

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

ВИДЕНИЕ СКВОЗЬ ТУРБУЛЕНТНУЮ АТМОСФЕРУ

Посвящается 110-летию со дня рождения А. Я. Усикова

Статья посвящена 110-летию со дня рождения А. Я. Усикова. Кратко излагается история исследований в Институте радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова Национальной академии наук Украины (ИРЭ НАНУ) по цифровой обработке изображений, начало которым положил А. Я. Усиков. Главное внимание уделено проблеме достижения дифракционного разрешения при наблюдении объекта сквозь турбулентную атмосферу и новым результатам, полученным в этом направлении в ИРЭ НАНУ за последнее время. Ил. 1. Библиогр.: 58 назв.

Ключевые слова: история ИРЭ НАНУ, обработка изображений, астрономические наблюдения, турбулентная атмосфера.

Распространение электромагнитной волны сквозь земную атмосферу сопровождается ее рассеянием на случайных неоднородностях показателя преломления. На дециметровых волнах решающую роль играют неоднородности ионосферы, на дециметровых и более коротких волнах главную роль играет тропосфера, а именно неоднородности температуры, влажности, и аэрозоли.

В Институте радиофизики и электроники Академии наук УССР (ИРЭ АН УССР) исследование влияния случайных неоднородностей показателя преломления на распространение радиоволн в атмосфере велось несколькими лабораториями с первых дней существования Института. В лаборатории поглощения радиоволн, которую возглавлял А. Я. Усиков, работала группа Ильи Хацкелевича Ваксера. Кроме того, такие работы велись в лаборатории радиолокации под руководством Ивана Сергеевича Тургенева и в лаборатории распространения радиоволн под руководством Исаака Иеремеевича Островского. Со временем был накоплен обширный материал, который можно было использовать при разработке и проектировании радиолокационных станций.

В середине 1960-х гг. в связи с исследованием и освоением космоса начала назреть необходимость развития математических методов и технических средств обработки изображений. В частности, возник вопрос о возможности обработки астрономических изображений, получаемых наземными телескопами, с целью устранить вредное влияние, оказанное на них земной атмосферой в процессе наблюдения. Было вполне естественно и логично развернуть эти работы именно в ИРЭ, где до этого широким фронтом велись исследования влияния атмосферы на распространение радиоволн. Понимая это, А. Я. Усиков с готовностью поддержал инициативу группы молодых научных сотрудников, предложивших начать исследования в этом направлении. Дальнейшее развитие событий показало, насколько прав был Усиков, положив нача-

ло этому курсу. Чтобы вспомнить эти события и окинуть их единым взглядом с высоты нашего времени, и была написана эта статья.

1. Обработка изображений в Институте радиофизики и электроники НАН Украины. **Краткая история.** 9 мая 1970 г. было прохождение Меркурия по диску Солнца. За полгода до этого, в декабре 1969 г. в Астрономической обсерватории Харьковского университета (АО ХГУ) обсуждался вопрос о предстоящем событии и его наблюдении. Хотелось воспользоваться этим редким явлением, чтобы узнать что-нибудь новое об этой малоисследованной (в то время) планете. В ходе дискуссий возникла идея: отснять большое количество снимков Меркурия, а затем, усредняя их каким-либо образом, реконструировать неискаженное изображение Меркурия и определить его форму (своего рода накопление сигнала). Отметим, что Меркурий мало доступен для наземных наблюдений из-за своей близости к Солнцу и прохождение по диску Солнца – единственная возможность увидеть его без помех (но только его лимб, а не поверхность). Космические аппараты к Меркурию в то время еще не посылались, поэтому не было даже известно, имеет ли он сферическую форму, как другие планеты, или это астероид неправильной формы. На этот вопрос и предполагалось ответить с помощью задуманного эксперимента.

Но этот эксперимент требовал больших ресурсов, которыми АО ХГУ не располагала, поэтому решили обратиться за поддержкой к А. Я. Усикову, зная его восприимчивость к новым идеям и начинаниям. Это дало результат: Усиков очень заинтересовался и выделил для этой работы средства на приобретение больших количеств киноплёнки. Подготовка к эксперименту началась. (Потребовалась доработка кинокамеры «Конвас», чтобы снимать поверхность Солнца с достаточно короткими экспозициями, и т. д.) Экспериментально-производственные мастерские ИРЭ были нагружены этой работой.

К маю 1970 г. подготовка была завершена. Во избежание неудач, связанных с погодой, было решено вести наблюдения в трех пунктах: на загородной базе АО ХГУ в Граково, в ГАО АН УССР в Киеве и в Астрофизическом институте АН УзССР в Ташкенте. Но природа благоприятствовала энтузиастам, и во всех трех пунктах погода была безупречной. Программа наблюдений была выполнена в полном объеме.

Дальше возник вопрос об обработке огромного объема информации (больше 20 км киноплёнки). Идеи, конечно, были проработаны заранее. Руководящую роль здесь сыграла книга Маршалла и Франсона «Структура оптического изображения» [1]. Из нее была почерпнута идея когерентно-оптической обработки информации. Первые эксперименты по когерентно-оптической обработке изображений велись в АО ХГУ (Л. А. Акимов, В. Н. Дудинов, Ю. В. Корниенко). Это было удобнее, чем в ИРЭ с его жестким режимом (работа по ночам и т. д.). Когда были получены первые положительные результаты, Усиков предложил перенести дальнейшую работу в ИРЭ и выделил для этого необходимое помещение в только что сданном новом корпусе. Там свободно помещалась оптическая трасса довольно громоздкой когерентно-оптической установки. В дальнейшем на производственных мощностях ИРЭ были изготовлены оптические элементы и механические узлы установки. По своим показателям и прежде всего по отношению сигнал-шум она существенно превосходила установку, созданную за несколько лет в Государственном оптическом институте в Ленинграде (наша установка благодаря постоянной поддержке Усикова была сделана всего за полгода). Это потому, что ленинградская установка была копией американской, а наша была плодом самостоятельного творчества, не скованного авторитетным примером [2]. Других конкурентов в СССР у нас не было.

Перед этим, летом 1970 г., в отделе Усикова была создана лаборатория обработки изображений. На должность руководителя была приглашена Виктория Сергеевна Цветкова, молодая, умная и красивая женщина, только что защитившая кандидатскую диссертацию в Государственном астрономическом институте им. П. К. Штернберга (Москва). Она проявила блестящий талант экспериментатора, и дальнейшими успехами коллектив в значительной степени обязан ей.

На этой установке был выполнен ряд интересных работ по обработке астрономических и космических изображений, в том числе обработка изображений Луны с американского космического аппарата «Лунар орбитер» [3].

Отклонение поверхности Меркурия от сферической формы оказалось меньше чувствительности метода. Последняя сильно снижалась

из-за неоднородности толщины ацетилцеллюлозной подложки киноплёнки и происходящих отсюда искажений фронта волны. Применение оптической иммерсии существенно улучшило результаты, но Меркурий оказался весьма близким к сферической форме. Открытия не получилось, но был сделан значительный шаг вперед.

Развитие когерентно-оптической обработки, которое после этого пошло в ИРЭ полным ходом, не исключало зарождения и развития других идей. Хотя когерентная оптика в то время была вне конкуренции по своей производительности и оставляла далеко позади лучшие цифровые ЭВМ, постепенно становилось понятным, что многие задачи, которые ставит перед исследователем жизнь, не могут быть решены с помощью когерентной оптики. Фактически возможности когерентной оптики ограничены преобразованием Фурье и теми задачами, которые решаются с его помощью (линейная однородная фильтрация, пространственный спектральный анализ и т. п.). Этот перечень можно дополнить теми задачами, которые могут быть эффективно решены другими аналоговыми методами (гамма-коррекция и т. д.). Однако, чтобы существенно расширить круг решаемых задач, надо было думать об освоении цифровой обработки изображений.

