фазовые искажения на i -й и j -й субапертурах; ψ_μ – результат μ -го измерения функции когерентности, выполняемого с помощью i -й и j -й субапертур.

Совокупность таких соотношений для всех пар субапертур можно рассматривать как систему уравнений, определяющую истинные фазы фурье-компонент изображения через измеренные значения фаз функции когерентности, искаженные атмосферой. Эта система оказывается переопределенной, и при наличии шума регистрации с вероятностью единица не имеет решения, однако метод наименьших квадратов позволяет найти квазирешение, которое является оптимальной статистической оценкой совокупности фаз фурье-компонент изображения. Их модули можно успешно определить методом спеклинтерферометрии.

Это и есть процедура оптимального пространственного накопления сигнала при одновременном наличии как атмосферного фазового шума, так и аддитивного шума регистрации. Ее можно выполнить при постдетекторной обработке сигнала. Остается, однако, вопрос, как практически осуществить прием сигнала, позволяющий реализовать эту процедуру накопления.

Первая идея в этом направлении была высказана в работе [90], где для формирования изображения телескопом было предложено ис-

пользование системы безыбыточных апертурных масок. Будучи безупречной в принципиальном отношении, она имела практические несовершенства и в [91] был предложен ее улучшенный вариант. Однако и в таком виде этот метод формирования изображения остается неоптимальным, так как позволяет получить не все уравнения системы (9). Это снижает избыточность системы уравнений (9), в результате чего информация об объекте, содержащаяся в поле приходящей от него волны, будет использована не полностью. Чтобы решить этот вопрос радикально, требуется принципиально новая оптическая схема. Она была предложена в работе [83] и почти одновременно, но все же несколько позже, в [92], а подробно эта идея изложена в [89]. Ее можно рассматривать как дальнейшее развитие идеи звездного интерферометра Майкельсона [93]. Этому посвящен следующий раздел.

18. Применение многолучевого интерферометра. Новый подход к этой задаче состоит в обобщении идеи звездного интерферометра Майкельсона. Его апертура состоит только из двух субапертур. Вектор их относительного смещения определяет центральную частоту того единственного частотного окна, которое передается этим интерферометром. Чтобы увеличить вектор смещения d_{12} за пределы диаметра телескопа, Майкельсон применял перископическую систему. Аналогичная система может быть применена и в многолучевом интерферометре, но с другой целью: чтобы изменить вектор смещения между субапертурами и сделать его на выходе перископической системы отличным от всех уже имеющихся значений. С технической точки зрения такое преобразование апертуры удобнее делать в выходном зрачке телескопа. После такой перестановки субапертур изображение, сформированное вторичным объективом, уже не будет изображением объекта в обычном смысле, а будет представлять собой интерферограмму, в которой каждой паре первичных субапертур будет соответствовать своя пространственная частота, отличная от порождаемых другими парами. Разделяя эту интерферограмму на фурье-компоненты при дальнейшей обработке, мы получим значения функции когерентности для каждой пары первичных субапертур отдельно. Это позволяет полностью записать систему уравнений (9) и найти из нее невозмущенные атмосферой значения фаз фурье-компонент изображения. В работах [83, 89] атмосфера предполагается изопланатичной. В работе [94] показано, что этот метод может быть осуществлен и при слабой неизопланатичности атмосферы. В работах [89, 95] указано на возможность устранять этим способом влияние не только атмосферы, но и аберраций оптики. В работе [96] указано на целесообразность приме-

нения интерферометрических телескопов в космосе, несмотря на отсутствие атмосферы, для исключения фазовых искажений, возникающих из-за вибрации и температурной деформации оптики. В работе [95] предложено строить многозеркальные телескопы по принципу многолучевого интерферометра. В работе [97] указано на целесообразность сочетать адаптивную оптику с интерферометрическим принципом формирования изображения.

В связи с новым способом формирования астрономических изображений возникает ряд вопросов, на которые необходимо дать ответ, прежде чем пытаться осуществить его на практике. Они касаются, в основном, существования и способов отыскания необходимых конфигураций апертуры, оптимального выбора конфигураций и устойчивости метода к влиянию атмосферы в присутствии шума регистрации. Исследования, выполненные в ИРЭ в течение последних лет, дают ответ на эти вопросы.

Существование конфигураций входной апертуры, обеспечивающих определенность системы уравнений (9), показано в работах [98-100]. В статьях [101, 102] и монографиях [103, 104] излагаются регулярные методы синтеза конфигураций входной и выходной апертур интерферометра. В работах [105-107] для этого предлагается метод случайного поиска и приводятся результаты его применения.

Выработаны критерии оптимального выбора конфигураций: для входной апертуры – по различным информационным характеристикам, прежде всего, по жесткости [108] и скалярной информативности [109, 110]; для выходной апертуры следует стремиться к минимальным размерам апертуры при заданном числе элементов [105]. В работе [111] теоретически установлена высокая информационная эффективность такого интерферометра: показано, что информативность (по Фишеру) наблюдения с помощью интерферометра в присутствии атмосферы для типичной конфигурации составляет 90-99 % от его информативности в отсутствие атмосферы. В работах [112, 96, 113] высокая устойчивость интерферометра к атмосферным искажениям подтверждена путем компьютерного моделирования (см. разд. 19).

