



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

DOI: <https://doi.org/10.15407/rej2018.04.037>

УДК 52-12:535.39

PACS 42.30.Va:95.75.Pq

**Ю. В. Корниенко, С. И. Скуратовский**

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины*

*12, ул. Акад. Проскуры, Харьков, 61085, Украина*

E-mail: [ss\\_snake@urk.net](mailto:ss_snake@urk.net)

## ПУТИ МАКСИМАЛЬНОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ ИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ АСТРОНОМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

**Предмет и цель работы.** Информация, получаемая в результате физического эксперимента, обычно оказывается частично разрушенной воздействием различных шумовых факторов. Природа этих факторов зависит от условий эксперимента, однако подход к преодолению их влияния во многих случаях оказывается весьма сходным. Исследования, проводимые в группе обработки изображений ИРЭ НАНУ в последние десять лет, были направлены на поиск методов максимального извлечения информации из астрономических наблюдений и космических экспериментов. Исследования велись в нескольких направлениях. При наблюдении с поверхности Земли задачей было преодоление атмосферных фазовых искажений и синтез антенных конфигураций для телескопов и интерферометров в различных участках электромагнитного спектра. При космических наблюдениях ставился вопрос об оптимальной интерпретации их результатов, в частности, получении рельефа поверхности планет и обработке изображений с эффектом гравитационного линзирования.

**Методы и методология.** Общей чертой разработанных методов является статистический подход, т. е. применение математической статистики и теории оптимальных статистических решений. Данная работа раскрывает как общие черты его использования, так и специфику получаемых решений в случае конкретных задач обработки астрономических изображений.

**Результаты работы.** В результате проведенных исследований были разработаны следующие методы: метод накопления полных фаз фурье-компонент для подавления атмосферного фазового шума; метод оптимальной оценки интенсивности точечного источника при наблюдении его сквозь гравитационное поле удаленной галактики; метод учета альтиметрической информации при фотоклинометрическом определении рельефа поверхности планеты; а также ряд методов синтеза антенных конфигураций для телескопов и интерферометров.

**Заключение.** Статистический подход к обработке экспериментальных данных позволил использовать информацию, содержащуюся в серии изображений астрономического объекта, для реконструкции единственного, более точного его изображения. Благодаря ему стало возможным оптимальным образом объединить информацию, содержащуюся в изображениях поверхности и альтиметрических данных, для получения рельефа поверхности с высоким разрешением и привязкой к реальным значениям высоты. При работе с гравитационными миражами стало возможным отделение наблюдаемого источника от фона. Результаты демонстрируют, что баесовский статистический подход является мощным инструментом в руках исследователя. Ил. 5. Библиогр.: 65 назв.

**Ключевые слова:** статистический подход, астрономические изображения, накопление фаз, рельеф поверхности, фотоклинометрия, антенные решетки.

В дни, когда научная общественность нашей страны отмечает столетний юбилей академии наук, уместно вспомнить об основных научных результатах, полученных за последнее десятилетие. Данная статья посвящена результатам исследований, выполненных группой обработки изображений отдела квантовой электроники и нелинейной оптики ИРЭ НАНУ в период с 2008 по 2018 гг. Этот отдел состоит из двух подразделений, одно из которых занимается квантовой электроникой и ее приложениями, а второе – задачами максимального извлечения информации из астрономических наблюдений и космических экспериментов, а также некоторыми вопросами, связанными с актуальным в наше

время освоением терагерцевого диапазона электромагнитных волн.

Современные средства астрономических наблюдений с поверхности Земли требуют больших материальных затрат – на телескопы оптического, инфракрасного и радиодиапазона, интерферометры со сверхбольшой базой и т. д. То же относится и к космическим экспериментам. Это дает основания желать, чтобы информация об исследуемом объекте, содержащаяся в результатах таких наблюдений и экспериментов, была использована с максимальной степенью полноты. Это приводит к математическим задачам, нелегким уже на этапе их постановки, и часто – в решении.

Среди многочисленных исследователей ближнего и дальнего космоса нередко бытует такой подход к задачам обработки результатов эксперимента: вырабатывается некий эмпирический алгоритм и затем испытывается на практике с использованием субъективной оценки получаемых результатов или же сравнения их с результатами применения других алгоритмов. Зачастую подобные подходы могут быть лишены строгого теоретического обоснования и приводят к положительным результатам лишь в весьма ограниченном круге задач. Нам представляется предпочтительным другой подход, когда исходная задача сначала получает строго математическую формулировку, а затем уже решается математически корректно, хотя, возможно, и приближенно. Этот результат затем может быть положен в основу алгоритмов обработки данных.

Исследования, описанные в этой статье, основаны на статистическом подходе, т. е. рассмотрение производилось с позиции теории оптимальных статистических решений [1–8]. Неизвестные величины или функции, а также мешающие факторы рассматриваются при этом как случайные элементы соответствующих вероятностных пространств [9], а задача определения неизвестных ставится как задача оптимальной статистической оценки этого элемента при заданных результатах эксперимента. Критерий оптимальности может быть разным. В наших исследованиях мы обычно ставим задачу найти элемент, имеющий наибольшую апостериорную вероятность (или плотность вероятности) при условии заданных результатов эксперимента. Иногда в таких случаях ставят задачу найти оценку, которая обеспечивает минимум апостериорной дисперсии погрешности определения элемента. Как было показано еще Гауссом, при нормальном распределении погрешностей эксперимента эти два критерия эквивалентны друг другу.

В последнее время наши исследования были сосредоточены на двух основных направлениях:

1) преодоление мешающего влияния земной атмосферы при наблюдении астрономических и искусственных космических объектов с поверхности Земли;

2) определение рельефа участка поверхности планеты по его оптическим или радиоизображениям (п. 2.5).

Кроме того, велись теоретические исследования, связанные с освоением терагерцевого диапазона, однако они выходят за рамки тематики данной статьи. Результаты же, полученные по первым двум направлениям работ, кратко изложены ниже.

**2. Видение сквозь турбулентную атмосферу.** Идеально изготовленный телескоп с диаметром апертуры  $d$  позволяет получить угловое разрешение порядка  $\lambda/d$  радиан, где  $\lambda$  – длина волны, на которой производится наблюдение. Это дифракционный предел разрешения, не преодолимый принципиально для данного наблюдательного инструмента. Например, телескоп диаметром 2 м в отсутствие атмосферы мог бы дать в видимой области спектра разрешение в  $0,05''$ . Однако практически при наблюдении сквозь атмосферу редко достигается разрешение лучше  $1''$ . Это происходит из-за случайных неоднородностей показателя преломления воздуха, вызванных неоднородностями температуры, которые, в свою очередь, возникают из-за перемешивания более теплых восходящих конвективных потоков с более холодным окружающим воздухом. Распространение волны в среде со случайными неоднородностями показателя преломления приводит к искажению фазового фронта и, в конечном счете, к резкому увеличению ширины ядра, с которым сворачивается изображение наблюдаемого объекта.

Таким образом, возникает задача преодоления этого рубежа. Существует много идей, иногда весьма остроумных, но радикального решения задачи пока нет. С развитием техники возникла возможность выводить инструменты наблюдения за пределы земной атмосферы. В условиях отсутствия атмосферы можно получить угловое разрешение на дифракционном пределе. Однако в условиях невесомости можно строить телескопы значительно больших размеров, и было бы большой ошибкой не воспользоваться этой возможностью. Однако увеличение размеров телескопа даже в условиях невесомости приводит к недостатку механической жесткости и возвращает на повестку дня проблему борьбы с фазовыми искажениями.

2.1. *Постановка задачи.* Пусть наблюдается объект, зависимость яркости  $I$  которого от координат  $x, y$  в предметной плоскости (на малом участке небесной сферы) выражается неизвестной функцией  $I(x, y)$ . Целью наблюдения является определение этой функции. Для этого с помощью телескопа формируется и регистрируется в разные моменты времени  $t$  изображения этого объекта  $J_1(x, y), J_2(x, y), \dots, J_m(x, y)$ . Наблюдаемые изображения отличаются от  $I(x, y)$  из-за влияния земной атмосферы. Это влияние на  $i$ -ом зарегистрированном изображении выражается сверткой истинного изображения  $I(x, y)$  с атмосферным ядром  $g_i(x, y)$  в момент получения  $i$ -го изображения

$$J_i(x, y) = \iint I(x', y') g_i(x - x', y - y') dx' dy'. \quad (1)$$

Поскольку флуктуации показателя преломления в атмосфере носят случайный характер, случайными являются и ядра  $g_i$ , и изображения  $J_i$ . Поэтому ставить обратную задачу определения истинного изображения  $I(x, y)$  по известным  $J_i$  в детерминированном смысле не представляется возможным. Остается рассматривать задачу оптимальной статистической оценки истинного изображения  $I$  по известным зарегистрированным изображениям  $J_i(x, y)$ . Эта процедура называется реконструкцией изображения объекта.

Вопрос о выборе критерия, по которому производится оптимизация, выходит за рамки теории оптимальных статистических решений. Вместо этого она предлагает следующую математическую формализацию предмета [6]. Вводится функция потерь, зависящая от погрешности оценки, т. е. разности между истинным значением неизвестного и его статистической оценкой. Оценка, минимизирующая апостериорное математическое ожидание функции потерь, считается оптимальной.

Выбор функции потерь диктуется соображениями практического характера. Чаще всего в качестве функции потерь выбирают апостериорную дисперсию погрешности, а в качестве критерия оптимальности – максимум апостериорной плотности вероятности. Как впервые было показано Гауссом, в слу-

чае нормального распределения погрешностей эксперимента оценки по этим двум критериям совпадают. Простое арифметическое усреднение результатов последовательности одинаковых измерений в случае нормального распределения погрешностей и метод наименьших квадратов Гаусса являются простейшими частными следствиями из этой теории. Эта принципиально простая общая картина оборачивается на практике далеко не простыми математическими задачами, многие из которых еще ждут своего решения.

2.2. *Исходные предположения. Толщина атмосферы. Статистика неоднородностей.* Воздействие случайных неоднородностей на плоскую волну выражается в искажении ее амплитуды и фазы. Возмущение амплитуды происходит в результате фокусировки и расфокусировки света на неоднородностях. Этот эффект не успевает проявиться, если неоднородность расположена достаточно близко к апертуре телескопа.

Чтобы упростить задачу, мы считаем атмосферу бесконечно тонкой и расположенной в непосредственной близости от телескопа. В этом случае можно рассматривать только возмущение фазы волны, а возмущением амплитуды можно пренебречь. Такая идеализация оправдана тем, что большая часть неоднородностей сосредоточена в нижнем слое атмосферы, в особенности в ночное время, когда обычно и производятся астрономические наблюдения в видимой области спектра.