Такая ориентация мысли на новые горизонты, с одной стороны, была естественной чертой прогресса, но с другой стороны, она ставила Усикова в затруднительное положение. Работа по когерентной оптике шла успешно, и сотрудники, которые успели стать хорошими специалистами в этой области, не были в восторге от перспективы делить и без того скромные ресурсы (финансирование, помещение, ставки) с конкурирующей группой цифровой обработки изображений. К тому же так называемое «общественное мнение» (выражение Усикова) активно наущничало, постоянно убеждая Усикова в том, что все это очередная авантюра, с самого начала обреченная на неизбежный провал. «Вы сами подумайте, – говорил Усикову один весьма уважаемый сотрудник, – он вам обещает изображения 128×128. Сколько это элементов? Больше 16 000. А ведь на каждый элемент изображения должен быть какой-то элемент аппаратуры! Это 16 000 элементов! А потом он опять будет говорить, что отдел снабжения не справляется со своей задачей!»

Но Усиков был мудрым руководителем. А к тому же еще и смелым. Он внимательно слушал все, что ему говорили, но имел и свое мнение. Он понимал, что рискует, но не боялся этого.

Когда через полгода сделанный макет аппаратуры ввода-вывода изображений демонстрировали Усикову, он с особой тщательностью проверил число элементов изображения. Эта четкость к тому времени уже была маловата, и со-

трудники от строгих расспросов Усикова чувствовали себя как бы виноватыми, но Усиков, убедившись, что обещание выполнено, остался очень доволен. (Вскоре мы уже работали с изображениями 1024×1024 .)

При этом Усиков вовсе не собирался приносить когерентно-оптическую обработку в жертву цифровой. Специалисты по когерентной оптике перебрались в Университет и там получили благоприятные условия для работы. По просьбе Усикова проректор И. И. Залюбовский выделил им прекрасное помещение, даже лучшее, чем было в ИРЭ. Используя накопленный опыт, они сделали установку, более совершенную, чем прежняя. Она прекрасно работает и до сих пор, объявлена национальным достоянием Украины и используется в учебных целях.

Осенью 1973 г. благодаря неоценимой поддержке президента АН УССР Б. Е. Патона и некоторых высоких руководителей в Москве мы получили новейшую на то время вычислительную машину ЕС 1020. Она стала составной частью нашей системы цифровой обработки изображений [4].

Осенью 1974 г. по рекомендации и при поддержке тех же московских руководителей мы установили плодотворное научное взаимодействие с генеральным конструктором А. И. Савиным и руководимым им ЦНИИ «Комета» [5]. В рамках заключенного хоздоговора мы создали для них и ввели в строй систему цифровой обработки изображений, аналогичную нашей, но на базе более современной ЭВМ ЕС 1033. Позже еще одну такую систему мы сделали для СКТБ завода «Прогресс» на базе ЭВМ ЕС 1066. Все эти работы велись по инициативе и под руководством А. Я. Усикова.

Это была важная работа, в том числе и для фундаментальной науки, и для обороны страны, однако хотелось не только создавать технические средства, но и применять их для решения научных задач. Такая возможность представилась в 1979 г., когда у нас установилось научное сотрудничество с Институтом геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского АН СССР (ГЕОХИ АН СССР). В сотрудничестве с Ю. Г. Шкуратовым (сотрудник АО ХГУ, ныне директор Института астрономии ХНУ им. В. Н. Каразина) мы успешно обрабатывали результаты радиолокации Венеры, выполненной американским космическим аппаратом «Пионер-Венера 1». При этом мы получили ряд карт, полезных для планетологов [6, 7] и стереопанорам больших участков поверхности Венеры (первые в мире!) [8, 9], увидеть которые другим способом было невозможно из-за плотного облачного покрова, окутывающего Венеру.

Несмотря на стремительный ход событий и большие, иногда весьма утомительные нагрузки, в эти годы в отделе Усикова все же велись и теоре-

тические исследования. Они касались разных вопросов, но преимущественно были сосредоточены на двух задачах обработки изображений: определение рельефа поверхности планеты и видение сквозь турбулентную атмосферу.

Первая задача состояла в том, чтобы, используя известную зависимость яркости элемента поверхности от его ориентации, определить рельеф участка поверхности по серии его изображений, полученных в результате наблюдений. Поскольку задача определения рельефа поверхности по полю наклонов в простейшей постановке оказывается некорректной, здесь требуется более тонкий байесовский статистический подход [10]. Этому была посвящена работа [11]. Дальнейшее развитие этого подхода было выполнено в работах [12–14]. По этим результатам аспирант Нгуен Суан Ань (ныне директор Института геофизики Академии наук Социалистической Республики Вьетнам) защитил кандидатскую диссертацию [15]. Теперь работы в этом направлении продолжаются [16–18].

Вторая задача, намного более трудная, состоит в поиске возможностей достижения дифракционного предела разрешения телескопа при наблюдении астрономического объекта сквозь турбулентную атмосферу. Заметим, что угловая разрешающая способность телескопа ограничена дифракцией света на его апертуре. Телескоп диаметром 20 см имеет дифракционное разрешение приблизительно $1''$. Поэтому от телескопа диаметром 2 м можно было бы ожидать разрешающей способности $0,1''$. Практически же такой телескоп дает разрешение порядка той же угловой секунды, т. е. в 10 раз хуже дифракционного предела разрешения. Это объясняется влиянием атмосферы, в которой случайные неоднородности показателя преломления искажают фронт волны и тем самым замыкают изображение наблюдаемого объекта.

На борьбу с этим явлением многие люди потратили немало творческих сил и времени. Были предложены различные способы борьбы с этим явлением. Были достигнуты кое-какие успехи, иногда даже впечатляющие [19], однако кардинального решения пока еще нет и исследования надлежит продолжать. В частности, настало время не только искать новые технические решения, но и более четко провести принципиальную черту, за которой успеха ожидать не следует в силу объективных законов природы, чтобы не пытаться создать в этой области вечный двигатель или паровоз с недостижимым КПД. На эти задачи и направлены усилия сотрудников отдела № 33, которым когда-то руководил Александр Яковлевич Усиков. Ниже кратко излагаются основные результаты, полученные на этом пути в ИРЭ в последнее время.

2. Изображение заатмосферного объекта и земная атмосфера. Исследование удаленных объектов возможно потому, что электромагнитная волна, приходящая от такого объекта, содержит в себе информацию о распределении яркости по объекту. Это позволяет, измеряя характеристики поля волны, восстановить (с определенной точностью) это распределение и сформировать изображение объекта. Достижимое при этом угловое разрешение определяется дифракцией волны на входной апертуре принимающего устройства и равно отношению длины волны к поперечному размеру антенны (линзы, зеркала, антенного поля). Однако реальное разрешение может быть намного хуже под влиянием различных мешающих факторов. В рамках данной работы нас интересует мешающее влияние случайных неоднородностей показателя преломления в атмосфере. Это влияние создает в изображении пространственный шум. Как и в случае любого другого шума, его влияние может быть уменьшено путем накопления сигнала. Оптимальная процедура такого накопления пока еще не найдена; к тому же она может быть разной при разных условиях наблюдения. Предложено много субоптимальных процедур такого рода. В рамках данной статьи нас больше всего будет интересовать процедура усреднения фаз фурье-компонент изображения. Она предложена давно [20, 21], прошла довольно долгую эволюцию [22] и достигла в последнее время такой стадии развития [23, 24], когда уже можно увидеть принципиальный предел ее применимости. В связи с этим хотелось бы подробнее понять механизм разрушения информации под влиянием атмосферного шума с целью найти путь дальнейшего прогресса. Этому и были посвящены исследования, проводившиеся в нашем отделе в последнее время [23–29].