Еще большего эффекта можно достичь, сочетая адаптивную оптику с интерферометрическим принципом формирования изображений. Применять адаптивную оптику в наблюдательной астрономии для компенсации фазовых искажений в атмосфере было предложено в 1953 г. [114]. Но, согласно легенде, она была успешно применена Архимедом на практике в целях обороны еще в конце III в. до н. э. При создании адаптивного телескопа приходится решать сложную задачу

оперативной диагностики текущего состояния атмосферы на пути лучей от объекта к телескопу за время порядка десятков миллисекунд [115]. Задача оптимальной обработки астрономического сигнала теперь дополняется такой же задачей для вспомогательного, диагностического сигнала.

Диагностику атмосферы можно осуществить с помощью описанного выше многолучевого интерферометра. Его применение для этой цели может быть двояким. Один вариант состоит в том, чтобы измерять с его помощью фазовые искажения вспомогательной волны, предназначенной для зондирования атмосферы [116]. При этом изображение исследуемого объекта строится телескопом с обычной оптической схемой, но с гибкими оптическими поверхностями управляемой формы. Второй вариант может состоять в том, чтобы строить интерферограмму объекта с помощью многолучевого интерферометра (или многозеркального интерферометрического телескопа [95]), обрабатывать ее в реальном времени и найденные при этом значения фазовых искажений (непосредственно для волны, приходящей от объекта!) использовать для управления оптической поверхностью.

Первый вариант сложнее и ненадежнее, но он пригоден при как угодно слабом сигнале от объекта. Второй вариант намного предпочтительнее при достаточно сильном световом потоке от объекта. Однако когда световой поток оказывается настолько слабым, что за время экспозиции от объекта приходит лишь несколько фотонов, эффективная реконструкция изображения объекта по одной экспозиции становится затруднительной, а затем и невозможной. Тогда этот вариант становится неприменимым.

Возникает вопрос: а существует ли вообще какая-нибудь возможность накопить сигнал и реконструировать по нему изображение объекта при таком слабом световом потоке? Положительный ответ на этот вопрос дан в работе [83].

19. Программная система для моделирования, связанного с формированием и обработкой изображений. Опыт создания простейшей операционной системы, ориентированной на определенный класс научных задач (см. разд. 10), оказался полезным много лет спустя, когда потребовалась программная система для компьютерного моделирования объектов, устройств и методов, с которыми приходится иметь дело в астрономии и при исследовании космоса (например, поверхность планеты, ее изображения, полученные с помощью радиолокатора с синтезированной апертурой, и метод определения рельефа поверхности по этим изображениям).

Компьютерное моделирование сегодня является важным инструментом научных исследований. В частности, оно приносит большую

пользу в исследованиях по формированию и обработке изображений.

Разработка алгоритма требует на определенном этапе обстоятельного исследования его эффективности, надежности и т. д., что требует многократного применения его к различным наборам исходных данных. Эти данные часто получают в сложных условиях путем весьма дорогостоящих экспериментов. Но работа с реальными данными еще больше осложняется тем, что приходится решать задачу с двумя неизвестными: свойства объекта и свойства алгоритма. Было бы намного лучше разделить эту задачу на две:

- исследование объекта с применением уже хорошо исследованного алгоритма;
- исследование алгоритма путем применения его к хорошо знакомому объекту.

Этой цели можно достичь, обрабатывая с помощью исследуемого алгоритма данные, относящиеся к тестовому объекту с заранее хорошо известными свойствами. Тестовый объект может быть создан физически и исследован с помощью каких-то других экспериментальных средств. Но его можно создать и в виде компьютерной модели (обычно это обходится намного дешевле и дает объект с более достоверно известными свойствами).

Компьютерное моделирование может также принести большую пользу при проектировании сложных дорогостоящих конструкций и систем, например, больших телескопов оптического и радиодиапазона, интерферометров и т. д., когда предварительное исследование ожидаемых свойств создаваемой конструкции может позволить избежать серьезных просчетов и выбрать наиболее удачный вариант. Значение компьютерного моделирования уже давно осознано специалистами [117].

Для компьютерного моделирования требуется большой набор программных средств, способных работать в тесном взаимодействии друг с другом, которые, таким образом, должны быть объединены в единую систему. Эта система должна быть снабжена языком программирования, удобным для легкой формулировки решаемых задач, рядом служебных программ и управляющими программными средствами, способными обеспечить правильное взаимодействие между прикладными программами и эффективное использование ими аппаратных ресурсов.

В последнее время в ИРЭ НАНУ были предприняты шаги по созданию такой системы, ориентированной на исследования в области формирования и обработки изображений [108]. Далее очень кратко описываются основные ее черты.