При рассмотрении зависимости фазовых искажений от координат в апертурной плоскости принято считать, что они представляют собой колмогоровский случайный процесс [10], который характеризуется единственным параметром – параметром Фрида. Это предположение основано на представлении об атмосфере как о среде, в которой имеет место стационарная турбулентность [11]. Мы же рассмотрим возможность описания фазовых искажений с помощью стационарного гауссова процесса. Главное отличие между этими процессами имеет место при малых и больших расстояниях между отсчетами. Но на малых расстояниях тепловая релаксация ночного воздуха стирает специфику колмогоровского процесса, так что этот масштаб расстояний становится ниже нижнего масштаба турбулентности [11]. Большие же

расстояния не актуальны ввиду конечности размеров апертуры телескопа. Поэтому в области пространственных частот, передаваемой телескопом, трудно отличить колмогоровский атмосферный фазовый шум от стационарного гауссова.

*2.3. Накопление модулей и фаз фурье-компонент.* Метод Лабейри [12] позволяет путем накопления получить из последовательности изображений объекта слабо искаженный атмосферой пространственный спектр объекта (квадрат модуля фурье-образа функции  $I(x, y)$ ). Из него обратным преобразованием Фурье получается автосвертка изображения объекта. Это открывает возможность измерять диаметры звезд, выявлять наличие деталей на диске звезды, исследовать кратные звезды и т. д. Однако реконструировать изображение по квадрату модуля его фурье-образа в общем случае нельзя, потому что фазы фурье-компонент остаются при этом неизвестными. Высказывались предположения о возможной связи модулей и фаз фурье-компонент, позволяющей реконструировать изображение с использованием известных модулей и априорной информации [13, 14]. Однако более поздние исследования показали, что такая процедура полезна лишь в ограниченном круге задач [15].

Идея накопления фаз путем их арифметического усреднения по последовательности зарегистрированных изображений впервые была высказана Л. Г. Содиним в 1977 г. [16]. Эта идея заслуживает внимания, так как в сочетании с методом Лабейри составляла приближение к давно искомой процедуре оптимального накопления сигнала по серии мгновенных изображений. Однако осуществить ее на практике не представлялось возможным из-за низкой производительности вычислительной техники. Теперь же, когда доступные вычислительные мощности возросли на порядки, ее проверка не составила больших трудностей. Оказалось [17], что метод отлично работает, когда среднеквадратичное значение фазового искажения мало по сравнению с единицей. По мере приближения к единице метод работает все хуже, а при превышении единицы постепенно перестает работать вообще.

Оказалось, что проблема кроется в топологии пространств, в которых принимают

значения фаза фурье-компоненты и ее искажение атмосферой. Искажение фазы – вещественная величина, принимающая значения на всей вещественной оси. В то же время фаза фурье-компоненты (ее главное значение) располагается на окружности, где числа, различающиеся на  $2\pi$ , являются эквивалентными. Случайные величины из этих пространств обладают разными свойствами. В частности, сумма бесконечного множества независимых случайных величин, согласно центральной предельной теореме, дает на прямой нормальное распределение, а на окружности – равномерное.

С учетом последнего обстоятельства был разработан новый метод, названный накоплением полных фаз [17, 18]. Суть его состоит в том, что при накоплении надо учитывать многоликий характер фазы как функции вещественной и мнимой частей фурье-компоненты. Поэтому усреднять следует не доступные к определению главные значения фаз, а неизвестные полные фазы, которые могут находиться на разных листах этой функции. Для этого надо следить за изменением фазы и учитывать ее переходы с одного листа на другой [18]. Пример результатов такого эксперимента в сравнении с реконструкцией изображения винеровским фильтром и использованием прямого усреднения фаз показан на рис. 1.

*2.4. Принципиальное ограничение.* Накопление полных фаз выглядит вполне корректным с математической точки зрения. Тем не менее, при среднеквадратичном искажении фазы  $2\pi$  при использовании классического телескопа метод перестает работать [19]. Причина кроется в следующем [20].

Пусть  $h$  – среднеквадратичное смещение волнового фронта под влиянием фазовых искажений,  $l$  – радиус корреляции поля фазовых искажений. Тогда характерный наклон фронта искаженной волны составит  $h/l$ . Если мысленно разбить апертуру на элементы размером  $l$ , то окажется, что размер дифракционного пятна, сформированного таким элементом, равен  $\lambda/l$ . Для интерференции между световыми потоками необходимо, чтобы потоки перекрывали друг друга, т. е. чтобы смещение пятна не превышало его размеров ( $h/l < \lambda/l$ , или  $h < \lambda$ ).

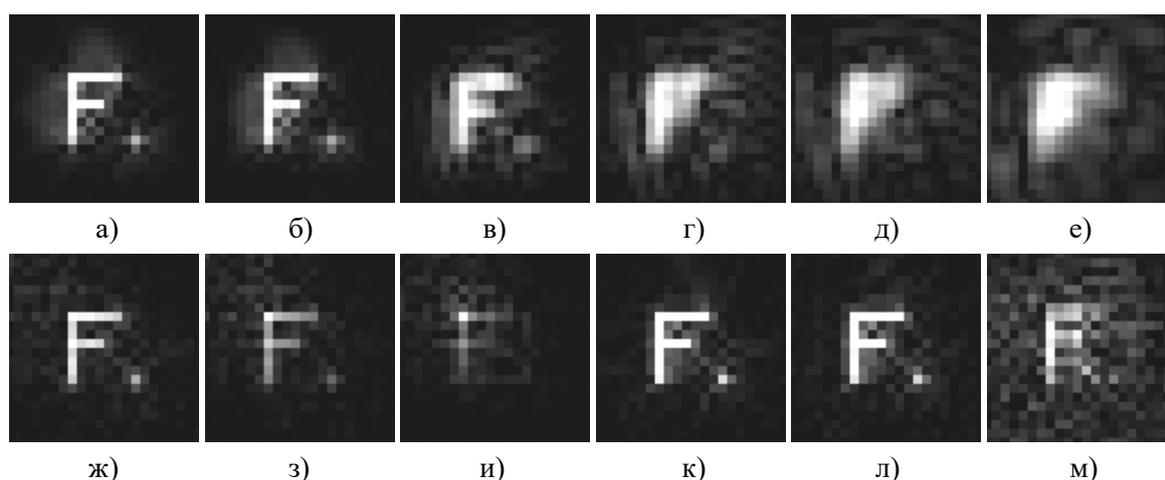


Рис. 1. Изображения, восстановленные винеровским фильтром (а – е), прямым усреднением фаз (ж – и) и усреднением фаз с применением отслеживания (к – л) при среднеквадратичном отклонении фазовых искажений 0,8 (а, ж), 1,0 (б, з), 1,8 (в, и), 2,4 (г, к),  $\pi$  (д, л) и  $2\pi$  (е, м); отношение диаметра апертуры к характерному размеру атмосферных неоднородностей порядка 1,5

Таким образом, существование границы применимости метода при среднеквадратичном искажении фазового фронта  $2\pi$  является не недостатком метода накопления, а принципиальным ограничением при традиционном способе формирования астрономического изображения [19, 20].

*2.5. Необходимость нового способа формирования астрономических изображений.* В настоящее время в разных диапазонах применяются альтернативные способы формирования изображений. Достаточно в этом отношении сравнить декаметровый, видимый и дальний рентгеновский диапазоны. В видимой области основным сейчас является единственный способ – с помощью фокусирующего элемента, зеркала или линзы.

Зеркало нового инструмента по своему размеру должно быть сравнимо с радиусом корреляции атмосферы, т. е. иметь небольшие размеры. Поэтому оно будет собирать мало света и иметь ограничения при наблюдении слабых объектов. Чтобы увеличить собираемый световой поток, потребуется много таких зеркал, т. е. инструмент должен быть многозеркальным. Речь идет не о той многозеркальности, которая присуща некоторым большим телескопам. В них зеркала образуют в совокупности единый объектив, который с точки зрения фазовых искажений мало отличается от сплошного. Речь идет о таком взаимодействии между элементами, при котором появляется новое качество. Со-

здание такого инструмента должно проходить с учетом теоремы ван Циттерта–Цернике: изображение объекта является фурье-образом функции когерентности волны, проходящей от объекта. Поэтому следует искать иной способ измерения функции когерентности, отличный от традиционного (косвенного) способа с помощью классического телескопа.

Ключ к такому способу предоставляет интерферометр Физо–Майкельсона (он же – звездный интерферометр Майкельсона) [21, 22]. Он позволяет измерять функцию когерентности в окне пространственных частот, определяемом диаметром его субапертур. Составив новый инструмент из достаточного числа таких интерферометров, можно покрыть передаваемыми им частотными окнами необходимую область пространственных частот. Однако такое решение является весьма неэкономным. Так, например, чтобы покрыть всю область частот, передаваемых двухметровым телескопом, с помощью интерферометров с диаметром субапертуры 20 см, потребовалось бы 100 интерферометров, т. е. 200 двадцатисантиметровых зеркал.

Новая идея была предложена в 1987 г. почти одновременно в [23] и в [24]. Она состоит в обобщении идеи Физо и построении многолучевого интерферометра, содержащего  $m$  субапертур, в котором все  $m$  световых потоков интерферируют в фокальной плоскости одновременно. В таком интерферомет-

ре каждый световой поток интерферирует с каждым, и открывается возможность с помощью  $m$  субапертур передать  $m(m-1)/2$  частотных окон, которыми не составит труда покрыть требуемую область пространственных частот. Для этого неплохо было бы иметь безызыточную конфигурацию – идея, предложенная в [25] и развитая в [26]. Однако, как было показано Л. Е. Копиловичем [27], безызыточная конфигурация не может полностью покрыть частотную область, передаваемую телескопом того же размера. Поэтому апертура интерферометра, полностью покрывающая требуемую частотную область, с неизбежностью будет избыточной, т. е. одно и то же частотное окно будет передаваться многократно разными парами субапертур, результаты будут суммироваться, и возникнет проблема разделения окон интерферограммы. Эта проблема в [23] и [24] решается путем перископического преобразования апертуры. При этом частотное окно, передаваемое парой субапертур, смещается в частотной плоскости так, чтобы оно не перекрывалось с другими частотными окнами.

2.6. *Анализ и проверка метода с помощью компьютерного моделирования.* Таким образом, мы пришли к новому методу формирования изображения, основанному на применении схемы многолучевого интерферометра [28]. Отличие данного метода от предложенного ранее состоит в том, что жесткая связь между неизвестными фазами и их искажениями, определяемая переопределенной системой уравнений, в данном случае не используется. Вместо этого используется накопление полных фаз, которое, однако, теперь применяется не к последовательности изображений, сформированных традиционным телескопом, а к последовательности интерферограмм (рис. 2). Также возможно использование полных фаз совместно с решением системы уравнений [28]. Однако в настоящее время это вряд ли осуществимо практически ввиду большой сложности необходимых для этого вычислений.