3. Некогерентное изображение объекта. Яркость объекта является функцией точки на поверхности объекта. Возможность получить изображение удаленного некогерентно освещенного (или светящегося) объекта основана на теореме ван Циттерта-Цернике [26]: функция когерентности поля приходящей от объекта волны является фурье-образом яркости объекта. Этим исчерпывается вся принципиальная сторона вопроса о получении изображений удаленных объектов. Однако при этом возникает множество проблем, связанных с получением изображений в том или ином диапазоне длин волн конкретным способом.

При широкой полосе частот напряженность электрического поля в некогерентном световом потоке является быстро меняющейся случайной величиной. Такой поток характеризуют не амплитудой, а функцией когерентности, которая определяется как математическое ожидание квад-

рата модуля амплитуды, т. е. как среднее его значение по статистическому ансамблю. Такое усреднение является нереализуемой математической абстракцией, и на практике обычно применяют среднее по времени, которое в силу эргодичности рассматриваемой системы [30] при достаточном времени усреднения приблизительно совпадает со средним по ансамблю. При больших расстояниях до объекта параллакс не имеет значения, объект из всех точек (вблизи наблюдателя) имеет один и тот же вид, и потому это среднее не зависит от координат в плоскости наблюдателя. Изменяя функцию когерентности и выполняя над ней преобразование Фурье, можно получить изображение объекта, т. е. яркость как функцию точки на объекте.

Как измерять функцию когерентности существенно зависит от диапазона электромагнитного спектра, в котором производится наблюдение объекта. В декаметровом и даже в метровом диапазоне есть возможность непосредственно измерять мгновенные значения напряженности поля и затем усреднять по времени их произведения после или даже во время наблюдения. С повышением частоты такая прямолинейная процедура становится затруднительной. Однако еще долго остается возможность выполнить то же самое аналоговым способом с помощью соответствующих электрических схем. Все же исследователь рано или поздно вторгается в такой диапазон частот, где уже становится невозможным оперировать с электрическими цепями, работающими на частоте принимаемого сигнала. Это происходит в терагерцевом диапазоне, и тогда приходится применять новые принципы измерений, например квазиоптические [25], а затем и оптические [26].

Оптические методы измерений появились в ту далекую эпоху, когда еще не было известно, что оптические явления – это выражение тех же законов, которые мы знаем по экспериментам над медленно меняющимся электромагнитным полем. Формирование изображения в оптике осуществляется с помощью линзы (или зеркала) и описывается «ходом лучей», т. е. в терминах геометрической оптики. Однако в свете целей этой статьи будет более рациональным описать его в понятиях волновой оптики.

В основе формирования изображений с помощью линзы лежит тот факт, что по отношению к когерентной волне она является аналоговым преобразователем Фурье: поле в ее задней фокальной плоскости является фурье-образом поля в передней фокальной плоскости. Отсюда нетрудно заключить, что в случае некогерентной волны яркость в задней фокальной плоскости в силу теоремы Винера-Хинчина является фурье-образом функции когерентности поля в передней

фокальной плоскости (или в какой-либо параллельной ей плоскости). Таким образом, с учетом теоремы ван Циттерта-Цернике, в задней фокальной плоскости получается фурье-образ фурье-образа яркости объекта, т. е. перевернутое изображение объекта. Таким образом, светоприемник, расположенный в задней фокальной плоскости, будет измерителем не функции когерентности как таковой, а уже готового ее фурье-образа, т. е. изображения объекта.

4. Влияние среды со случайными неоднородностями показателя преломления на астрономическое изображение. Пусть теперь между объектом и наблюдателем находится плоскопараллельный слой статистически однородной среды со случайными неоднородностями показателя преломления. Плоская монохроматическая волна, приходящая от объекта, в этом слое подвергается искажению: ее амплитуда и фаза теперь будут зависеть случайным образом от поперечных координат. Характер этой зависимости определяется статистическими свойствами флуктуаций показателя преломления. Будем для простоты полагать, что этот слой расположен в непосредственной близости от наблюдателя и имеет пренебрежимо малую геометрическую толщину. Это позволяет приближенно считать амплитуду волны невозмущенной, а искажение фазы $\delta(\xi, \eta, t)$ – реализацией некоторого случайного процесса, который здесь мы будем считать стационарным и гауссовым со среднеквадратичным значением q и радиусом корреляции l – в пространстве и τ – во времени.

Если бы мы наблюдали когерентно освещенный объект, фурье-образ $\tilde{E}(\xi, \eta, t)$ искаженного изображения $E(x, y, t)$ был бы связан с фурье-образом $\tilde{E}_0(\xi, \eta)$ истинного изображения $E_0(x, y)$ (в отсутствие среды) соотношением

$$\tilde{E}(\xi, \eta, t) = \tilde{E}_0(\xi, \eta) e^{i\delta(\xi, \eta, t)}. \quad (1)$$

Это означало бы, что при таком наблюдении пространственный шум, порождаемый средой, был бы мультипликативным, а по отношению к логарифму комплексной амплитуды поля в апертурной плоскости – аддитивным, стационарным и гауссовым с уже упомянутыми параметрами q , l и τ .

Для некогерентно освещенного объекта это соотношение остается в силе, однако от него мало пользы, поскольку на высоких частотах быстро меняющаяся со временем амплитуда поля не поддается непосредственному измерению. Вместо нее остается измерять интенсивность излучения

$$J(x, y, t) = \langle E(x, y, t) E^*(x, y, t) \rangle. \quad (2)$$

Здесь треугольные скобки означают усреднение по статистическому ансамблю, которое является математической абстракцией, не реализуемой на практике, но может быть заменено усреднением по времени, которое в оптике всегда имеет место при измерении интенсивности светового потока.

Из теоремы о свертке для фурье-образа $J(x, y, t)$ следует

$$\begin{aligned} \tilde{J}(k_x, k_y, t) &= \\ &= \int \langle E^*(\xi - k_x, \eta - k_y, t) E(\xi, \eta, t) \rangle d\xi d\eta. \end{aligned} \quad (3)$$

Отсюда и из (2) для фурье-образа возмущенной яркости изображения имеем

$$\tilde{J}(k_x, k_y, t) = \tilde{J}_0(k_x, k_y, t) G(k_x, k_y, t), \quad (4)$$

где

$$\tilde{G}(k_x, k_y, t) = \int e^{i[\delta(\xi, \eta, t) - \delta(k_x, k_y, t)]} d\xi d\eta. \quad (5)$$

Здесь интеграл берется формально по всей апертурной плоскости, а фактически только по области, в пределах которой подынтегральное выражение отлично от нуля. (В случае круглой линзы диаметром D это круг диаметром $2D$).

Таким образом, в некогерентном случае пространственный шум $\tilde{G}(k_x, k_y, t)$, создаваемый средой, по-прежнему остается мультипликативным (в частотном представлении) с нормально распределенными фазами (при малых q), однако теперь модули фурье-компонент тоже оказываются затронутыми возмущающим действием среды, и это сыграет существенную роль при дальнейшем рассмотрении.