Система компьютерного моделирования (СКМ) является развивающейся системой, кото-

рую в процессе эксплуатации можно дополнять новыми прикладными и управляющими программами. Она состоит из управляющего ядра, играющего роль специализированной операционной системы, и расширяемого набора прикладных программ, реализующих алгоритмы моделирования и обработки результатов эксперимента или наблюдения.

СКМ имеет двухуровневую структуру. Верхний уровень образуют написанные на языке высокого уровня процедуры, реализующие алгоритмы обработки данных, и связанные с ними описания структур данных и операций над ними. Нижний уровень представляет собой набор исполняемых программных модулей (в коде машины), реализующих наиболее часто выполняемые вычислительные действия с высокой эффективностью. Это позволяет достичь в СКМ сочетания легкости и наглядности, присущих высокому уровню программирования, с экономностью и эффективностью машинных программ, рационально составленных на низком уровне. Основной объем вычислений возлагается на программы нижнего уровня; верхний уровень берет на себя всю сложность организации вычислительных алгоритмов.

Для составления программных средств верхнего уровня используется язык высокого уровня. В качестве такого языка выбран Алгол 68 как наиболее строго определенный язык, легкий и наглядный в использовании, с очень большой выразительной силой. Элементы программ на Алголе 68, подлежащие многократному использованию, объединены в библиотеки и оттуда доступны транслятору. В библиотечных процедурах предусмотрены тщательный контроль корректности входных данных и развитая система сообщений об ошибках в процессе исполнения программы, позволяющая локализовать ошибку в программе и определить стадию исполнения программы, на которой она обнаруживается.

Основной конструктивной единицей программного обеспечения нижнего уровня является исполняемый автономный программный модуль (АМ). Набор автономных модулей является как бы расширением системы команд машины. Обращение к АМ производится с помощью псевдокоманды по его системному номеру независимо от его положения в памяти. Никакая настройка АМ при его размещении в памяти не требуется. Любой АМ может обращаться к любому другому автономному модулю без ограничений и каких-либо специальных мер предосторожности, в том числе и к самому себе. Реализация рекурсивных алгоритмов не требует никаких дополнительных усилий программиста. Системные номера позволяют идентифицировать одновременно до 65535 АМ, что обеспечивает запас возможностей на долгое время развития системы.

При входе в АМ система автоматически выделяет ему рабочую память (стандартное рабочее поле – СРП), а его адрес помещает в стандартный регистр. Программисту нет необходимости знать, где фактически расположено в памяти это СРП. При выходе из АМ это СРП автоматически освобождается, а вызывавший его модуль снова получает доступ к своему СРП. Все эти действия выполняются невидимо для программиста, которому картина представляется так, как если бы его АМ был единственным в памяти, а псевдокоманды обращения к другим АМ были простыми машинными командами с номером АМ в качестве кода операции.

Для размещения больших массивов данных предусмотрена возможность получить дополнительную память (нестандартное рабочее поле – НРП) по запросу к системе с помощью специальной псевдокоманды. Эту память можно получить от системы и вернуть системе на любой стадии исполнения АМ.

Функции АМ при их разработке планируются таким образом, чтобы организационные затраты времени на доступ к АМ в типичном случае составляли не более 0,1-1 % времени его исполнения.

Доступ ко всем аппаратным ресурсам, доступным ДОС, осуществляется через стандартную ДОС, используемую обычным способом, но занимающую подчиненное положение по отношению к СКМ. Доступ СКМ ко всей оперативной памяти осуществляется через два сегментных регистра, не используемые в ДОС и работающие в режиме линейной адресации [47].

Заключение. Подводя итог, можно было бы сказать многое, но если быть кратким, то хотелось бы выразить глубокую благодарность всем, кто вложил в эту работу свой творческий потенциал на самых разных этапах ее выполнения. Некоторые из них упомянуты в тексте, имена других можно найти в списке литературы или в научных отчетах. По-разному сложилась их судьба; многие из них так и не получили достойного вознаграждения за свои творческие усилия. По этому поводу остается привести цитату из произведения [118] А. и Б. Стругацких: «Разумеется, людям свойственно ожидать награду за труды свои и за муки, и в общем-то, это справедливо. Но есть исключение: не бывает и не может быть награды за муку творческую. Мука эта сама заключает в себе награду».

1. Aroyan G. F. The technique of spatial filtering // Proc. IRE. – 1959. – No. 9. – P. 1561-1568.
2. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1979. – 285 с.
3. Leighton R. B., Muray B. C., Sharp R. P. et al. Mariner IV. Pictures of Mars // Techn. Rep. Jet Propulsion Lab. – 1967. – TR 32-884.