Описанные выше идеи и теоретические результаты были проверены на компьютерной модели [28]. Был смоделирован интерферометр, входная апертура которого пред-

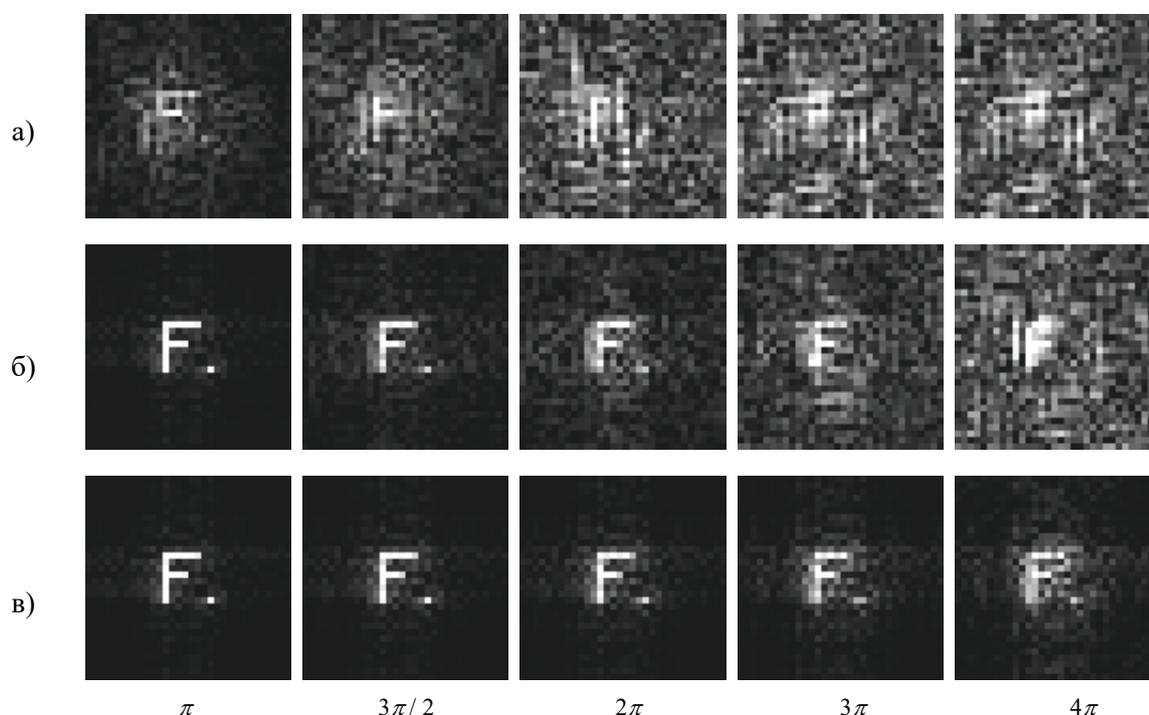


Рис. 2. Изображения, реконструированные методом накопления полных фаз при использовании телескопа со сплошной апертурой (а), многолучевого интерферометра (б) и многолучевого интерферометра с применением адаптивной коррекции наклона фазового фронта на субапертурах (в) при отношении диаметра апертуры к характерному размеру неоднородностей равном 3 и различных значениях среднеквадратичного отклонения фазовых искажений (подписаны внизу)

ставляла собой периметр квадрата  $4 \times 4$  и содержала 12 субапертур. Результаты подтвердили, что при использовании интерферометрической схемы формирования изображения граница применимости метода накопления полных фаз действительно отодвигается и определяется теперь отношением  $d/l$ , где  $d$  – диаметр субапертуры.

**2.7. Интерферометр и адаптивная оптика.** При больших наклонах фазового фронта световые потоки от разных субапертур не будут складываться, и между ними не будет происходить интерференция. Таким образом, интерферометр не будет давать информацию о фурье-компонентах из данного частотного окна. В этом случае помощь может оказать адаптивное отслеживание наклона фронта волны при помощи зеркала с управляемым наклоном. Это будет адаптивная система первого порядка. Такое сочетание многозеркального телескопа, адаптивной оптики и накопления фаз было смоделировано и оказалось весьма эффективным [28].

**2.8. Наблюдение в нескольких длинах волн.** При одновременном наблюдении объекта в нескольких длинах волн открываются новые возможности метода [29]. Пусть наблюдение ведется на волнах  $\lambda$  и  $2\lambda$ . При одном и том же состоянии атмосферы фазовое искажение обратно пропорционально длине волны. Если на волне  $2\lambda$  среднеквадратичное фазовое искажение равно  $\pi$ , значит, методом накопления полных фаз на волне  $2\lambda$  можно получить хорошее изображение. При этом на волне  $\lambda$  такой возможности нет. Реконструировав изображение на волне  $2\lambda$  и решая обратную задачу свертки с изображением в качестве ядра, можно найти (приблизленно) атмосферное ядро  $g_i(x, y)$ . Пользуясь механизмом, описанным в п. 2.3, по этому ядру можно определить породившее его фазовое искажение на волне  $2\lambda$ , и, умножая его на 2, получить фазовое искажение на волне  $\lambda$ . Отсюда легко найти ядро  $g_i(x, y)$  на волне  $\lambda$  и восстановить изображение винеровским фильтром. Данную возможность еще предстоит исследовать.

**2.9. Система моделирования получения астрономических изображений и их обработки.** В описанных выше экспериментах широко применялось компьютерное модели-

рование. Первый вариант системы, разработанной для этих целей в отделе квантовой электроники и нелинейной оптики ИРЭ НАНУ, был создан с использованием стандартных средств языка *Algol 68*. Однако подобное моделирование требует большого объема вычислений. Так, для моделирования получения одного изображения, начиная с момента генерации случайной последовательности, необходимо выполнить шесть преобразований Фурье над кадрами в полном разрешении. Моделирование последовательности кадров с корреляцией во времени является еще более затратным. Для решения этих проблем была разработана более эффективная система с использованием низкоуровневых средств [30].

Тем не менее, этим развитие системы моделирования астрономических изображений не закончилось. Как известно, современные графические вычислители отлично справляются с большим набором одинаковых инструкций [31]. В частности, положительных результатов удается добиться при распараллеливании вычисления преобразования Фурье. Поэтому многие задачи моделирования сейчас решаются с помощью графических вычислителей, и было бы ошибкой не использовать их в нашей системе моделирования.

С целью определения эффективности использования графических вычислителей при моделировании астрономических наблюдений была проведена работа по сравнительной оценке скорости работы преобразования Фурье, реализованного различными способами [32]. Результаты показали, что при работе с кадрами разрешением  $1024 \times 1024$  и выше использование даже самых простых графических вычислителей обеспечивает заметный выигрыш во времени вычисления по сравнению с центральным процессором. В результате была начата работа по переносу средств моделирования на новую базу. На текущий момент в исследованиях используется как система моделирования на *CPU* [30], так и система, взаимодействующая с *GPU*.

**2.10. Исследование генератора псевдослучайных чисел.** Программа моделирования атмосферных искажений использует в своей работе генератор псевдослучайных чисел. Для получения адекватных результатов моделирования в первую очередь необходимо

убедиться в соответствии генератора (созданного ранее в ИРЭ НАНУ) предъявляемым требованиям. Проверке подлежали: равномерность распределения, отсутствие периодического повторения одного и того же отрезка последовательности, отсутствие корреляции с соседними и близко расположенными числами, равномерность распределения битов в числе и отсутствие корреляции между соседними битами. Результаты проверки оказались удовлетворительными. Общие соображения, лежащие в основе генератора, и результаты испытаний приведены в [33].

**3. Определение рельефа участка поверхности планеты по его изображениям.** Было время, когда поверхность планет можно было исследовать только путем астрономических наблюдений. Единственная возможность определения рельефа поверхности планеты могла быть основана только на использовании ее изображений. Требовался математический метод определения рельефа поверхности по ее изображениям. Такой метод предложил ван Диггелен [34] в 1950 г. Позже он был назван фотоклинометрическим методом. Этот метод основан на том, что яркость элемента поверхности, освещенной Солнцем, зависит от ориентации этого элемента. Это открывает возможность определения наклона поверхности в каждой ее точке. Тогда первоначальная задача сводится к задаче определения рельефа поверхности  $H(x, y)$  по ее полю наклонов  $t(x, y)$ . Поскольку наклон – это двумерный градиент высоты поверхности, задача состоит в решении дифференциального уравнения первого порядка для  $H(x, y)$

$$\nabla H(x, y) = t(x, y). \quad (3)$$

Эта задача не составляет трудностей и считалась решенной.

С наступлением космической эры открылась возможность прямого альтиметрического исследования рельефа. Но не следует думать, что эта возможность обесценивает фотоклинометрический метод.

Чтобы построить карту района, нужно покрыть альтиметрическими измерениями весь район. Если необходимо получить карту с высоким разрешением, диаграмма направленности альтиметра должна быть достаточно узкой. Это требует большого числа изме-

рений и делает альтиметрию района трудно-выполнимой. В противоположность этому фотоклинометрический метод требует всего двух-трех изображений, которые совсем не трудно получить.

Однако, как было со временем замечено, этот метод содержал недостаток, потребовавшее дальнейшего его развития.

**3.1. Несовершенство метода ван Диггелена.** Решение уравнения (3) получается интегрированием поля наклонов по контуру от некоторой начальной точки до текущей точки  $(x, y)$ . Однако оказывается, что значение этого интеграла зависит от выбора пути интегрирования. Это связано с тем, что поставленная задача является некорректной по Адамару. Уравнение (3) написано в предположении, что  $t$  не содержит погрешностей измерения. В реальном же случае  $t$  является набором данных, содержащих погрешность, неизбежную в мире физических измерений. Истинный наклон является градиентом и поэтому, согласно теореме векторной алгебры, его ротор равен нулю. В то же время добавляемая к  $t$  погрешность с вероятностью 1 имеет ротор, отличный от нуля. В результате уравнение (3) с реальными данными в правой части с вероятностью 1 не имеет решения. При попытке «насиленно» выполнить процедуру решения это оборачивается неоднозначностью получаемого результата.

**3.2. Корректное решение математической задачи.** Как уже говорилось выше, в таких случаях целесообразно использовать статистический подход. С его позиций задачу следует ставить так: найти рельеф, наиболее вероятный при заданных результатах измерения  $t$ .

Для простейшего случая, когда задано поле  $t$ , найденное по исходным изображениям, статистический подход приводит к уравнению Пуассона (3).

$$\Delta H(x, y) = \nabla t(x, y). \quad (4)$$

Этот результат можно получить формально просто дифференцированием (3). Эта задача была поставлена и решена в [35].

Позже, в 1994 г., эта задача была решена в более общем виде: найти рельеф непосредственно по изображениям вместе с неизвестными фотометрическими параметрами поверхности [36]. Конечно, определение неиз-

вестных параметров требует дополнительной информации. Это увеличивает необходимое число исходных изображений. Погрешности метода исследованы в [37].

**3.3. Совмещение изображений.** При совместной обработке нескольких изображений возникает проблема их привязки к единой системе координат. Фотоклинометрический метод требует, чтобы они были получены при разных условиях освещения. Поэтому при определении рельефа вопрос о совмещении стоит особенно остро.

Было бы лучше совмещать кадры не по яркости, а по функции  $H(x, y)$ , поскольку подразумевается, что она одна и та же на всех кадрах. Однако к моменту совмещения рельеф еще не известен. Было бы хорошо найти какое-нибудь компромиссное решение, дающее процедуру, может быть, не очень точную, но зато достаточно простую.