5. Разрушение информации под действием фазовых искажений в атмосфере и необходимость накопления сигнала. Соотношение (4) можно записать в координатном представлении

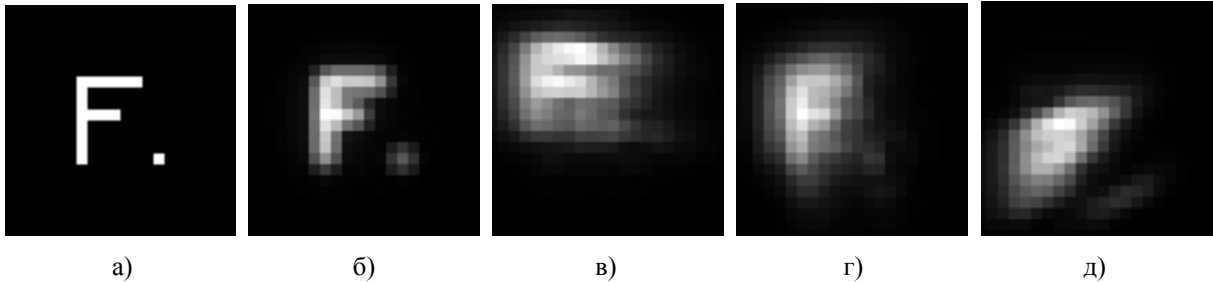
$$J(x, y) = \int G(x' - x, y' - y) J(x', y') dx' dy', \quad (6)$$

где $G(x' - x, y' - y)$ – атмосферно-апертурное ядро (аппаратная функция, функция рассеяния точки), фурье-образом которой является входящая в (4) частотная характеристика системы среда – линза $\tilde{G}(k_x, k_y)$.

Таким образом, изображение, зарегистрированное при наблюдении объекта сквозь среду со случайными неоднородностями, оказывается сверткой истинного изображения объекта со случайным атмосферно-апертурным ядром G . На рисунке приведены примеры реализаций таких ядер в типичном случае, когда поле фазовых искажений $\delta(\xi, \eta)$ является реализацией стационарного гауссова процесса с гауссовой функцией корреляции и различными значениями среднеквадратичного искажения q (результаты получе-

ны численным моделированием). Так выглядят, например, изображения звезды при наблюдении сквозь турбулентную атмосферу, когда диаметр

телескопа заметно больше размера неоднородностей. Примеры изображений протяженного объекта можно найти в работах [23, 24, 27–29].



Истинное изображение объекта (а), построенное идеальным телескопом изображение (б), а также примеры мгновенных изображений (в–д)

Искажения изображения объекта, описываемые формулами (4) или (6), приводят к значительной потере информации о наблюдаемом объекте. Как и в случае шума любой другой природы, на помощь может прийти накопление сигнала. Обычно поле фазовых искажений $\delta(\xi, \eta)$ зависит еще и от времени. Повторяя регистрацию изображения в разные моменты времени, можно накопить больше информации об объекте и получить изображение лучшего качества. Это будет хорошо известное в радиотехнике временное накопление сигнала [30]. При работе с изображениями возможно и пространственное накопление сигнала [27, 31]. Его возможность основана на том, что при наблюдении сквозь атмосферу из разных точек пространства фазовые искажения будут разными.

Теория накопления сигнала при работе с изображениями еще слабо разработана. Простейшим видом временного накопления является предложенный [32] метод суммирования изображений, возможно, с выбором лучших из них. Такое накопление уменьшает пространственный шум, но подавляет высокие пространственные частоты, в результате чего теряется угловое разрешение. Существуют более тонкие методы накопления, однако большинство из них сложны технически и требуют дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Снижение углового разрешения при наблюдении сквозь земную атмосферу с помощью большого телескопа по сравнению с разрешением, которое мог бы дать тот же телескоп в отсутствие атмосферы, в типичном случае составляет полтора порядка и более. Это означает, что только за счет уменьшения числа различных элементов изображения информативность изображения снижается на три порядка и более. Конечно, это побуждает исследователей искать пути борьбы с этим явлением. Этой задаче посвящен следующий раздел.

6. Методы преодоления мешающего влияния атмосферы. Эти методы первоначально носили только пассивный характер и, в основном, сводились к выбору подходящего места и времени для наблюдений. Возникло понятие астроклимата, появились методы его исследования и искусство выбирать для строительства обсерваторий места с хорошим астроклиматом. Была высказана идея киносъемки объекта и последующего выбора из полученной последовательности изображений лучших, наименее поврежденных влиянием атмосферы.

Затем появилась идея накопления сигнала. Простейшим способом накопления является суммирование изображений или просто съемка с длительной экспозицией. Этот способ малоэффективен: получаются изображения, сильно замываемые атмосферой. В середине XX в. получила развитие обработка сигналов. Появилась идея применить ее методы к астрономическим изображениям. Первой естественной идеей явилось восстановление замыванного изображения с помощью винеровского фильтра, поскольку ядро замытия для долгоэкспозиционного изображения можно достоверно определить по изображению точечного источника (звезды). Этот метод при всей своей безупречной принципиальной корректности оказался малоэффективным на практике, так как для его успеха требуется очень высокое отношение сигнал-шум, что связано с сильным замытием высших пространственных частот в долгоэкспозиционном изображении. Мгновенное атмосферное ядро в значительно меньшей степени подавляет высшие частоты, однако оно и значительно менее доступно для измерения. Поэтому практически идея восстановления последовательности мгновенных изображений с помощью восстанавливающего фильтра осуществима только тогда, когда в поле зрения рядом с исследуемым объектом имеется точечный источник, что бывает весьма редко.

Перспектива накопления сигнала по последовательности мгновенных изображений тем не менее существует, однако путь к нему весьма непрост.

В качестве очередного шага очень эффективным оказался метод Лабейри [33] (спеклинтерферометрия). Он основан на суммировании по последовательности изображений квадратов модуля их фурье-образов. Надо сказать, что этот метод оказался очень близким к методу, который мы применяли при эксперименте с Меркурием. Однако этот метод позволяет измерять только модули фурье-компонент, но не их фазы. Вопрос о способе получения фаз с тех пор все время стоял на повестке дня. Было предложено много разных идей. Некоторым из них мы посвятим следующие разделы.

7. Определение фаз по энергетическому спектру объекта. Казалось бы, такая попытка с самого начала обречена на неудачу: никакой априорной связи между модулями и фазами фурье-образа объекта вроде бы не должно быть. Однако торопиться с этим утверждением не следует: для какого-то ограниченного класса объектов такая связь может существовать. В данном случае речь пойдет об объекте конечных размеров, яркость которого за пределами некоторой конечной области на плоскости равна нулю. Это ограничение порождает интересующую нас связь, отдаленно напоминающую по типу соотношения Крамерса-Кронига, связывающие вещественную и мнимую часть диэлектрической проницаемости среды. В работе [34] было впервые указано на это и предложен итерационный алгоритм отыскания изображения объекта по его энергетическому спектру. Позже этот алгоритм был описан в более широко известной работе [35].

Возможность реконструкции изображения по его энергетическому спектру была обстоятельно исследована в работе [36]. Результаты, которые мы получили, показывают, что этот способ работает в полном соответствии с предсказанием теории, но может оказаться полезным лишь на вспомогательных ролях. Однако сама идея восстановления функции по квадрату модуля ее фурье-образа и предложенный алгоритм такого восстановления могут оказаться полезными и при решении других задач. В частности, к их числу относится определение поля фазовых искажений по мгновенному изображению точечного источника. Хорошее исследование в этом плане выполнено в работе [37]. Мы вернемся к этому вопросу в конце статьи.