4. Коваль И. К. // Астроном. циркуляр. – 1965. – № 317. – С. 1.
5. Дудинов В. Н. О возможности учета погрешностей, вызванных замытием изображений планет // Астроном. журн. – 1969. – 46, вып. 5. – С. 1064-1073.
6. Lahart M. J. Local image restoration by a least squares method // J. Opt. Soc. Amer. – 1967. – 69, No. 10. – P. 1333-1339.
7. Ming Jiang, Ge Wang. Convergence Studies on Iterative Algorithms for Image Reconstruction // IEEE Transactions on Medical Imaging. – 2003. – 22, No. 5. – P. 569-579.
8. Хуанг Т. С., Шрайбер У. Ф., Третьяк О. Я. Обработка изображений // ТИИЭР. – 1971. – 59, № 11. – С. 59-89.
9. Арсенин В. Я., Тихонов А. Н. Регуляризация // В кн.: Математическая энциклопедия / Под ред. И. М. Виноградова. – М.: Сов. энцикл., 1984. – Т. 4. – С. 933.
10. Hadamard J. Sur les problemes aux derivees partielles et leur significations physiques // Bull. Princeton University Bulletin. – 1902. – No. 13. – P. 49-52.
11. Иванов В. К. О линейных некорректных задачах // Докл. АН СССР. – 1962. – 145, № 2. – С. 270-272.
12. Арсенин В. Я., Тихонов А. Н. Регуляризации метод // В кн.: Математическая энциклопедия / Под ред. И. М. Виноградова. – М.: Сов. энцикл., 1984. – Т. 4. – С. 931-933.
13. Тихонов А. Н. О регуляризации некорректно поставленных задач // Докл. АН СССР. – 1963. – 153, № 1. – С. 49-52.
14. Гаусс К. Ф. Теория движения небесных тел, вращающихся вокруг Солнца по коническим сечениям // Избр. геодезич. соч. – 1809. – 1. – С. 104.
15. Gauss C. F. Werke. – Göttingen, 1878. – VIII. – S. 116-147.
16. Wiener N. Extrapolation, interpolation and smoothing of stationary time series. With engineering applications. – N.Y.: Wiley, 1949. – 163 p.
17. Де Гроот М. Оптимальные статистические решения. – М.: Мир, 1974. – 491 с.
18. Турчин В. Ф., Козлов В. П., Малкевич М. С. Использование методов математической статистики для решения некорректных задач // Успехи физ. наук. – 1970. – 202, вып. 3. – С. 345-386.
19. Тихонов А. Н. Об устойчивости обратных задач // Докл. АН СССР. Нов. сер. – 1943. – 39, № 5. – С. 195-198.
20. Laplace P. S. Oeuvres completes. Vols. 1 – 14. – Paris, 1891. – V. 8. – P. 27-65.
21. Тихонов А. Н. Математическая модель // В кн.: Математическая энциклопедия / Под ред. И. М. Виноградова. – М.: Советская энцикл., 1982. – Т. 3. – С. 374-375.
22. Крамер Г. Математические методы статистики. – М.: Мир, 1975. – 648 с.
23. Вальд А. Статистические решающие функции // В кн.: Позиционные игры. – М.: Наука, 1967. – С. 300-522.
24. Усиков А. Я., Акимов Л. А., Бабищев А. А. и др. Светолокация поверхности Луны с помощью рубинового лазера // Радиопизика и электроника. – Харьков: Ин-т радиопизики и электрон. НАН Украины. – 2004. – 9, спец. вып. – С. 10-41.
25. Корниенко Ю. В. Оптимальный прием сигнала при светолокации астрономического объекта // Успехи совр. радиоэлектрон. (Зарубеж. электрон.). – 2004. – № 1. – С. 39-45.
26. Корниенко Ю. В. Радиовидение и цифровая обработка изображений // В кн.: Электроника и радиопизика миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн / Под ред. А. Я. Усикова. – Киев: Наук. думка, 1986. – С. 294-338.
27. Корниенко Ю. В. Статистический подход к фильтрации и информативность изображения // Радиопизика и электроника. – Харьков: Ин-т радиопизики и электрон. НАН Украины. – 2005. – 10, спец. вып. – С. 652-676.
28. Legendre A. M. Nouvelles methodes pour la determination des orbites des cometes. Second supplement. – Paris, 1820. – P. 79-80.
29. Ван дер Варден Б. Л. Математическая статистика. – М.: Изд-во иностр. лит., 1960. – 434 с.