**3.4. Определение рельефа по одному изображению.** Поскольку наклон поверхности – вектор, имеющий две компоненты, для однозначного его определения требуются два изображения. Одно изображения недостаточно для однозначного решения детерминированной задачи определения поля наклонов. Поэтому задача, сформулированная в заго-

ловке, на первый взгляд кажется безнадежной. Дело, однако, выглядит иначе, если учесть, что мы ставим статистическую задачу, в которой фигурирует априорное распределение искомого рельефа, содержащее определенную априорную информацию о нем.

В публикациях по фотоклинометрическому методу [36, 38, 39] мы подчеркивали, что статистический подход позволяет успешно решить задачу по любому количеству изображений, т. е. независимо от того, определена ли она точно, переопределена или недоопределена. В случае недоопределенной задачи на помощь приходит информация, содержащаяся в априорном распределении рельефа. Иначе говоря, задача найти наиболее вероятный рельеф имеет смысл и решение при любом, избыточном или недостаточном, наборе исходных изображений.

Эта возможность была испытана на практике. При использовании только одного исходного изображения получаются результаты, не очень точные, но вполне пригодные для успешного решения задачи совмещения [40]. На рис. 3 показан пример восстановления рельефа участка Марса по одному изображению [39], полученному космическим аппаратом «Марс Экспресс».

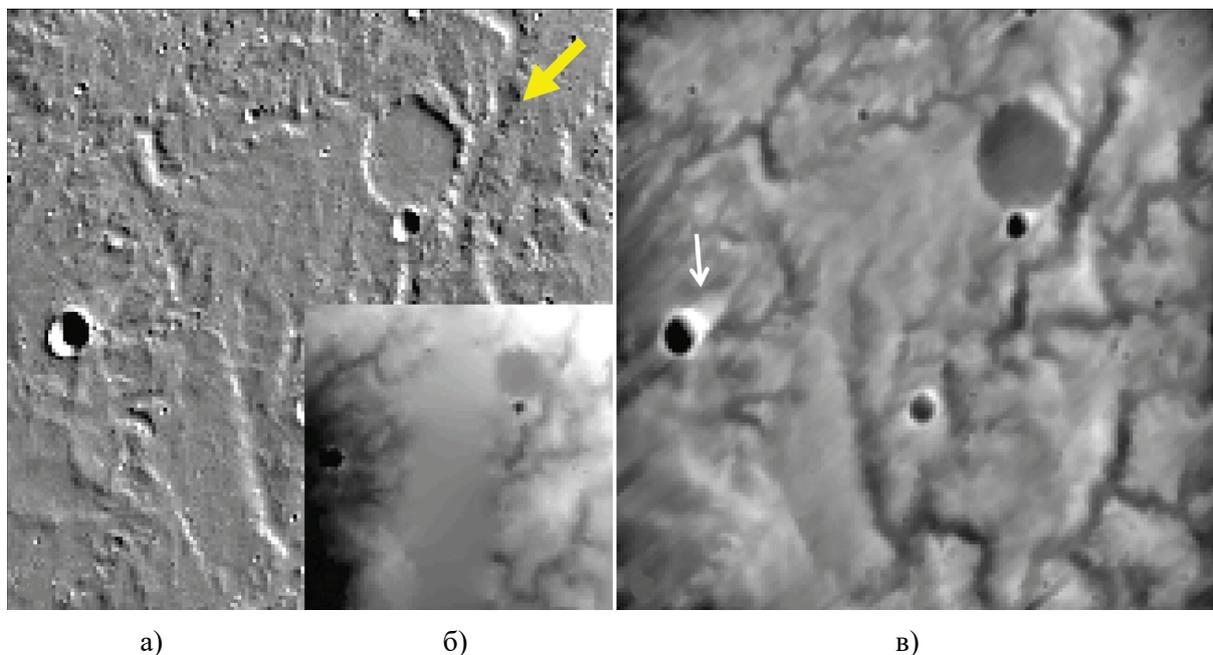


Рис. 3. Участок поверхности Марса, ограниченный координатами  $88,5^{\circ}$ – $89,5^{\circ}$ Е и  $2167^{\circ}$ – $2264^{\circ}$ S: фрагмент HRSC изображения *h0561-0000-s1* (а), топографическая карта (б), восстановленный рельеф (в). Толстой стрелкой показано направление освещения (а), тонкой – погрешности, вызванные условиями недостатка информации (в)

Крупномасштабные детали вычисленного рельефа (рис. 3, в) хорошо совпадают с данными альтиметра *MOLA* (космический аппарат “*Mars Global Surveyor*”), см. рис. 3, б, и, в том числе, восполняют недостающие детали.

На рис. 4 и 5 показаны, соответственно, результаты восстановления рельефа участков

поверхности Марса [41] и Луны [39]. В первом случае были использованы два исходных изображения и предполагалось постоянное альbedo поверхности. Во втором – использовались четыре исходных изображения [42], что позволило, кроме высот поверхности, определить и ее альbedo (см. рис. 5, в).

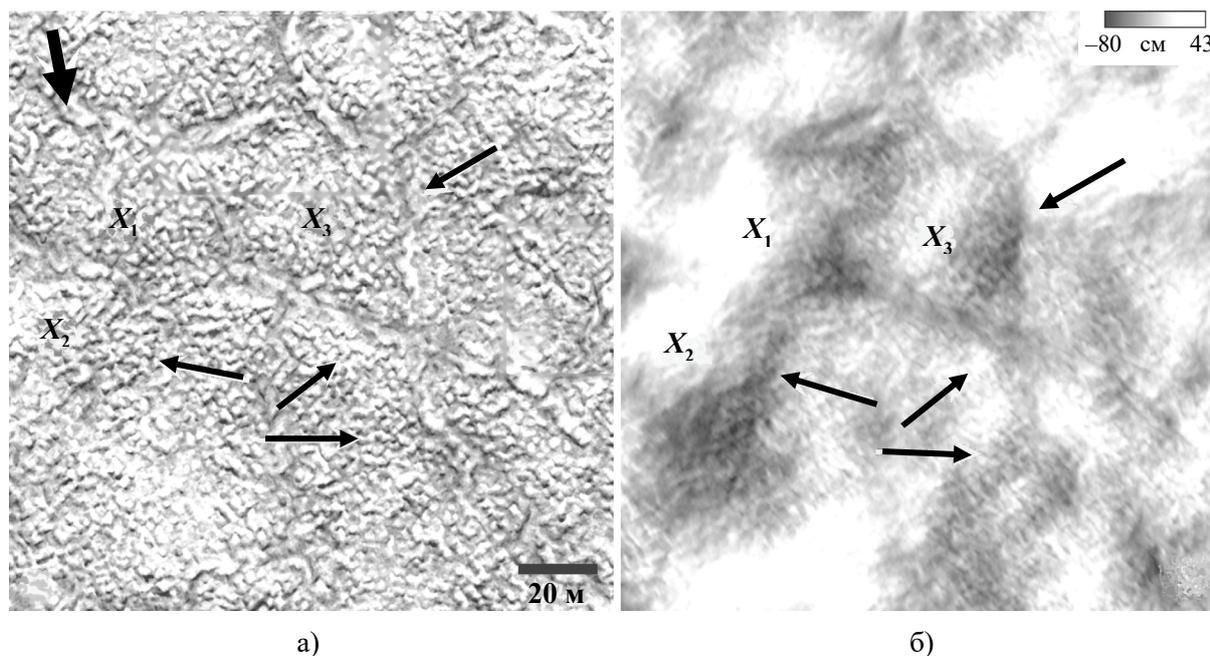


Рис. 4. Рельеф участка ( $190 \times 190$  м) поверхности Марса, расположенного на расстоянии  $\sim 640$  м от места посадки космического аппарата *Phoenix*: одно из исходных изображений (фрагмент снимка *HiRISE* “*PSP\_008591\_2485*”) (а); вычисленный рельеф (б). Направление освещения показано толстой стрелкой (а).  $X_1 - X_3$  обозначают крупные «полигоны», а тонкими стрелками показаны «борозды»

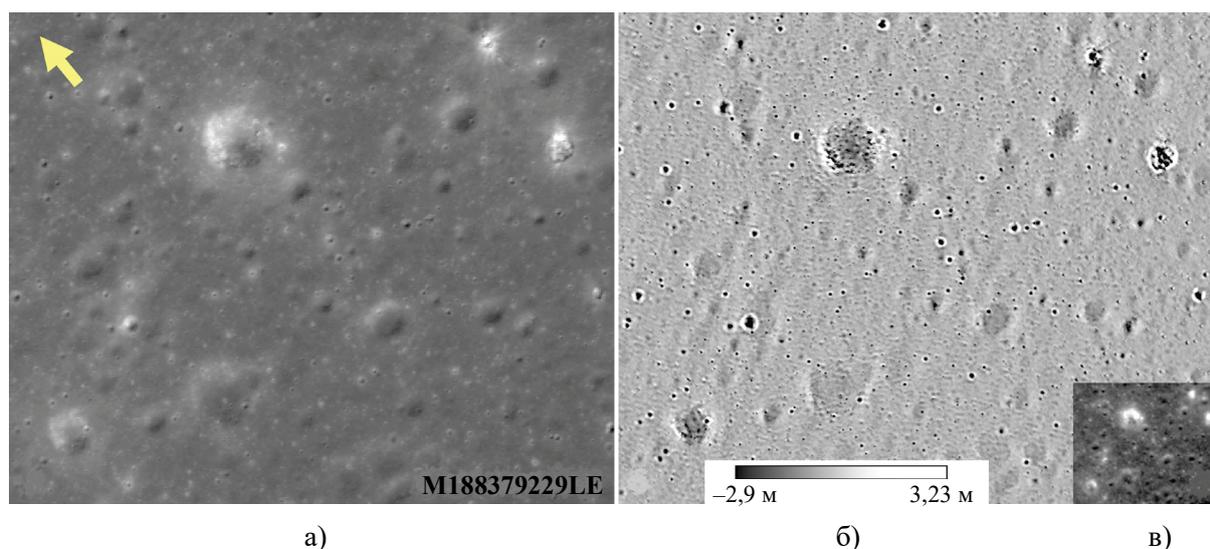


Рис. 5. Рельеф участка ( $2,55 \times 2,1$  км) лунной поверхности в Море Дождей; координаты центра  $32,56^\circ\text{N}$  и  $340,17^\circ\text{E}$ : одно из 4-х исходных изображений (а), вычисленный рельеф (б), альbedo поверхности (среднее значение – 0,045, диапазон изменений 0,033...0,075) (в). Направление освещения показано стрелкой

3.5. *Учет альтиметрической информации при определении рельефа фотоклинометрическим методом.* Сопоставляя альтиметрический метод определения рельефа с фотоклинометрическим, мы находим, что каждый из них имеет преимущества, недоступные другому. Главным, пожалуй, является то, что альтиметрический метод является по своей сути последовательным, в нем высоты точек измеряются последовательно одна за другой, и при большом числе точек это занимает много времени. В то же время изображения для фотоклинометрического метода обычно получают параллельно, т.е. яркости всех точек кадра измеряются одновременно. Это является преимуществом фотоклинометрического метода. Главным же его недостатком является зависимость точности определения рельефа от точности фотометрии. Сюда же можно отнести необходимость иметь определенные знания об оптических свойствах поверхности, которые для альтиметрии совершенно излишни.