8. Усреднение фаз. В 1977 г. Л. Г. Содин высказал идею усреднения фаз фурье-компонент изображения по последовательности изображений [20]. Эта простая идея могла бы успешно дополнить метод Лабейри и стать основой получе-

ния изображений с дифракционным разрешением. Однако в то время в оптическом диапазоне она была практически неосуществима из-за низкого уровня вычислительной техники и других аппаратных средств. Немного раньше была предложена идея косвенного усреднения фаз [21]. Преимуществом этого метода заключалось в том, что он был осуществлен с помощью когерентной оптики, однако практических результатов не дал по причинам, которые проявились намного позже.

Спустя 30 лет, принимая во внимание новые возможности вычислительной техники, мы решили испытать идею Содина практически путем компьютерного эксперимента. Результат получился очень хороший. С таким же успехом мы проверили метод Нокса и Томпсона. Однако оба метода хорошо работали только при малых искажениях фазы волны, когда среднеквадратичное значение фазового искажения q мало по сравнению с единицей. Этот факт потребовал изучения, и его причина была выяснена [30, 31]. Ниже кратко излагается ее суть.

Важным моментом здесь является тот факт, что фазовые искажения $\delta(\xi, \eta, t)$ могут принимать значения на всей вещественной оси, а не только в единственном интервале длиной 2π , что придает то же свойство и возмущенным фазам фурье-компонент зарегистрированных изображений. Между тем фаза фурье-компоненты определяется как аргумент комплексного числа, т. е. как мнимая часть главного значения ее логарифма, т. е. с точностью до $2\pi k$, где k – произвольное целое число. Хотя изменение фаз отдельных Фурье-компонент изображения на 2π является тождественным преобразованием этого изображения, оно может изменить результат усреднения фаз на величину, отличную от $2\pi k$, и отрицательно повлиять на реконструируемое изображение. При большом количестве таких событий это влечет за собой провал попытки правильно реконструировать изображение.

Чтобы преодолеть этот рубеж, следует учитывать, что логарифм фурье-компоненты $\text{Ln}(J)$ является многолистной функцией [38], определенной на римановой поверхности, и ее главное значение $\text{ln}(J)$ не является непрерывной функцией, поскольку имеет скачок величиной $2\pi i$ на разрезе комплексной плоскости при $\varphi = \pm i$. Значение фурье-компоненты изображения, соответствующее пространственной частоте (ξ, η) , под влиянием атмосферы описывает во времени на этой римановой поверхности случайную непрерывную траекторию $z = Z(\xi, \eta, t)$. Мнимая часть ее логарифма $\text{Im}[\text{Ln}(J)]$ является угловой координатой точки, изображающей искаженное

значение этой фурье-компоненты. Именно эта траектория, а не только отдельные точки на ней, должна быть предметом рассмотрения при наблюдении объекта и обработке его результатов. Практически это означает регистрацию мгновенных изображений через интервал времени, достаточно малый по сравнению с временным радиусом корреляции атмосферных искажений. Тогда шаг между отсчетами функции $E(\xi, \eta, t)$ будет достаточно мал для того, чтобы ошибка на 2π в оценке φ имела приемлемо малую вероятность.

Исследования по накоплению фаз продолжались [22], но одновременно велись поиски и в других направлениях.

9. Многолучевая интерферометрия.

Еще один способ, предложенный Родсом и Гудменом [39], состоял в формировании изображений объекта с помощью телескопа с безызыточной апертурой. Апертура такого телескопа состоит из отдельных субапертур, расположенных в узлах квадратной или гексагональной решетки и образующих безызыточную конфигурацию. (Оптимизации этих конфигураций посвящено много работ, в том числе сотрудников ИРЭ [40–44]). В таком телескопе каждая пространственная частота в спектре изображения передается только одной парой субапертур. Это позволяет записать уравнение, связывающее истинное значение фазы φ_k фурье-компоненты изображения с ее искаженным значением ψ_k в виде

$$\varphi_k + \delta_i - \delta_j = \psi_k, \quad (7)$$

где δ_i и δ_j – атмосферные искажения фазы волны на субапертурах с номерами i и j , передающими эту пространственную частоту. Эти уравнения для фаз всех передаваемых фурье-компонент в совокупности образуют систему уравнений, которую можно использовать для определения истинных фаз φ по измеренным ψ . В силу теоремы [45] такая система всегда будет недоопределенной. Однако используя для наблюдения несколько таких телескопов с разными конфигурациями апертуры, можно обеспечить необходимую избыточность измерения, в результате которой система уравнений (7) станет определенной или переопределенной. Решая ее, можно будет найти все неискаженные атмосферой фазы φ .

Этот метод в своем первоначальном виде имел два недостатка, которые следовало устранить. Первый связан с тем, что безызыточная диафрагма на апертуре телескопа будет перекрывать большую часть светового потока, который таким образом будет использоваться неэффективно. Чтобы устранить этот недостаток, была предложена новая модификация оптической схе-

мы, в которой все необходимые конфигурации субапертур располагались в пределах одной апертуры телескопа [46]. Эта идея позволяла ценой некоторого усложнения оптической конструкции обойтись только одним телескопом. Но даже такое решение было до некоторой степени полумерой, поскольку в таком телескопе не каждая пара субапертур участвовала в передаче пространственно-частотных окон. Схеме прибора не хватало симметрии, что является косвенным, но явным признаком несовершенства.

Новая идея появилась почти одновременно сразу в двух статьях: в [33] и несколько позже в [47]. Она обстоятельно изложена в [48] и рассмотрена с разных сторон в [49–55]. В этих работах был предложен и исследован многолучевой перископический интерферометр (МПИ), являющийся развитием идеи звездного интерферометра Физо-Майкельсона, в котором каждый световой пучок интерферирует с каждым другим. При этом световые пучки смещаются в поперечном направлении таким образом, чтобы новая, вторичная апертура стала безызыточной. Это позволяет разделить вклады в интерферограмму разных пар субапертур и записать для фаз прежнюю систему уравнений (7). Теперь все пары субапертур эффективно используются для передачи фурье-компонент изображения, световой поток используется полностью, а правильный выбор конфигурации первичной (входной) апертуры (теперь уже избыточной) обеспечивает однозначность решения системы уравнений (7).

10. Пространственное и временное накопление сигнала. Описанный выше метод тесно связан с вопросом о пространственном накоплении оптического сигнала. Астрономический объект можно считать удаленным на бесконечность. В этом случае в отсутствие неоднородной среды функция когерентности, зависящая от пары точек в плоскости наблюдателя, фактически зависит только от разности радиус-векторов точек этой пары. Ее значение равно фурье-компоненте изображения объекта на пространственной частоте, равной этому радиус-вектору (в надлежащих единицах). Поэтому, перемещая эту пару точек в плоскости наблюдателя как целое и измеряя значение функции когерентности, мы будем получать одно и то же значение, равное соответствующей фурье-компоненте.