30. Bayes T. Essay towards solving a problem in the doctrine of chances (1765). Reproduced with a bibliographic note by Barnard G. A. // *Biometrika*. – 1958. – 45, No. 3/4. – P. 293-315.
31. Колмогоров А. Н. Основные понятия теории вероятностей. – М.: Наука, 1974. – 119 с.
32. Колмогоров А. Н. Общая теория и исчисление вероятностей // Коммунистическая академия, секция естественных и точных наук: сб. работ мат. раздела. – 1929. – 1. – С. 8-21.
33. Лозев М. Теория вероятностей. – М.: Изд-во иностр. лит., 1962. – 720 с.
34. Халмош П. Р. Теория меры. – М.: Изд-во иностр. лит., 1953. – 280 с.
35. Го Х.-С. Гауссовские меры в банаховых пространствах. – М.: Мир, 1979. – 172 с.
36. Wiener N. The average of an analytic functional and the Brownian movement // *Proc. Nat. Acad. Sci. U. S. A.* – 1921. – No. 7. – P. 294-298.
37. Винер Н. Нелинейные задачи в теории случайных процессов. – М.: Изд-во иностр. лит., 1961. – 160 с.
38. Cameron R. H., Martin W. T. Transformation of Wiener integrals under translations // *Ann. Math.* – 1944. – 45, No. 2. – P. 386-396.
39. Feldman J. Equivalence and perpendicularity of Gaussian processes // *Pacific J. Math.* – 1958. – 8, No. 4. – P. 699-708.
40. Kakutani S. On equivalence of infinite product measures // *Ann. Math.* – 1948. – 49, No. 2. – P. 214-224.
41. Labeyrie A. Attainment of diffraction limited resolution in large telescopes by Fourier analyzing speckle patterns in star images // *Astron. and Astrophys.* – 1970. – 6, No. 1. – P. 85-87.
42. Маршалль А., Франсон М. Структура оптического изображения. Дифракционная теория и влияние когерентности света. – М.: Мир, 1964. – 295 с.
43. Дудинов В. Н., Цветкова В. С., Кристаль В. А., Хованский Н. А. Обработка астрономических изображений методами когерентной оптики // *Вестн. Харьков. гос. ун-та. Астрономия*. – 1974. – Вып. 9, № 117. – С. 19-26.
44. Усиков О. Я., Бабичев А. А., Егоров А. Д. та ін. Система цифровой обработки зображень // *Вісн. АН УРСР*. – 1977. – № 10. – С. 47-58.
45. Бабичев А. А., Егоров А. Д., Заец Н. К. и др. Цифровая обработка изображений в ИРЭ АН УССР // *Вестн. Харьков. гос. ун-та*. – 1981. – вып. 16, № 223. – С. 6-16.
46. Усиков О. Я., Станкевич Д. Г., Шкуратов Ю. Г., Корниенко Ю. В. и др. Проблема візуалізації інформації та цифрова обробка зображень // *Вісн. АН УРСР*. – 1982. – № 12. – С. 69-79.
47. Кулаков В. Программирование на аппаратном уровне: специальный справочник. – СПб.: Питер, 2003. – 848 с.
48. Акимов Л. А., Корниенко Ю. В. О возможности автоматического получения статистико-морфологических характеристик участков лунной поверхности по их фотографическому изображению // *Астрометрия и астрофизика*. – 1971. – № 14. – С. 54-60.
49. Лисина Л. Р. Физика Луны и планет. – Киев: Наук. думка, 1968. – С. 7-36.
50. Van Diggelen, J. A photometric investigation of the slopes and heights of the ranges of hills in the maria of the Moon // *Netherlands Astron. Inst. Bull.* – 1951. – No. 11. – P. 283-289.
51. Парусимов В. Г., Корниенко Ю. В. Об отыскании наиболее вероятного рельефа участка поверхности по его оптическому изображению // *Астрометрия и астрофизика*. – 1973. – № 19. – С. 20-24.
52. Парусимов В. Г., Корниенко Ю. В. Об одной возможности построения алгоритма распознавания морфологических образований на поверхности планеты // *Астрометрия и астрофизика*. – 1974. – № 21. – С. 44-48.
53. Корниенко Ю. В. Восстановление изображений, зарегистрированных в режиме счета фотонов // *Вестн. Харьков. гос. ун-та*. – 1985. – № 278. – С. 18-23.
54. Bazilevsky A. T., Florensky C. P., Kornienko Yu. V. et al. On geological processes on Venus // In: An international conference on the Venus environment, November 1-6, 1981, Hyatt Ricketts, Palo Alto California. – P. 5.
55. Усиков А. Я., Шкуратов Ю. Г., Станкевич Д. Г. и др. Анализ корреляции между высотой и шероховатостью поверхности Венеры по радиолокационным данным КА «Пионер-Венера-1» // *Докл. АН СССР*. – 1982. – 264, № 3. – С. 591-595.
56. Корниенко Ю. В., Шкуратов Ю. Г., Бычинский В. И., Станкевич Д. Г. Взаимосвязь альbedo и поляризационных характеристик Луны. Применение цифровой обработки изображений // *Астроном. журн.* – 1982. – 59, вып. 3. – С. 571-577.
57. Корниенко Ю. В., Станкевич Д. Г., Базилевский А. Т., Шкуратов Ю. Г. Изображение рельефа Венеры по данным орбитальной радиолокации // *Докл. АН УССР. Сер. А*. – 1982. – № 5. – С. 87-88.
58. Bazilevsky A. T., Bobina A. B., Shashkina V. P. et al. On geological processes on Venus: analysis the relationship between altitude and degree of surface roughness // *The Moon and Planets*. – 1982. – 27, No. 1. – P. 63-89.
59. Станкевич Д. Г., Редькин С. П. и др. Визуализация данных радарной альтиметрии Венеры // *Косм. исслед.* – 1983. – 22, вып. 1. – С. 138-140.
60. Ильинский А. В., Опанасенко Н. В., Шкуратов Ю. Г., Корниенко Ю. В. и др. Некоторые результаты цифровой обработки орбитальных панорам, полученных АМС «Луна-22» // *Вестн. ХГУ*. – 1983. – № 247. – С. 9-32.
61. Базилевский А. Т., Бобина Н. И., Шапкина В. П. и др. О геологических процессах на Венере. Анализ связи высоты и степени шероховатости поверхности для области Бета // *Изв. АН СССР. Сер. геологич.* – 1983. – № 6. – С. 54-65.
62. Bazilevsky A. T., Kryuchov V. P., Shkuratov Yu. G. et al. Correlation of Venus surface roughness with the terrain altitude and general slopes: new approach to analysis of Pioneer-Venus and Earth-based radar data // *Lunar Planet Sci. Conf. 14th*. – 1983. – P. 23-24.
63. Stankevich D. G., Shkuratov Yu. G., Bazilevsky A. T., Kornienko Yu. V. Visualization of Pioneer-Venus radar data for Ishtar Terra and Beta Regio // *Lunar Planet Sci. Conf. 14th*. – 1983. – P.743-744.
64. Усиков А. Я., Шкуратов Ю. Г., Станкевич Д. Г. и др. Анализ связи высоты и шероховатости на Венере по данным радиолокации с КА «Пионер-Венера» // *Докл. АН СССР*. – 1983. – 264, № 3. – С. 591-596.
65. Тюфлин Ю. С., Шкуратов Ю. Г., Ильинский А. В. и др. Опыт построения тематических фотокарт участка лунной поверхности с помощью системы цифровой обработки изображений // *Геодезия и картография*. – 1985. – № 1. – С. 38-44.
66. Усиков А. Я., Дудинов В. Н., Цветкова В. С. и др. Аналоговая и цифровая обработка астрономических изображений // *Вест. АН УССР*. – 1985. – № 2. – С. 6-30.
67. Бондаренко Н. В., Шкуратов Ю. Г., Акимов Л. А., Корниенко Ю. В. Диаграмма альbedo-цвет Луны // *Кинематика и физика небесных тел*. – 1985. – 1, № 6. – С. 3-11.
68. Шкуратов Ю. Г., Базилевский А. Т., Станкевич Д. Г., Корниенко Ю. В. и др. Стереопанорама района посадки советских АМС «Венера-9» – «Венера-14» и анализ корреляции некоторых характеристик поверхности этого района по данным орбитальной радиолокации // *Кинематика и физика небесных тел*. – 1985. – 1, № 5. – С. 34-47.
69. Корниенко Ю. В., Бондаренко Н. В., Шкуратов Ю. Г. и др. Диаграмма альbedo-цвет участка поверхности Марса по данным КА «Викинг-1» // *Тр. 8-й Сов.-амер. рабочей встречи по планетологии (22-28 августа 1988 г.)*. – С. 77-78.
70. Kornienko Yu. V., Bondarenko N. V. Lunar Albedo - Color Diagram Survey of South - West Part of Lunar Disk // *LPSC XX (Abstracts), March 13-17, 1989*. – P. 1006-1007.
71. Корниенко Ю. В., Неуен Суан Ань, Тернопольский В. И. и др. Задача восстановления рельефа поверхности Марса по изображениям с КА «Марс-94» на основе статистического подхода // *Тез. 14-й Сов.-амер. рабочей встречи по планетологии, 26-30 августа 1991г.* – М., ГЕОХИ АН СССР, 1991. – С. 39-40.