К этому необходимо добавить, что альтиметрия определяет абсолютные значения высоты, в то время как рельеф, найденный фотоклинометрическим методом, содержит в себе неизвестную константу (константу интегрирования).

Было бы хорошо найти комбинированный метод, который сочетал бы в себе лучшие черты обоих методов. На эту цель и были направлены в последнее время наши исследования. В двух следующих параграфах описываются два варианта такого сочетания.

3.6. *Вариант с широкой диаграммой альтиметра.* Диаграмма направленности альтиметра может быть широкой и узкой. Диаграмму будем называть широкой, если ею можно последовательно покрыть исследуемый район за приемлемое время. Иначе будем считать ее узкой.

Пусть в ходе исследования района получают необходимые изображения района и производится сканирование района альтиметром, в результате которого получается искомый рельеф  $H(x, y)$ , свернутый с диаграммой направленности альтиметра. Требуется найти такой рельеф, который в свете получения этих данных имеет наибольшую апостериорную плотность вероятности. Задача приводит к линейному фильтру, очень

похожему на винеровский и отличающемся от него только видом искажающего оператора [29].

3.7. *Вариант с узкой диаграммой альтиметра.* Случай узкой диаграммы, когда весь район полностью покрыть альтиметрическими измерениями не удастся, оказывается в математическом отношении намного более сложным. Однако существует предельный случай, в котором задача решается легко. Пусть диаграмма альтиметра настолько узкая, что ее шириной можно пренебречь. Пусть при этом точность альтиметрии так высока, что погрешностью тоже можно пренебречь. Тогда задача по-прежнему сводится к уравнению Пуассона (3), но теперь с дополнительным граничным условием: искомый рельеф  $H(x, y)$  в точках альтиметрического измерения равен результату измерения. Эта задача выглядит весьма сложной при аналитическом рассмотрении, но легко решается численно методом сеток [29, 43–45].

4. *Другие задачи.* Кроме описанных выше основных направлений, связанных с оптимальным статистическим оцениванием объекта по наблюдательным данным, велись и другие работы, прямо или косвенно с ними связанные. Остановимся на некоторых из них подробнее.

4.1. *Диагностика атмосферы.* Выше речь шла о применении интерферометра для получения изображения объекта. Однако в систему уравнений для фаз фурье-компонент изображения на равных правах входят и фазовые искажения на субапертурах. Определение их входит в процедуру реконструкции изображения. Поэтому можно ставить задачу определения мгновенного состояния атмосферы по интерферограмме. Этому посвящены работы [49], где показано, что описанная выше процедура имеет смысл, если характерный размер атмосферных неоднородностей соизмерим с диаметром субапертур либо превышает его. Также восстановить поле фазовых искажений можно, применив описанную в [13, 14] процедуру для реконструкции комплексной функции в предположении, что искажению подвергается только фаза волны (см. п. 2.2). Успех такого эксперимента продемонстрирован в [50].

4.2. *Наблюдение объекта сквозь гравитационное поле удаленной галактики.* При

наблюдении удаленных объектов в астрономии может случиться ситуация, когда между наблюдаемым объектом и наблюдателем на пути следования фотонов встречаются объекты чрезвычайно большой массы (например, галактики). В этом случае наблюдается явление искривления световых лучей под действием гравитационного поля, которое получило название гравитационное линзирование. При наблюдении возникает задача разделения изображения наблюдаемого в таких условиях объекта и изображения галактики. Поскольку на таких расстояниях удаленный объект предстает как яркий точечный источник, задачу эту можно сформулировать как определение интенсивности точечного источника (переменной во времени), наблюдаемого на фоне протяженного источника. В работах [51, 52] была показана теоретическая возможность решения этой задачи в некоторых частных случаях, а в [53] выводы теории были проверены с помощью компьютерного эксперимента.

**4.3. Методы формирования антенных конфигураций.** Если апертура состоит из небольшого числа субапертур, оптимизировать ее по заданным параметрам не составит труда. Однако по мере роста числа субапертур задача становится все более трудоемкой и перерастает в задачу компьютерного синтеза антенной конфигурации с заданными свойствами. Эти работы выполнялись в нашем подразделении с 1990-х гг. Они велись в двух направлениях: поиск регулярных методов синтеза (Л. Е. Копилович, [54]) и развитие метода случайного поиска [55, 56]. При размере решетки меньше 20–30 шагов лучшие результаты, как правило, давал случайный поиск, позволявший находить рекордные конфигурации, недоступные регулярным методам. Однако при дальнейшем увеличении размеров решетки случайный поиск занимает слишком много времени, в то время как регулярные методы по-прежнему сохраняли свою эффективность. Разработки в области регулярных методов Л. Е. Копиловича опубликованы в нескольких десятках статей и двух монографиях [57–60].

**Выводы.** Подводя итоги работы за последние 10 лет, следует отметить, что во всех направлениях научной деятельности был достигнут заметный прогресс. В основе методов обработки результатов астрономических

наблюдений, развиваемых коллективом, лежит статистический подход как к постановке задачи, так и к ее решению. В отношении задачи наблюдения объекта сквозь атмосферу Земли это позволило разработать совершенно новый метод накопления полных фаз, пригодный для использования как при наблюдении с помощью традиционного телескопа, так и при интерферометрическом способе формирования изображений. На очереди исследования орбитальных наблюдательных инструментов, где также присутствуют факторы, вызывающие случайные искажения на апертуре. В определение рельефа поверхности безатмосферной планеты разработанным ранее фотоклинометрическим методом также был сделан существенный вклад. Разработанный метод учета альтиметрической информации был применен к результатам реальных наблюдений, что позволило получить рельеф с высоким разрешением и абсолютными значениями высот.

Однако в тематику максимального извлечения информации из результатов астрономических наблюдений вписываются отнюдь не все работы, которые проводились в отделе. В соответствии с названием отдела, в подразделении 33/2 проводились также исследования, связанные с задачами квантовой электроники. Работы Г. А. Алексеева и Л. В. Стуловой [61–64] посвящены задачам, связанным с физикой магнетрона и клинотрона. Исследования, связанные с использованием метода Крылова–Боголюбова–Митропольского в задачах СВЧ-электроники, где необходимы высокие приближения (нелинейные резонансы высокого порядка, гармонический и субгармонический захват частоты, и т. д.), привели к созданию в среде “*Mathematica*” программы, способной относительно быстро решать одно обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка [65]. Например, уравнение ван дер Поля в двенадцатом приближении решается за несколько минут на *Pentium 4*, 2,4 ГГц.

#### Библиографический список

1. Laplace P. S. Memoire sur la probabilité des causes par les événements. *Oeuvres Complètes*. Vol. 8. Paris: Gauthier-villars, 1891. P. 27–65.
2. Legendre A. M. *Nouvelles methodes pour la determination des orbites des cometes*. Second supplement. Paris, 1820. P. 79–80.

3. Гаусс К. Ф. Теория движения небесных тел, вращающихся вокруг Солнца по коническим сечениям. *Избранные геодезические сочинения*. Под общ. ред. С. Г. Сударова. Пер. с лат. и нем. Н. Ф. Булаевского. М.: Изд-во геодезической лит., 1957. Т. 1. С. 104.
4. Gauss C. F. *Werke*. Vol. 8. Göttingen, 1900. S. 116–147.
5. Вальд А. Статистические решающие функции. *Позиционные игры*. М.: Наука, 1967. С. 300–522.
6. Де Гроот М. *Оптимальные статистические решения*. Пер. с англ. А. Л. Рухина. М.: Мир, 1974. 491 с.
7. Усиков А. Я., Акимов Л. А., Бабичев А. А., Бугаенко Л. А., Бугаенко О. И., Дзюбенко М. И., Дудинов В. Н., Егоров А. Д., Еремка В. Д., Корниенко Ю. В., Кругов В. Д., Нестриженко Ю. А., Парусимов В. Г., Старунов Н. Г. Светолокация поверхности луны с помощью рубинового лазера. *Радиофизика и электрон.*: сб. науч. тр. Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. Харьков, 2004. Т. 9, спец. вып. С. 10–41.
8. Корниенко Ю. В. Оптимальный прием сигнала при светолокации астрономического объекта. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2004. № 1. С. 39–45.
9. Колмогоров А. Н. *Основные понятия теории вероятности*. М.-Л.: ОНТИ, 1936. 80 с.
10. Колмогоров А. Н. Локальная структура турбулентности в несжимаемой жидкости при очень больших числах Рейнольдса. *Докл. АН СССР*. 1941. Т. 30, № 4. С. 299–303.
11. Колмогоров А. Н. Рассеяние энергии при локально изотропной турбулентности. *Докл. АН СССР*. 1941. Т. 32, № 1. С. 19–21.
12. Labeurie A. Attainment of diffraction limited resolution in large telescopes by fourier analysing speckle patterns in star images. *Astron. Astrophys.* 1970. Vol. 6, N 1. P. 85–87.
13. Fienup J. R. Reconstruction of an object from the modulus of its Fourier transform. *Opt. Lett.* 1978. Vol. 3, Iss. 1. P. 27–29. DOI:https://doi.org/10.1364/OL.3.000027
14. Корниенко Ю. В. О возможности восстановления изображения слабого объекта, искаженного влиянием земной атмосферы. *Докл. АН УССР. Сер. А*. 1977. № 10. С. 931–933.
15. Корниенко Ю. В., Скуратовский С. И. О реконструкции изображения объекта по модулю его фурье-образа. *Радиофизика и электрон.*: сб. науч. тр. Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. Харьков, 2008. Т. 13, № 1. С. 130–141.
16. Содин Л. Г. О возможности достижения дифракционного предела разрешения при работе телескопа в турбулентной атмосфере. *Письма в астрономический журн.* 1976. Т. 2. С. 554–558.
17. Корниенко Ю. В., Скуратовский С. И. О реконструкции неискаженного изображения объекта по серии его изображений, искаженных средой со случайными неоднородностями показателя преломления. Доп. НАН України. 2010. № 2. С. 83–89.
18. Корниенко Ю. В., Скуратовский С. И. Накопление фаз фурье-компонент при наблюдении сквозь турбулентную атмосферу. I. *Кинематика и физика небесных тел*. 2011. Т. 27, № 6. С. 52–63.
19. Корниенко Ю. В., Скуратовский С. И. Накопление фаз фурье-компонент при наблюдении сквозь турбулентную атмосферу II. *Кинематика и физика небесных тел*. 2012. Т. 28, № 2. С. 45–58.
20. Корниенко Ю. В., Скуратовский С. И. Механизм разрушения информации при наблюдении сквозь неоднородную среду. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2012. Т. 17, № 1. С. 39–48.
21. Fizeau M. H. Recherches sur les modifications que subit la vitesse de la lumiere dans le verre et plusieurs autres corps solides sous l'influence de la chaleur. *Annales de chimie et de physique*. 1862. Vol. 66. P. 429–482.
22. Michelson A. A. On the application of interference methods to astronomical measurements. *Philosophical magazine*. Ser. 5. 1890. Vol. 30, Iss. 182. P. 1–21.
23. 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.
24. Roddier F. Redundant versus nonredundant beam recombination in an aperture synthesis with coherent optical arrays. *J. Opt. Soc. Am. A*. 1987. Vol. 4, N 8. P. 1396–1401. DOI:https://doi.org/10.1364/JOSAA.4.001396
25. Rhodes W. T., Goodman J. W. Interferometric technique for recording and restoring images by unknown aberration. *J. Opt. Soc. Am.* 1973. Vol. 63, N 6. P. 647–657. DOI:https://doi.org/10.1364/JOSA.63.000647
26. 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.
27. Kopilovich L. E. Construction of non-redundant masks over square grids using difference sets. *Opt. Commun.* 1988. Vol. 68, N 1. P. 7–10. DOI:https://doi.org/10.1016/0030-4018(88)90003-X
28. Корниенко Ю. В., Скуратовский С. И. Накопление фаз фурье-компонент при наблюдении сквозь турбулентную атмосферу. III. *Кинематика и физика небесных тел*. 2013. Т. 29, № 2. С. 69–80.
29. Корниенко Ю. В., Скуратовский С. И., Копилович Л. Е., Луценко В. И., Масалов Д. С., Бондаренко Н. В., Дулова И. А., Дудинов В. Н., Пугач В. В., Мазуренко О. В., Ло Иян, Стулова Л. В. Развитие методов и средств оптики и квазиоптики для установления закономерностей и особенностей взаимодействия терагерцевого излучения с физическими и биологическими объектами: отчет по НИР «ОРЕОЛ». Кн. 2. Ин-т радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины; рук. М. И. Дзюбенко. Харьков, 2016. 345 с. № ГР 0111U010479.
30. Корниенко Ю. В. Обработка изображений в ИРЭ НАН Украины. *Радиофизика и электрон.*: сб. науч. тр. Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. Харьков, 2008. Т. 13, спец. вып. С. 423–445.
31. Sanders J., Kendrot E. *CUDA by example*. Moscow: DMK press, 2013. 232 p.
32. Lyashenko I., Skuratovskiy S. I., Kornienko Yu. V., Dulova I. A., Pugach V. V., Stulova L. V. On the possibility of image processing acceleration with the graphic processing unit. *2016 II Int. Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*. Kharkiv, Ukraine, 10–14 Oct. 2016. IEEE. DOI:https://doi.org/10.1109/YSF.2016.7753840
33. Lyashenko I., Kornienko Yu. V. Studying a Simple Generator of Pseudo-Random Numbers for Modeling the Astronomical Observation System. *2017 IEEE Int. Young Scientists Forum on Applied Physics and Engi-*