Однако возмущение волны неоднородной средой случайным образом нарушает это постоянство. При достаточной величине сдвига эти возмущения будут статистически независимыми, и усреднение функции когерентности (или ее логарифма) по разным парам с одним и тем же k позволит определить ее с большей точностью. Это и есть пространственное накопление сигнала. (Это понятие было введено в работе [33].) Конеч-

но, оно может быть более и менее совершенным. Формирование изображения традиционным телескопом сопровождается пространственным накоплением сигнала, как это видно из формулы (3). Оно состоит в арифметическом усреднении функции когерентности по разным парам точек. Такое накопление близко к оптимальному при малых q , однако при $q \geq \pi$ его неоптимальность проявляется очень резко. Описанный выше интерферометр как раз и позволяет приблизиться к оптимальному способу пространственного накопления.

Временное накопление сигнала при наблюдении сквозь турбулентную атмосферу тоже требует особого внимания. При наблюдении слабых объектов очень часто можно встретиться с такой ситуацией, когда за время экспозиции на светоприемник приходит всего несколько фотонов, а иногда и меньше одного фотона (в среднем). На первый взгляд, единственный выход в этом случае состоит в увеличении времени экспозиции. Это входит в противоречие с требованием, чтобы время экспозиции было мало по сравнению со временем заморозки атмосферы. В действительности прием слабого сигнала в режиме счета фотонов не исключает более действенных способов накопления сигнала.

Накапливая вместо одиночных фотонных событий их пары, можно получить автовертку изображения объекта, фурье-образ которой есть энергетический спектр объекта. Такое наблюдение эквивалентно спекл-интерферометрии, но пригодно и в режиме счета фотонов. Накапливая тройки фотонных событий, можно получить биспектр и по нему найти также фазы фурье-компонент изображения. Интересно отметить, что при наблюдении слабого объекта с помощью телескопа соответствующие соотношения носят приближенный характер, а при наблюдении с помощью МПИ они выполняются точно. Таким образом, здесь пространственное и временное накопление сигнала оказываются тесно связанными.

В работе [33] был рассмотрен вопрос о пространственном и временном накоплении сигнала и введено понятие порядка накопления сигнала, определяемого числом фотонных событий, подлежащих совместному учету. Легко видеть из вероятностных соображений, что время, необходимое для накопления сигнала с требуемой точностью, быстро растет с увеличением порядка накопления. Поэтому накопление информации о фазах будет обходиться намного дороже, чем о модулях. Отсюда следует, что при слабом сигнале последовательность кадров, обеспечивающая определение фаз с требуемой точностью, будет тем более обеспечивать высокую точность определения модулей. Значит, можно сказать, что спекл-интерферометрия – это только малая часть про-

блемы накопления сигнала для достижения дифракционного разрешения.

11. Многолучевой интерферометр и традиционный телескоп. Интерферометрический метод формирования изображений, предложенный в работе [33] и кратко описанный в разд. 8, открывает новые перспективы и приближает нас к границам принципиально возможного. С точки зрения накопления сигнала он более совершенен, чем формирование изображения традиционным телескопом. При наблюдении с помощью МПИ осуществляется очень эффективный способ накопления сигнала: избыточность измерения функции когерентности достигает такой степени, что появляется возможность на ее основе полностью исключить атмосферные искажения. Поэтому возникает вопрос о внедрении его в практику астрономических наблюдений и прикладных исследований. В частности, в последнее время рассматривается вопрос о строительстве больших многозеркальных телескопов. В работе [53] предлагается строить такие телескопы по интерферометрической схеме.

Однако большинство астрономических телескопов в мире построены по традиционной схеме, и переделка их была бы весьма проблематичной. С другой стороны, теория оптимальной обработки последовательности изображений, получаемых при наблюдении сквозь атмосферу с помощью традиционного телескопа, еще не создана, и пределы возможностей достижения дифракционного предела разрешения еще неизвестны. Поэтому поиск новых, все более совершенных субоптимальных способов накопления сигнала при таких наблюдениях вполне оправдан и желателен.

Это возвращает нас к задаче реконструкции изображения по серии мгновенных изображений, полученных с помощью традиционного телескопа при наблюдении сквозь турбулентную атмосферу.

12. Новый метод: накопление полных фаз. Из разд. 8 следует, что для корректного усреднения фаз необходимо оперировать с полным значением логарифма фурье-компоненты, а не только с его главным значением. Это значит, что нужно следить за движением точки, изображающей искаженную фурье-компоненту, не просто по комплексной плоскости, а по римановой поверхности, учитывая ее переходы с одного листа на другой. Здесь, однако, возникает вопрос: как, вычислив главное значение фазы, найти недостающее слагаемое $2\pi k$? Авторы работы [13] хотели ответить на него, сравнивая значения фазы данной и соседних фурье-компонент и используя непрерывность зависимости фазы фурье-компоненты от пространственной частоты. Однако на этом пути они не достигли успеха по причинам прин-

ципиального характера. В наших исследованиях был принят другой курс [23, 24]: мы сравнивали значение фазы в текущий момент времени с ее значениями в соседние моменты времени и исходили из предположения, что изменение фазового искажения со временем описывается непрерывной функцией. Это позволяет найти необходимую добавку к фазе из условия максимальной близости данного значения к предыдущему.

Таким образом, процедура усреднения фаз состояла из двух шагов: сначала отслеживание фазы, позволяющее найти полную фазу по вычисленному ее главному значению и предыдущим значениям, а затем суммирование полных фаз, приводящее в конечном счете к получению среднего по времени значения полной фазы. Эта процедура оказалась заметно эффективнее, чем прямое или косвенное усреднение главных значений. Она давала приемлемые изображения при $q = \pi$, а критическое значение q , за которым реконструированное изображение полностью разрушалось фазовыми искажениями, достигло величины около 2π .

Это можно было считать успехом, однако оставалось желательным выяснить, каково же происхождение этого ограничения: почему при увеличении q выше критического значения теряется возможность реконструкции изображения теперь, когда, казалось бы, вся процедура усреднения выполняется вполне корректно?

Исследования, предпринятые с этой целью, позволили прояснить природу этого явления, однако для этого потребовалось рассмотрение весьма специфических подробностей.

13. Принципиальный предел возможности накопления фаз. Дальше речь пойдет о вещах довольно сложных, однако по определенным соображениям ограничимся лишь общей картиной. Более подробное рассмотрение этого вопроса можно найти в работах [30, 56].

С точки зрения физики работу телескопа можно представить себе как интерференцию световых потоков, приходящих в одно и то же место фокальной плоскости от разных частей апертуры. Атмосферное искажение волнового фронта тонким фазовым экраном в малой окрестности точки на апертуре можно представить как сочетание фазового сдвига и наклона волнового фронта. Рассматривая две произвольные точки на апертуре телескопа, удаленные друг от друга больше, чем на радиус корреляции, и окрестность вокруг каждой из них, достаточно малую, чтобы пренебречь влиянием кривизны фронта, мы увидим, что в отсутствие атмосферы световые пучки, прошедшие через эти окрестности, достигают фокальной плоскости в одном и том же месте и там интерферируют. Под влиянием атмосферы фазо-

вый сдвиг и наклон фронта претерпевают изменение, разное для разных пучков. Разница фазовых сдвигов порождает искажение фазы фурье-компоненты, передаваемой этой парой пучков; ее влияние можно уменьшить путем накопления фаз. Однако разница наклонов приводит к совсем другому эффекту: к смещению этих пучков относительно друг друга. Когда это смещение становится большим, эти пучки приходят в разные места фокальной плоскости и перестают интерферировать. Таким образом, в получаемом изображении информация о фазах таких фурье-компонент не содержится, и пытаться извлекать ее отсюда каким-либо способом бесполезно. Это происходит, когда среднее квадратичное значение фазового искажения достигает 2π . Таким образом, мы видим принципиальный предел возможности накопления фаз, причем связанный не со способом накопления фаз, а со способом формирования изображения. Чтобы преодолеть этот барьер, теперь нужно искать новый способ формирования изображений.