72. Корниенко Ю. В., Нгуен Суан Ань, Станкевич Д. Г. Восстановление рельефа поверхности по серии ее стереоизображений // Там же. – С. 41-42.
73. Журавин Ю. ЦНИИ «Комета» – 30 лет // Новости космонавтики. – 2003. – 13, № 6 (245). – С. 65.
74. Смирнова М. Мирный бог войны // В мире науки. – 2005. – № 7. – С. 16-19.
75. Корниенко Ю. В., Дулова И. А., Нгуен Суан Ань. Винеровский подход к определению оптических характеристик поверхности планеты по результатам фотометрических наблюдений // Кинематика и физика небесных тел. – 1994. – 10, № 5. – С. 69-76.
76. Дулова И. А., Корниенко Ю. В. Случайная погрешность определения рельефа поверхности по ее радиояркости // Радиофизика и радиоастрономия. – 2001. – 6, № 4. – С. 310-316.
77. Дулова И. А., Корниенко Ю. В., Скуратовский С. И. Определение рельефа поверхности клинометрическим методом при избытке или недостатке исходных данных // Радиофизика и электроника. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 2007. – 12, № 2. – С. 408-415.
78. Skuratovsky S. I., Dulova I. A., Kornienko Yu. V., Bondarenko N. V. Optimal observational conditions of the planetary surface for the relief reconstruction with photometric method // 42 Vernadsky - Brown Microsymposium, 2005. – Abstract No. M42_61.
79. Dulova I. A., Skuratovsky S. I., Kornienko Yu. V., Bondarenko N. V. Estimation of surface albedo variations for the purposes of relief reconstruction. // 46 Vernadsky - Brown Microsymposium, 2006. – Abstract No. M46_08.
80. Dulova I. A., Skuratovsky S. I., Bondarenko N. V., Kornienko Yu. V. Photometric Method of Topography Reconstruction: Mars Relief from a Single Image // LPSC XXXVIII, League City, Texas. LPI Contribution, 2007. – No. 1338. – P. 1464.
81. Дулова И. А., Скуратовский С. И., Бондаренко Н. В., Корниенко Ю. В. Восстановление рельефа поверхности по одиночным изображениям с помощью фотометрического метода // Астроном. вестн. – 2008. – 42, № 6. – С. 557-571.
82. Корниенко Ю. В. Проблема углового разрешения при наблюдении астрономических объектов сквозь атмосферу // 200 лет астрономии в Харьковском университете / Под ред. проф. Ю. Г. Шкуратова. – Харьков: ХНУ, 2008. – С. 353-379.
83. Корниенко Ю. В., Уваров В. Н. Накопление сигнала при наблюдении астрономического объекта сквозь турбулентную атмосферу // Докл. АН УССР. Сер. А. – 1987. – № 4. – С. 60-63.
84. Содин Л. Г. О возможности достижения дифракционного предела разрешения при работе телескопа в турбулентной атмосфере // Письма в астроном. журн. – 1976. – 2. – С. 554-558.
85. Корниенко Ю. В. О возможности восстановления изображения слабого объекта, искаженного влиянием земной атмосферы // Докл. АН УССР. Сер. А. – 1977. – № 10. – С. 931-933.
86. Fienup J. R. Reconstruction of the object from the modulus of its Fourier transform // Opt. Lett. – 1978. – 3, No. 1. – P. 97-99.
87. Бабичев А. А., Корниенко Ю. В., Парусимов В. Г. и др. Цифровая обработка астрономических изображений // Тр. 14-го Международного конгресса по высокоскоростной фотографии и фотонике (Москва, 19-24 окт. 1980 г.) – С. 436-439.
88. Скуратовский С. И., Корниенко Ю. В. О реконструкции изображения объекта по модулю его Фурье-образа // Радиофизика и электроника. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 2008. – 13, № 1. – С. 130-141.
89. Корниенко Ю. В. Интерферометрический подход к проблеме видения сквозь турбулентную атмосферу. // Кинематика и физика небесных тел. – 1994. – 10, № 2. – С. 98-106.
90. Rhodes W. T., Goodman J. W. Interferometric technique for recording and restoring images by unknown aberration // J. Opt. Soc. Amer. – 1973. – 63, No. 6. – P. 647-657.
91. Уваров В. Н. О возможности получения изображений с дифракционным разрешением при наблюдении сквозь неоднородную среду // Докл. АН УССР. Сер. А. – 1979. – № 10. – С. 839-841.
92. Roddier F. Redundant versus nonredundant beam recombination in an aperture synthesis with coherent optical arrays // J. Opt. Soc. Amer. – 1987. – A4, No. 8. – P. 1396-1401.
93. Michelson A. A. On the application of interference methods to astronomical measurements // Astrophys. J. – 1920. – 51. – P. 257-262.
94. Корниенко Ю. В., Уваров В. Н. О возможности достижения дифракционного предела разрешения при наблюдении астрономического объекта сквозь неизопластичную атмосферу // Докл. АН УССР. Сер. А. – 1988. – № 10. – С. 62-64.
95. Корниенко Ю. В., Пугач В. В. Интерферометрический метод формирования изображений как основа построения многозеркальных телескопов // Вісн. астроном. школи. – 2004. – 3, № 2. – С. 70-80.
96. Пугач В. В. Интерферометрический метод формирования изображений: обзор результатов и моделирование // Радиофизика и электроника. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 2004. – 9, спец. вып. – С. 140-153.
97. Исследование возможностей и разработка физического основ построения изображающих систем оптического и радиодиапазонов, устойчивых по отношению к фазовым искажениям: отчет по НИР «Алькор» / Рук. Корниенко Ю. В. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины, 2000. – 299 с.
98. Разработка методов цифровой обработки изображений для астрономических и прикладных исследований: отчет по НИР «Диабаз-2» / Рук. Усиков А. Я. и Корниенко Ю. В. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины, 1990. – 163 с.
99. Kornienko Yu. V., Leyferov V. A. Studies of the interferometric method for forming astronomical images as to its resistance to phase distortions in atmosphere // Кинематика и физика небесных тел. – 1994. – 10, No. 1. – С. 65-67.
100. Корниенко Ю. В., Лейферов В. А., Пугач В. В. Информационная эффективность многолучевого интерферометра при наблюдении объекта сквозь неоднородную среду // Радиофизика и электроника. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 1997. – 2, № 2. – С. 132-136
101. Копилович Л. Е. Многолучевой оптический интерферометр: оптимизация выходной апертуры // Кинематика и физика небесных тел. – 1998. – 14, № 1. – С. 180-185.
102. Kopilovich L. E. Non-redundant apertures for optical interferometric systems: maximization of the number of elements // Journal of Modern Optics. – 1998. – 45, No. 11. – P. 2417-2424.
103. Kopilovich L. E. Applications of difference sets to the aperture design in multielement systems in radio science and astronomy. In «Difference Sets, Sequences and Their Correlation Properties» // A. Pott et al (eds), NATO Sci. Ser., Ser. C, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. – 1999. – V. 542. – P. 297-330.
104. Kopilovich L. E., Sodin L. G. Multielement System Design in Astronomy and Radio Science // Kluwer Academic Publishers (Dordrecht/Boston/London), The Netherlands, Astrophysics and Space Science Library. – 2001. – V. 268. – 183 p.
105. Корниенко Ю. В. Интерферометрический метод формирования изображений и проблема оптимизации апертур интерферометра // Радиофизика и электроника. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 2000. – 5, № 1. – С. 186-190.
106. Корниенко Ю. В. Построение безыбыточных антенных конфигураций на квадратной решетке методом случайного поиска // Там же. – 2000. – 5, № 3. – С. 148-154.
107. Корниенко Ю. В. Построение безыбыточных антенных конфигураций на гексагональной решетке методом случайного поиска // Там же. – 2002. – 7, № 1. – С. 142-153.
108. Оптические методы в коротковолновой части радиодиапазона и нелинейная динамика электронного генератора: отчет по НИР «ОРТ» / Рук. М. И. Дзюбенко. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины, 2003. – 253 с.