- neering (YSF). Lviv, Ukraine, 17–20 Oct. 2017. IEEE. DOI:https://doi.org/10.1109/YSF.2017.8126645
34. Van Diggelen J. A photometric investigation of the slopes and the heights of the ranges of hills in the Maria of the Moon. *Bull. Astron. Inst. Neth.* 1951. Vol. 11, N 423. P. 283–289.
  35. Парусимов В. Г., Корниенко Ю. В. Об отыскании наиболее вероятного рельефа поверхности планеты по ее оптическому изображению. *Астрометрия и астрофизика.* 1973. Вып. 19. С. 20–24.
  36. 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. Т. 10, № 5. С. 69–76.
  37. Дулова И. А., Корниенко Ю. В. Случайная погрешность определения рельефа поверхности по ее радиояркости. *Радиофизика и радиоастрономия.* 2001. Т. 6, № 4. С. 310–316.
  38. Дулова И. А., Корниенко Ю. В., Скуратовский С. И. Определение рельефа поверхности клинометрическим методом при избытке или недостатке исходных данных. *Радиофизика и электрон.*: сб. науч. тр. Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. Харьков, 2007. Т. 12, № 2. С. 408–415.
  39. Дулова И. А., Скуратовский С. И., Бондаренко Н. В., Корниенко Ю. В. Восстановление рельефа поверхности по одиночным изображениям с помощью фотометрического метода. *Астрономический вестник.* 2008. Т. 42, № 6. С. 555–569.
  40. Дулова И. А., Корниенко Ю. В., Скуратовский С. И. Совмещение изображений при определении рельефа поверхности фотокинометрическим методом. *Радиофизика и радиоастрономия.* 2015. Т. 20, № 1. С. 30–36. DOI:https://doi.org/10.15407/rpra20.01.030
  41. Бондаренко Н. В., Дулова И. А., Корниенко Ю. В. Топография полигональных структур на Марсе в месте посадки КА «Phoenix» по результатам вычисления рельефа с помощью метода улучшенной фотокинометрии по изображениям HIRISE. *Астрономический вестник.* 2014. Т. 48, № 4. С. 263–279. DOI:https://doi.org/10.1134/S0038094614040030
  42. Bondarenko N. V., Dulova I. A., Kornienko Yu. V. High-resolution albedo and relief of the lunar surface with the improved photogrammetry method for the topography reconstruction from a set of images. *49<sup>th</sup> Lunar and Planetary Science Conference (LPSC)* (The Woodlands, Texas, USA, 19–23 March 2018). LPI Contribution N 2459.
  43. Dulova I. A., Kornienko Yu. V. Photometric method for determining a planetary surface relief. *Int. Conf. "Solar system bodies: from optics to geology"*. Kharkov, Ukraine, 26–29 May 2008. P. 67–68.
  44. Dulova I. A., Kornienko Yu. V., Bondarenko N. V. Involvement of Altimetric Information into Relief Reconstruction from Images with Improved Photogrammetry. *The 50<sup>th</sup> Vernadsky/Brown Microsymposium on Comparative Planetology.* Moscow, Russia, 12–14 Oct. 2009. Abstr. N m50\_10.
  45. Dulova I. A., Kornienko Yu. V., Bondarenko N. V. Involvement of altimetric information into planet surface relief reconstruction from a set of images. *2010 Int. Kharkov Symp. Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'2010)* (Kharkov, Ukraine, 21–26 June 2010). DOI:https://doi.org/10.1109/MSMW.2010.5546107
  46. Bondarenko N. V., Dulova I. A., Kornienko Yu. V. Polygons on Mars: Topography details recovered from images with the improved photogrammetry method. *The Third Moscow Solar System Symposium (3M-S<sup>3</sup>).* (Moscow, Russia, 8–12 Oct. 2012). Moscow, 2012. Abstr. N PS-42.
  47. Bondarenko N. V., Dulova I. A., Kornienko Yu. V. Improved Photogrammetry Method: Topography of Large-Scale Polygons at the Phoenix Landing Site from a set of Images. *44<sup>th</sup> Lunar and Planetary Science Conference (LPSC)* (The Woodlands, Texas, USA, 18–22 March 2013). LPI Contribution N 1719. P. 2669.
  48. Bondarenko N. V., Dulova I. A., Kornienko Yu. V. Improved Photogrammetry Method: Topography of the Lunar Surface Area in Mare Imbrium from a Set of Images. *47<sup>th</sup> Lunar and Planetary Science Conference (LPSC)* (The Woodlands, Texas, USA, 21–25 March 2016). LPI Contribution N 1903. P. 1860.
  49. Корниенко Ю. В., Пугач В. В., Скуратовский С. И. О возможности диагностики состояния атмосферы с помощью многолучевого интерферометра. *Радиофизика и электрон.* 2014. Т. 5(19), № 2. С. 16–21.
  50. Скуратовский С. И. Восстановление поля фазовых искажений по изображению точечного источника. *Радиофизика и электрон.*: сб. науч. тр. Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. Харьков, 2009. Т. 14, № 2. С. 222–228.
  51. Корниенко Ю. В., Скуратовский С. И. Определение интенсивности точечного источника, наблюдаемого на фоне протяженного источника. *Радиофизика и радиоастрономия.* 2014. Т. 19, № 4. С. 317–323. DOI:https://doi.org/10.15407/rpra19.04.317
  52. Skuratovskiy S. I., Kornienko Yu. V. Determining the intensity of a point-like source, observed with an extended source as the background. *Int. Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF 2015).* Dnipropetrovsk, Ukraine, 29 Sept. – 2 Oct. 2015. IEEE. DOI:https://doi.org/10.1109/YSF.2015.7333256
  53. Skuratovskiy S. I., Kornienko Yu. V. Determining the intensity of a point-like source, observed with an extended source as the background: modeling and computer experiment. *9<sup>th</sup> Int. Kharkiv Symp. Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW).* (Kharkiv, Ukraine, 20–24 June 2016). IEEE. DOI:https://doi.org/10.1109/MSMW.2016.7538031
  54. Копилов Л. Е. Регулярный метод построения систем безыбыточных апертурных масок для наблюдения сквозь турбулентную атмосферу. *Докл. АН УССР. Сер. А.* 1983. № 10. С. 55–58.
  55. Корниенко Ю. В. Построение безыбыточных антенных конфигураций на квадратной решетке методом случайного поиска. *Радиофизика и электрон.*: сб. науч. тр. Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. Харьков, 2000. Т. 5, № 3. С. 148–154.
  56. Корниенко Ю. В. Построение безыбыточных антенных конфигураций на гексагональной решетке методом случайного поиска. *Радиофизика и электрон.*: сб. науч. тр. Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. Харьков, 2002. Т. 7, № 1. С. 142–153.