14. Накопление фаз и многолучевой интерферометр. Уточним теперь сказанное выше с количественной стороны. Легко видеть [30, 56], что характерный наклон фазового фронта волны по сравнению с его первоначальным положением, обусловленный влиянием атмосферных неоднородностей, равен h/l , где h – среднее квадратичное отклонение фронта от невозмущенного положения, а l – характерный размер атмосферных неоднородностей. При диаметре D , заметно превышающем l , изображение точки в фокальной плоскости оказывается суммой пятен от каждого участка апертуры, соответствующего своей неоднородности. Каждое из этих пятен имеет характерный дифракционный размер $F\lambda/l$ и смещено относительно невозмущенного положения на величину Fh/l , где F – фокусное расстояние телескопа. При $h > \lambda$ смещение пятен относительно друг друга становится больше их размера и световые потоки перестают интерферировать, что исключает возможность измерения фаз фурье-компонент, передаваемых соответствующими парами участков апертуры. Это является фактором, который ставит принципиальный предел достижению дифракционного разрешения, когда $D/l > 1$. Таким образом, при наблюдении с традиционным телескопом больших размеров и атмосферных искажениях фазы больше 2π дифракционное разрешение можно считать недостижимым.

По-видимому, единственный выход из этого положения состоит в применении для формирования изображения модифицированного телескопа с составной апертурой, состоящей из не-

которого числа субапертур достаточно малого диаметра d . Это позволит увеличить критическое значение до величины $2\pi l/d$. Такой инструмент должен функционировать как набор интерферометров Физо-Майкельсона, каждый из которых будет измерять функцию когерентности поля в своей области частотной плоскости, а все эти области в совокупности будут полностью покрывать область частотной плоскости, подлежащую передаче этим инструментом. При этом, однако, интерференционные картинки от разных пар субапертур не должны перекрываться одновременно в фокальной и частотной области, иначе их не удастся разделить при последующей обработке. Это ставит специальные требования к оптической схеме инструмента.

Наиболее эффективной для этой цели представляется схема МПИ [48], описанная в разд. 9. При этом речь идет не об интерферометрическом методе формирования изображений [33, 48, 54], а лишь об измерении функции когерентности с корректным накоплением фаз [23, 24]. Разница между этими двумя подходами проявляется только на этапе обработки наблюдательных данных. Однако детальный анализ этого вопроса показывает [56–58], что усовершенствование этих двух методов – интерферометрического и метода накопления полных фаз – в конечном счете приводит к их слиянию в части техники наблюдения: наблюдение должно вестись с помощью МПИ с достаточно высокой частотой следования кадров. Дальнейшее усовершенствование должно привести и к их слиянию на этапе обработки.

15. Перспективы дальнейших исследований. Подводя итог сказанному о текущем состоянии этих исследований, можно предположить, что накопление полных фаз, интерферометрическая схема телескопа и адаптивная коррекция оптики останутся и дальше естественными элементами новых методов субоптимального накопления сигнала при наблюдении сквозь турбулентную атмосферу. Но при этом хотелось бы предсказать направление эволюции этих идей. С этой точки зрения стоит рассмотреть следующие соображения.

Как известно, среднеквадратичное искажение фазы проходящей волны зависит не только от состояния атмосферы, но и от длины волны. Поэтому одно и то же состояние атмосферы может быть хорошим на волне 2,4 нм и плохим на волне 0,3 нм. (Это границы окна видимости сквозь атмосферу.) Если на длинной волне $q = \pi/2$, можно получить хорошее изображение объекта; при этом на короткой волне q будет равно 4π и изображение будет весьма плохим. Однако совместные получение и обработка последовательностей изо-

бражений на двух волнах открывают следующую возможность. Получив хорошее изображение объекта на длинной волне, его можно использовать в качестве ядра (поскольку операция свертки является симметричной) и, фильтруя с этим ядром каждый кадр длинноволновой последовательности, найти соответствующее атмосферное ядро, имевшее место при получении этого кадра. Поскольку это ядро есть квадрат модуля фурье-образа поля фазовых искажений, это поле можно найти способом, о котором шла речь в конце разд. 7. Учитывая обратно пропорциональную зависимость фазового искажения от длины волны, из полученного поля искажения на длинной волне можно найти поле искажений на короткой волне, а по нему и мгновенное атмосферное ядро для каждого кадра, полученного на короткой волне. Это открывает возможность восстановить коротковолновую последовательность фильтром, аналогичным винеровскому (но на множестве положительных функций).

Если бы Александр Яковлевич прочитал этот раздел, он воскликнул бы: «Так это уже давно надо было сделать!»

Библиографический список

1. *Маршалль А.* Структура оптического изображения. Дифракционная теория и влияние когерентности света / А. Маршалль, М. Франсон; пер. с франц. под ред. Г. Г. Слюсарева. – М.: Мир, 1964. – 295 с.
2. *Корниенко Ю. В.* Радиовидение и цифровая обработка изображений / Ю. В. Корниенко // Электрон. и радиопизика миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн / под ред. А. Я. Усикова. – К.: Наук. думка, 1986. – С. 294–338.
3. *Получение предельно высокого пространственного разрешения астрономических объектов* / В. Н. Дудинов, В. С. Цветкова, В. В. Вакулик, А. А. Минаков // 200 лет астрономии в Харьковском университете: сб. науч. тр. – Х.: ХНУ, 2008. – С. 332–352.
4. *Система цифровой обработки изображений* / А. Я. Усиков, А. А. Бабичев, А. Д. Егоров и др. // Вестн. АН УССР. – 1977. – № 10. – С. 47–58.
5. *Смирнова М.* Мирный бог войны / М. Смирнова // В мире науки. – 2005. – № 7. – С. 16–19.
6. *Анализ корреляции между высотой и шероховатостью поверхности Венеры по радиолокационным данным КА «Пионер-Венера-1»* / А. Я. Усиков, Ю. Г. Шкуратов, Д. Г. Станкевич и др. // Докл. АН СССР. – 1982. – 264, № 3. – С. 591–595.
7. *On geological processes on Venus: analysis the relationship between altitude and degree of surface roughness* / A. T. Bazilevsky, A. V. Bobina, V. P. Shashkina et al. // The Moon and Planets. – 1982. – 27, N 1. – P. 63–89.
8. *Изображение рельефа Венеры по данным орбитальной радиолокации* / Ю. В. Корниенко, Д. Г. Станкевич, А. Т. Базилевский, Ю. Г. Шкуратов // Докл. АН УССР. Сер. А. – 1982. – № 5. – С. 87–88.
9. *Визуализация данных радарной альтиметрии Венеры* / Д. Г. Станкевич, С. П. Редькин, А. Т. Базилевский и др. // Космич. исследования. – 1984. – 22, вып. 1. – С. 138–140.
10. *De Groot M.* Оптимальные статистические решения / М. Де Гроот; пер. с англ. под ред. Ю. В. Линника, А. М. Кагана. – М.: Мир, 1974. – 491 с.
11. *Парусимов В. Г.* Об отыскании наиболее вероятного рельефа участка поверхности по его оптическому изображе-