109. Исследование предельных возможностей и разработка методов восстановления изображений при наблюдении объектов сквозь среду со случайными неоднородностями показателя преломления: отчет по НИР «Предел» / Рук. Ю. В. Корниенко. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины, 1993. – 236 с.
110. Разработка методов оптимального синтеза систем радиовидения и обработки радиоизображений: отчет по НИР «Проминь» / Рук. Ю. В. Корниенко. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины, 1997. – 203 с.
111. *Корниенко Ю. В.* Устойчивость интерферометрического метода формирования изображений к фазовым искажениям волнового фронта // Доп. НАН України. – 2000. – № 5. – С. 78-82.
112. *Kornienko Yu. V., Pugach V. V.* Interferometric method for image formation: investigation of potentialities by means of computer simulation // MSMV'2004 / The Fifth International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Sub-Millimeter Waves (Kharkov, Ukraine, June 21-26, 2004). – 2. – P. 902-904.
113. *Kornienko Yu. V., Pugach V. V.* Interferometric method for image formation: the basic ideas and computer simulation // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Supplement: Proceedings of the International Conference «Astronomy in Ukraine. – Past, Present and Future», 2005. – No. 5. – P. 534-536
114. *Babcock H. W.* Publ. on the Astronomical Soc. – 1953. – 65, No. 386. – P. 229.
115. *Roggemann M. C., Welsh B. M. and Fugate R. Q.* Improving the resolution of ground-based telescopes // Reviews of Modern Physics. – 1997. – No. 69. – P. 437-505.
116. Взаимодействие электромагнитного излучения видимого, терагерцового и гигагерцового диапазонов с материальными средами естественного и искусственного происхождения: отчет по НИР «Напрямок» / Рук. д. ф.- м. н. А. И. Фисун. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины, 2006. – 283 с. – С. 123-202.
117. *Самарский А. А., Галактионов В. А., Курдюмов С. П., Михайлов А. П.* Режимы с обострением в задачах для квазилинейных параболических уравнений. – М.: Наука, 1987. – 480 с.
118. *Стругацкие А. и Б. Хромяя* судьба: Собр. соч. – М.: Текст, 1993. – Т. 9. – С. 292.