57. Kopilovich L. E., 2008. Array antennas of size  $8 \times 8$  based on Hadamard difference sets. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2008. Т. 13, № 2. С. 210–215.
58. Kopilovich L. E. Upper Estimates for the Element Number of Non-redundant Antenna Configurations on Square and Hexagonal Grids. *Exp. Astron.* 2010. Vol. 28, N 1. P. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10686-010-9191-4>
59. Копилович Л. Е. Безызбыточные конфигурации элементов на квадратных и гексагональных решетках больших размеров. *Радиофизика и электроника*. 2014. Т. 5(19), № 1. С. 80–84.
60. Kopilovich L. E., Sodin L. G. *Multielement System Design in Astronomy and Radio Science*. Springer, 2014. 204 p.
61. Алексеев Г. А., Стулова Л. В. Об эстафетном взаимодействии ленточного электронного потока с бегущей волной при наличии поперечного магнитного поля. *Радиофизика и электроника*. 2010. Т. 1(15), № 3. С. 30–34.
62. Алексеев Г. А., Стулова Л. В. Эксцентрический цилиндрический диод с током, ограниченным пространственным зарядом. *Радиофизика и электроника*. 2012. Т. 3(17), № 1. С. 85–91.
63. Алексеев Г. А., Стулова Л. В. Эстафетное взаимодействие в приборах СВЧ. *Радиофизика и электроника*. 2013. Т. 4(18), № 2. С. 77–85.
64. Alexeev G. A., Stulova L. V., Elementary theory of clinotron with distributed interaction of electron beam with orthogonal component of field. *24-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014)*. Севастополь, Украина, 7–13 сент. 2014: материалы конф. в 2 т. Севастополь: Вебер, 2014. Т. 1. С. 171–172.
65. Корниенко Ю. В., Масалов Д. С. Реализация метода Крылова–Боголюбова–Митропольского в системе компьютерной алгебры. *Физические основы приборостроения*. 2014. Т. 3, № 1. С. 70–83.
- Kornienko, Yu. V., Krugov, V. D., Nestrigenko, Yu. A., Parusimov, V. G., Starunov N. G., 2004. Light detection and ranging of the lunar surface using a ruby laser. In: V. M. Yakovenko, ed. 2004. *Radiofizika i elektronika*. Kharkov: IRE NAS of Ukraine Publ. **9**(spec. Iss.), pp. 10–41 (in Russian).
8. Kornienko, Yu. V., 2004. Optimal signal receiving in the visual range location of an astronomical object. *Achievements of Modern Radioelectronics*, 1, pp. 39–45 (in Russian).
9. Kolmogorov, A. N., 1936. *Basic concepts of the probability theory*. Moscow-Leningrad: ONTI Publ. (in Russian).
10. Kolmogorov, A. N., 1941. The local structure of the turbulence in an unsqueezable liquid in the case of very high Reynolds numbers. *Dok. Akad. Nauk SSSR*, **30**(4), pp. 299–303 (in Russian).
11. Kolmogorov, A. N., 1941. The energy dispersion in locally isotropic turbulence. *Dok. Akad. Nauk SSSR*, **32**(1), pp. 19–21 (in Russian).
12. Labeyrie, A., 1970. Attainment of diffraction limited resolution in large telescopes by fourier analysing speckle patterns in star images. *Astron. Astrophys.*, **6**(1), pp. 85–87.
13. Fienup, J. R., 1978. Reconstruction of an object from the modulus of its Fourier transform. *Opt. Lett.*, **3**(1), pp. 27–29. DOI: <https://doi.org/10.1364/OL.3.000027>
14. Kornienko, Yu. V., 1977. On the possibility of reconstructing the image of a faint object, distorted by the influence of the Earth's atmosphere. *Dok. Akad. Nauk Ukrainian SSR, Ser. A*, 10, pp. 931–933 (in Russian).
15. Kornienko, Yu. V., Skuratovsky, S. I., 2008. On the image reconstruction under its Fourier transform modulus. In: V. M. Yakovenko, ed. 2004. *Radiofizika i elektronika*. Kharkov: IRE NAS of Ukraine Publ. **13**(1), pp. 130–141 (in Russian).
16. Sodin, L. G., 1976. On the possibility of reaching the diffraction limit of the resolution in observation with a telescope in the turbulent atmosphere. *Astronomy Lett.* **2**, pp. 554–558 (in Russian).
17. Kornienko, Yu. V., Skuratovskiy, S. I., 2010. About the reconstruction of the undistorted image of an object by a series of its images distorted by a medium with random inhomogeneities of the refractive index. *Dopov. Nac. akad. nauk Ukr.*, 2, pp. 83–89 (in Russian).
18. Kornienko, Yu. V., Skuratovskiy, S. I., 2011. Fourier-component phase accumulation in observation of an object through a turbulent atmosphere: 1. *Kinematics Phys. Celestial Bodies*, **27**(6), pp. 304–310.
19. Kornienko, Yu. V., Skuratovskiy, S. I., 2012. Fourier-component phase accumulation in observation of an object through a turbulent atmosphere: II. *Kinematics Phys. Celestial Bodies*, **28**(2), pp. 77–84.
20. Kornienko, Yu. V., Skuratovskiy, S. I., 2012. Mechanism of information degradation in observations through a randomly inhomogeneous medium. *Radiophysics and radioastronomy*, **17**(1), pp. 39–48.
21. Fizeau, M. H., 1862. Recherches sur les modifications que subit la vitesse de la lumiere dans le verre et plusieurs autres corps solides sous l'influence de la chaleur. *Annales de chimie et de physique*, **66**, pp. 429–482.

## REFERENCES

1. Laplace, P. S., 1774. Memoire sur la probabilité des causes par les événements. In: *Oeuvres Complètes*, 1891. Vol. 8, pp. 27–65. Paris: Gauthier-villars.
2. Legendre, A. M., 1820. *Nouvelles methodes pour la determination des orbites des cometes*. Second supplement. Paris, pp. 79–80.
3. Gauss, C. F., 1957. The movement theory of celestial bodies, rotating around the Sun on conical orbits. In: C. F. Gauss, 1957. Chosen geodesic compositions. General ed. by S. G. Sudarov. Moscow: Izdatelstvo geodezicheskoy literature. Vol. 1, pp. 104. (in Russian)
4. Gauss, C. F., 1900. Werke. Göttingen. Vol. 8. S. 116–147.
5. Val'd, A., 1967. Statistical solving functions. In: A. Val'd, 1967. *Positional games*. Moscow: Nauka Publ. pp. 300–522 (in Russian).
6. De Groot, M., 1974. *Optimal statistical decisions*. Translated by A. L. Rukhin. Moscow: Mir Publ. (in Russian)
7. Usikov, A. Ya., Akimov, L. A., Babichev, A. A., Bugaenko, L. A., Bugaenko, O. I., Dzubenko, M. I., Dudinov, V. N., Egorov, A. D., Eremka, V. D.,

22. Michelson, A. A., 1890. On the application of interference methods to astronomical measurements. *Philosophical magazine*. Ser. 5, **30**(182), pp. 1–21.
23. Kornienko, Yu. V., Uvarov V. N., 1987. Signal accumulation in observation of an astronomical object through the turbulent atmosphere. *Dokl. AN UkrSSR. Ser. A*, **4**, pp. 60–63. (in Russian)
24. Roddier, F., 1987. Redundant versus nonredundant beam recombination in an aperture synthesis with coherent optical arrays. *J. Opt. Soc. Am. A*, **4**(8), pp. 1396–1401. DOI:<https://doi.org/10.1364/JOSAA.4.001396>
25. Rhodes, W. T., Goodman, J. W., 1973. Interferometric technique for recording and restoring images by unknown aberration. *J. Opt. Soc. Am.*, **63**(6), pp. 647–657. DOI:<https://doi.org/10.1364/JOSA.63.000647>
26. Uvarov, V. N., 1979. On the possibility of obtaining the diffraction-limited image in observation through an inhomogeneous medium. *Dokl. AN UkrSSR. Ser. A*, **10**, pp. 839–841 (in Russian).
27. Kopilovich, L. E., 1988. Construction of non-redundant masks over square grids using difference sets. *Opt. Commun.*, **68**(1), pp. 7–10. DOI:[https://doi.org/10.1016/0030-4018\(88\)90003-X](https://doi.org/10.1016/0030-4018(88)90003-X)
28. Kornienko, Yu. V., Skuratovskiy, S. I., 2013. Accumulation of Fourier-component phases during object observation through a turbulent atmosphere: III. *Kinematics Phys. Celestial Bodies*, **29**(2), pp. 69–80.
29. Kornienko, Yu. V., Skuratovskiy, S. I., Kopilovich, L. E., Lutsenko, V. I., Masalov, D. S., Bondarenko, N. V., Dulova, I. A., Dudinov, V. N., Pugach, V. V., Mazurenko, O. V., Lo, Ian, Stulova, L. V., 2016. Development of methods and means for the optics and the quasioptics to detect regularities and peculiarities of interaction between the terahertz radiation and both physical and biological objects: report on scientific-research project «OREOL». Book 2. Ya. Usikov IRE NAS of Ukraine. Reg. No. SR 0111U010479 (in Russian).
30. Kornienko, Yu. V., 2008. Image processing in IRE NAS of Ukraine. In: V. M. Yakovenko, ed. 2008. *Radiofizika i elektronika*. Kharkov: IRE NAS of Ukraine Publ. **13**(spec. iss.), pp. 423–445 (in Russian).
31. Sanders, J., 2013. *CUDA by example*. Moscow: DMK press.
32. Lyashenko I., Skuratovskiy S. I., Kornienko Yu. V., Dulova I. A., Pugach, V. V., Stulova, L. V., 2016. On the possibility of image processing acceleration with the graphic processing unit. In: *2016 II Int. Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*. Kharkiv, Ukraine, 10–14 Oct. 2016. IEEE. DOI:<https://doi.org/10.1109/YSF.2016.7753840>
33. Lyashenko, I., Kornienko, Yu. V., 2017. Studying a Simple Generator of Pseudo-Random Numbers for Modeling the Astronomical Observation System. *2017 IEEE Int. Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*. Lviv, Ukraine, 17–20 Oct. 2017. IEEE. DOI:<https://doi.org/10.1109/YSF.2017.8126645>
34. Van Diggelen, J., 1951. A photometric investigation of the slopes and the heights of the ranges of hills in the Maria of the Moon. *Bull. Astron. Inst. Neth.*, **11**(423), pp. 283–289.
35. Parusimov, V. G., Kornienko, Yu. V., 1973. On determination of the most probable relief of a surface region by its optical image. *Astrometriya i astrofizika*, **19**, pp. 20–24 (in Russian).
36. Kornienko, Yu. V., Dulova, I. A., Nguen, Suan Ahn, 1994. Viener approach to determining optical characteristics of a planet surface under the results of photometric observations. *Kinematika i fizika nebesnykh tel*, **10**(5), pp. 69–76 (in Russian).
37. Dulova, I. A., Kornienko, Yu. V., 2001. Random error of determining the surface relief under its radio brightness. *Radio phys. radio astron.*, **6**(4), pp. 310–316 (in Russian).
38. Dulova, I. A., Kornienko, Yu. V., Skuratovskiy, S. I., 2007. Determining of the surface relief with the clinometric technique in the redundancy and the lack of initial data. In: V. M. Yakovenko, ed. 2007. *Radiofizika i elektronika*. Kharkov: IRE NAS of Ukraine Publ. **12**(2), pp. 408–415 (in Russian).
39. Dulova, I. A., Skuratovsky, S. I., Bondarenko, N. V., Kornienko, Yu. V., 2008. Reconstruction of the surface topography from single images with the photometric method. *Sol. Syst. Res.*, **42**(6), pp. 522–535.
40. Dulova, I. A., Kornienko, Yu. V., Skuratovskiy, S. I., 2015. Images matching in case of surface relief reconstruction with the photoclinometric method. *Radio phys. radio astron.*, **20**(1), pp. 30–36. DOI:<https://doi.org/10.15407/rpra20.01.030>
41. Bondarenko, N. V., Dulova, I. A., Kornienko Yu. V., 2014. Topography of polygonal structures at the Phoenix landing site on mars through the relief retrieval from the HiRISE images with the improved photoclinometry method. *Sol. Syst. Res.*, **48**(4), pp. 243–258. DOI:<https://doi.org/10.1134/S0038094614040030>
42. Bondarenko, N. V., Dulova, I. A., Kornienko, Yu. V., 2018. High-resolution albedo and relief of the lunar surface with the improved photoclinometry method for the topography reconstruction from a set of images. In: *49<sup>th</sup> Lunar and Planetary Science Conference (LPSC)*. The Woodlands, Texas, USA, 19–23 March 2018. LPI Contribution N 2459.
43. Dulova, I. A., Kornienko, Yu. V., 2008. Photometric method for determining a planetary surface relief. In: *Int. conf. "Solar system bodies: from optics to geology"*, Kharkov, Ukraine, 26–29 May, 2008, pp. 67–68.
44. Dulova, I. A., Kornienko, Yu. V., Bondarenko, N. V., 2009. Involvement of Altimetric Information into Relief Reconstruction from Images with Improved Photoclinometry. In: *The 50<sup>th</sup> Vernadsky/Brown Microsymposium on Comparative Planetology*. Moscow, Russia, 12–14 Oct. 2009, abstr. N m50\_10.
45. Dulova, I. A., Kornienko, Yu. V., Bondarenko, N. V., 2010. Involvement of altimetric information into planet surface relief reconstruction from a set of images. In: *2010 Int. Kharkov Symp. Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'2010)*. Kharkov, Ukraine, 21–26 June 2010. DOI:<https://doi.org/10.1109/MSMW.2010.5546107>
46. Bondarenko, N. V., Dulova, I. A., Kornienko, Yu. V., 2012. Polygons on Mars: Topography details recovered from images with the improved photoclinometry method. In: *The Third Moscow Solar System Symposium (3M-S<sup>3</sup>)*. Moscow, Russia, 8–12 Oct. 2012, abstr. N PS-42.
47. Bondarenko, N. V., Dulova, I. A., Kornienko, Yu. V., 2013. Improved Photoclinometry Method: Topography of Large-Scale Polygons at the Phoenix Landing Site from a set of Images. In: *44<sup>th</sup> Lunar and Planetary Science Conference (LPSC)*. The Woodlands, Texas,

- USA, 18–22 March 2013. LPI Contribution N 1719. P. 2669.
48. Bondarenko, N. V., Dulova, I. A., Kornienko, Yu. V., 2016. Improved Photoclinometry Method: Topography of the Lunar Surface Area in Mare Imbrium from a Set of Images. In: *47<sup>th</sup> Lunar and Planetary Science Conference (LPSC)*. The Woodlands, Texas, USA, 21–25 March 2018. LPI Contribution N 1903. P. 1860.
  49. Kornienko, Yu. V., Pugach, V. V., Skuratovskiy, S. I., 2014. On the possibility of atmosphere conditions diagnostic with the multibeam interferometer. *Radiofizika i elektronika*, **5(19)**(2), pp. 16–21 (in Russian).
  50. Skuratovskiy, S. I., 2009. Recovering phase distortions field under the image of point source. In: V. M. Yakovenko, ed. 2009. *Radiofizika i elektronika*. Kharkov: IRE NAS of Ukraine Publ. **14**(2), pp. 222–228 (in Russian).
  51. Kornienko, Yu. V., Skuratovskiy, S. I., 2014. Determining the intensity of a point-like source, observed on the background of extended source. *Radio phys. radio astron.*, **19**(4), pp. 317–323. DOI:<https://doi.org/10.15407/rpra19.04.317>
  52. Skuratovskiy, S. I., Kornienko, Yu. V., 2015. Determining the intensity of a point-like source, observed with an extended source as the background. In: *Int. Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF 2015)*. Dnipropetrovsk, Ukraine, 29 Sept. – 2 Oct. 2015. IEEE. DOI:<https://doi.org/10.1109/YSF.2015.7333256>
  53. Skuratovskiy, S. I., Kornienko, Yu. V., 2016. Determining the intensity of a point-like source, observed with an extended source as the background: modeling and computer experiment. In: *9<sup>th</sup> Int. Kharkiv Symp. Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW)*. Kharkiv, Ukraine, 20–24 June 2016. IEEE. DOI:<https://doi.org/10.1109/MSMW.2016.7538031>
  54. Kopilovich, L. E., 1983. Regular method for constructing systems of non-redundant aperture masks for observation through the turbulent atmosphere. *Dok. Akad. Nauk Ukrainian SSR*, **10**, pp. 55–58 (in Russian).
  55. Kornienko, Yu. V., 2000. Constructing non-redundant antenna configurations on a square grid with the method of random search. In: V. M. Yakovenko, ed. 2000. *Radiofizika i elektronika*. Kharkov: IRE NAS of Ukraine Publ. **5**(3), pp. 148–154 (in Russian).
  56. Kornienko, Yu. V., 2002. Constructing non-redundant antenna configurations on the hexagonal grid with the method of random search. In: V. M. Yakovenko, ed. 2002. *Radiofizika i elektronika*. Kharkov: IRE NAS of Ukraine Publ. **7**(1), pp. 142–153 (in Russian).
  57. Kopilovich, L. E., 2008. Array antennas of size 8×8 based on Hadamard difference sets sets. *Radio phys. radio astron.*, **13**(2), pp. 210–215.
  58. Kopilovich, L. E., 2010. Upper Estimates for the Element Number of Non-redundant Antenna Configurations on Square and Hexagonal Grids. *Exp. Astron.*, **28**(1), pp. 1–9. <https://doi.org/10.1007/s10686-010-9191-4>
  59. Kopilovich, L. E., 2014. Non-redundant configurations of elements on the square and hexagonal grids of the large size. *Radiofizika i elektronika*, **5(19)**(1), pp. 80–84 (in Russian).
  60. Kopilovich, L. E., Sodin, L. G., 2014. *Multielement System Design in Astronomy and Radio Science*. Springer.
  61. Alexeev, G. A., Stulova, L. V., 2010. On the relay interaction of the tape electronic flow with the travelling wave in the presence of the transversal magnetic field. *Radiofizika i elektronika*, **1(15)**(3), pp. 30–34 (in Russian).
  62. Alexeev, G. A., Stulova, L. V., 2012. Eccentric cylindrical diode with the current limited by a spatial charge. *Radiofizika i elektronika*, **3(17)**(1), pp. 85–91 (in Russian).
  63. Alexeev, G. A., Stulova, L. V., 2013. Relay interaction in the microwave devices. *Radiofizika i elektronika*, **4(18)**(2), pp. 77–85 (in Russian).
  64. Alexeev, G. A., Stulova, L. V., 2014. Elementary theory of clinotron with distributed interaction of electron beam with orthogonal component of field. In: *24<sup>th</sup> Int. Crimea Conf. «Microwave devices and telecommunication technologies» (CriMiKo'2014)*. Sebastopol, Ukraine, 7–13 Sept. 2014, **1**, pp. 171–172. Sebastopol: Weber Publ.
  65. Kornienko, Yu. V., Masalov, D. S., 2014. The realization of Krilov-Bogolubov-Mitropolskiy method in the computer algebra system. *Fizicheskie osnovy priboro-stroeniya*, **3**(1), pp. 70–83 (in Russian).

Рукопись поступила 25.09.2018.

Yu. V. Kornienko, S. I. Skuratovskiy

#### WAYS OF MAXIMAL EXTRACTION OF THE INFORMATION FROM OBSERVATIONS OF THE ASTRONOMICAL OBJECT

**Subject and purpose.** The information obtained from a physical experiment usually is partially degraded by the influence of noise factors. The nature of these factors is dependent on the experiment conditions. But an approach to overcoming this influence is similar in many cases. The researches carried out in the image processing group of IRE NASU for the last ten years were aimed towards searching for the techniques of maximal information extraction from astronomical observation and space experiments. There were several directions of the research. In the context of observations from the surface of the Earth the task was to overcome the atmospheric phase distortions and the synthesis of antenna arrays for telescopes and interferometers in different ranges of the electromagnetic spectrum. In the case of space observations we deal with the problem of the optimal interpretation of their results, in particular, of the reconstruction of planet surface relief and the processing of images with gravitational lensing effect.

**Methods and methodology.** The common part of all these techniques is using of the statistical approach, i. e. the application of mathematical statistics and the theory of optimal statistical decisions. The common peculiarities of its applications as well as the specifics of the solutions obtained in the case of certain problems of astronomical image processing are revealed in this paper.

**Results.** As a result, the following techniques are developed: the technique of Fourier components phase accumulation for the atmosphere phase noise reduction; the technique for optimal evaluation of the quasar intensity while observing it through a gravitational field of a distant

galaxy; the technique for taking into account the altimeter data in photoclinometric reconstruction of a planet surface relief; and a number of techniques of antenna configuration synthesis for telescopes and interferometers.

**Conclusions.** The statistical approach to processing experimental data allows using an information contained in the series of astronomical object images for reconstructing a single, more precise image of this object. It makes it possible to optimally combine information from the surface images and altimeter data for obtaining the surface relief of high resolution with the real values of height. In gravitational lensing images it provides the separation of the source of observation from the background. The results demonstrate that the Bayesian statistical approach is the powerful instrument of the research.

**Key words:** statistical approach, astronomical images, phase accumulation, surface relief, photoclinometry, antenna array.

Ю. В. Корниенко, С. І. Скуратовський

### ШЛЯХИ МАКСИМАЛЬНОГО ВИДОБУТКУ ІНФОРМАЦІЇ ІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ СПОСТЕРЕЖЕНЬ АСТРОНОМІЧНОГО ОБ'ЄКТА

**Предмет та мета роботи.** Інформація, що отримана у результаті фізичного експерименту, зазвичай є частково зруйнованою впливом різних шумових факторів. Природа цих факторів залежить від умов експерименту, але підхід до подолання їх впливу у багатьох випадках є досить схожим. Дослідження, що проводилися в групі обробки зображень ІРЕ НАНУ в останні десять років, були спрямовані на пошук методів максимального видобутку інформації з астрономічних спостережень та космічних експериментів. Дослідження велися у декількох напрямках. При спостереженні з поверхні Землі задачею було подолання атмосферних фазових

спотворень та синтез конфігурацій для телескопів та інтерферометрів у різних ділянках електромагнітного спектра. При космічних спостереженнях ставилося питання щодо оптимальної інтерпретації їх результатів, зокрема отриманні рельєфу поверхні планет та обробки зображень з ефектом гравітаційного линзування.

**Методи та методології.** Спільною особливістю розроблених методів є статистичний підхід, тобто застосування математичної статистики та теорії оптимальних статистичних розв'язів. Ця робота розкриває як загальні особливості його застосування, так і специфіку отриманих результатів у випадках конкретних задач обробки астрономічних зображень.

**Результати роботи.** У результаті проведених досліджень було розроблено наступні методи: метод накопичення повних фаз фур'є-компонент для придушення атмосферного фазового шуму; метод оптимальної оцінки інтенсивності точкового джерела при спостереженні його крізь гравітаційне поле віддаленої галактики; метод урахування альти метричної інформації при фотоклінометричному визначенні рельєфу поверхні планети; а також ряд методів синтезу антенних конфігурацій для телескопів та інтерферометрів.

**Висновок.** Статистичний підхід до обробки експериментальних даних дозволив використати інформацію, що міститься у серії зображень астрономічного об'єкта, для реконструкції єдиного, більш точного його зображення. Завдяки йому стало можливим оптимальним чином поєднати інформацію, що міститься в зображеннях поверхні та альтиметричних даних, для отримання рельєфу поверхні з високим розділенням та прив'язкою до реальних значень висоти. При роботі з гравітаційними міражами стало можливим відділення джерела, що спостерігається, від фону. Результати демонструють, що баєсівський статистичний підхід є потужним інструментом у руках дослідника.

**Ключові слова:** статистичний підхід, астрономічні зображення, накопичення фаз, рельєф поверхні, фотоклінометрія, антенні решітки.