IMAGE PROCESSING AT THE IRE NAS OF UKRAINE

Yu. V. Kornienko

An overview is given of the research and development work that has been carried out in the field of analog and digital image processing over the last 40 years at the Usikov Institute of Radiophysics and Electronics (IRE) of the NASU.

The scientific foundations of image processing, the historical milestones that bring us back to the pioneering research efforts in the image processing techniques, the main stages of these fundamental and applied investigations are briefly outlined. The initial phases of operations of a coherent-optical setup and a digital image processing system developed at the above-mentioned Institute are described. The essentials of the studies that have recently been made at the IRE are summarized.

Key words: image filtering, Bayes statistical approach, imaging through the turbulent atmosphere.

ОБРОБКА ЗОБРАЖЕНЬ В ІРЕ НАН УКРАЇНИ

Ю. В. Корнієнко

Огляд досліджень та розробок, які виконано в ІРЕ НАНУ у галузі аналогової та цифрової обробки зображень за майже сорокалітній період. Коротко викладено наукові основи обробки зображень, історія виникнення цих робіт в ІРЕ, основні етапи фундаментальних та прикладних досліджень. Описано створені в ІРЕ на перших етапах роботи когерентно-оптична установка та система цифрової обробки зображень. Коротко викладено суть досліджень, які проводяться в ІРЕ в останній час.

Ключові слова: фільтрація зображень, байєсовий статистичний підхід, бачення крізь турбулентну атмосферу.

Рукопись поступила 14 октября 2008 г.