- нию / В. Г. Парусимов, Ю. В. Корниенко // Астрометрия и астрофизика: сб. науч. тр. – К.: Наук. думка, 1973. – Вып. 19. – С. 20–24.
12. Корниенко Ю. В. Винеровский подход к определению оптических характеристик поверхности планеты по результатам фотометрических наблюдений / Ю. В. Корниенко, И. А. Дулова, Нгуен Суан Ань // Кинематика и физика небесных тел. – 1994. – 10, № 5. – С. 69–76.
 13. Kornienko Yu. V. Determination of the relief and radio-optical characteristics of a region the underlying terrain by the data obtained from a synthesized aperture radar (SAR) / Yu. V. Kornienko, Nguyen Xuan Anh, I. A. Dulova // Intern. Workshop & Exhibition on Geophysics. – Hanoi, 1996. – 3. – P. 146–147.
 14. Корниенко Ю. В. Определение рельефа и радиооптических параметров участка поверхности с помощью радиолокатора с синтезированной апертурой / Ю. В. Корниенко, Нгуен Суан Ань // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 1996. – 1, № 1. – С. 129–133.
 15. Нгуен Суан Ань. Определение рельефа и оптических характеристик участка поверхности планеты по серии его изображений: дис. ... канд. физ.-мат. наук / Нгуен Суан Ань. – К., 1999. – 151 с.
 16. Дулова И. А. Определение рельефа поверхности клинометрическим методом при избытке или недостатке исходных данных / И. А. Дулова, Ю. В. Корниенко, С. И. Скуратовский // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2007. – 12, № 2. – С. 408–415.
 17. Восстановление рельефа поверхности по одиночным изображениям с помощью фотометрического метода / И. А. Дулова, С. И. Скуратовский, Ю. В. Корниенко, Н. В. Бондаренко // Астроном. вестн. – 2008. – 42, № 6. – С. 557–571.
 18. Dulova I. A. Involvement of altimetric information into relief reconstruction from images with improved photoclinometry [Электронный ресурс] / I. A. Dulova, Yu. V. Kornienko, N. V. Bondarenko // The 50th Vernadsky/Brown Microsymposium on Comparative Planetology Vernadsky Institute. – Moscow, 2009. – Режим доступа: [www/URL: http://www.planetology.ru/books/vernadsky-brown/vernadsky-brown_50_2009.pdf](http://www.planetology.ru/books/vernadsky-brown/vernadsky-brown_50_2009.pdf).
 19. Ground-Based Direct Detection of Exoplanets with the Gemini Planet Imager (GPI) / J. R. Graham; B. Macintosh, R. Doyon et al. // American Astronomical Society, AAS Meeting #211, #134.02; Bulletin of the American Astronomical Society. – 2007. – 39. – P. 968.
 20. Содин Л. Г. О возможности достижения дифракционного предела разрешения при работе телескопа в турбулентной атмосфере / Л. Г. Содин // Письма в Астроном. журн. – 1976. – 2, № 11. – С. 554–558.
 21. Knox K. T. Recovery of images from atmospherically degraded short exposure images / K. T. Knox, B. J. Thompson // Astrophysical J. – 1974. – 193. – P. L45–L48.
 22. Сравнительный анализ методов восстановления фазы пространственного спектра астрономического объекта по серии искаженных атмосферой короткоэкспозиционных изображений / П. А. Бакут, Е. Н. Ку克林, А. Д. Ряхин и др. // Оптика и спектроскопия. – 1985. – 58, № 6. – P. 1314–1317.
 23. Корниенко Ю. В. О реконструкции неискаженного изображения объекта по серии его изображений, искаженных средой со случайными неоднородностями показателя преломления / Ю. В. Корниенко, С. И. Скуратовский // Доп. НАН України. – 2010. – № 2. – С. 83–89.
 24. Корниенко Ю. В. Накопление фаз фурье-компонент при наблюдении объекта сквозь турбулентную атмосферу / Ю. В. Корниенко, С. И. Скуратовский // Кинематика и физика небесных тел. – 2011. – 27, № 6. – С. 52–63.
 25. Кулешов Е. М. Измерения в субмиллиметровом диапазоне радиоволн / Е. М. Кулешов // Электрон. и радиофизика миллиметровых и субмиллиметровых волн / под ред. А. Я. Усикова. – К.: Наук. думка, 1986. – С. 140–157.
 26. Борн М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф.; пер. с англ. ред. Г. П. Мотулевич. – М.: Наука, 1973. – 719 с.
 27. Корниенко Ю. В. Проблема углового разрешения при наблюдении астрономических объектов сквозь атмосферу / Ю. В. Корниенко // 200 лет астрономии в Харьковском университете: сб. науч. тр. – Х.: ХНУ, 2008. – С. 353–379.
 28. Корниенко Ю. В. Накопление фаз фурье-компонент при наблюдении объекта сквозь турбулентную атмосферу II / Ю. В. Корниенко, С. И. Скуратовский // Кинематика и физика небесных тел. – 2012. – 28, № 2. – С. 45–58.
 29. Корниенко Ю. В. Механизм разрушения информации при наблюдении сквозь неоднородную среду / Ю. В. Корниенко, С. И. Скуратовский // Радиофизика и радиоастрономия. – 2012. – 17, № 1. – С. 39–48.
 30. Голдман С. Теория информации / С. Голдман; пер. с англ. под ред. В. В. Фурдуева. – М.: Изд-во иностр. лит., 1957. – 446 с.
 31. Корниенко Ю. В. Накопление сигнала при наблюдении астрономического объекта сквозь турбулентную атмосферу / Ю. В. Корниенко, В. Н. Уваров // Докл. АН УССР. Сер. А. – 1987. – № 4. – С. 60–63.
 32. Дудинов В. Н. О возможности учета погрешностей, вызванных замытием изображения планет / В. Н. Дудинов // Астрономический журн. – 1969. – 46, вып. 5. – С. 1064–1073.
 33. Labeyrie A. Attainment of diffraction limited resolution in large telescopes by fourier analysing speckle patterns in star images / A. Labeyrie // Astron. et astrophys. – 1970. – 6, N 1. – P. 85–87.
 34. Корниенко Ю. В. О возможности восстановления изображения слабого объекта, искаженного влиянием земной атмосферы / Ю. В. Корниенко // Докл. АН УССР. Сер. А. – 1977. – № 10. – С. 931–933.
 35. Fienup J. R. Reconstruction of the object from the modulus of its Fourier transform / J. R. Fienup // Opt. Lett. – 1978. – 3, N 1. – P. 97–99.
 36. Скуратовский С. И. О реконструкции изображения объекта по модулю его фурье-образа / С. И. Скуратовский, Ю. В. Корниенко // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2008. – 13, № 1. – С. 130–141.
 37. Скуратовский С. И. Восстановление поля фазовых искажений по изображению точечного источника / С. И. Скуратовский // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2009. – 14, № 2. – С. 222–228.
 38. Аленыцын Ю. Е. Многолистная функция / Ю. Е. Аленыцын // Математическая энциклопедия: в 5 т. Т. 3. – М.: Сов. энцикл., 1982. – С. 723–728.
 39. Rhodes W. T. Interferometric technique for recording and restoring images by unknown aberration / W. T. Rhodes, J. W. Goodman // J. of Optical Society of America. – 1973. – 63, N 6. – P. 647–657.
 40. Корниенко Ю. В. Интерферометрический метод формирования изображений и проблема оптимизации апертур интерферометра / Ю. В. Корниенко // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2000. – 5, № 1. – С. 186–190.
 41. Корниенко Ю. В. Построение безызыбыточных антенных конфигураций на квадратной решетке методом случайного поиска / Ю. В. Корниенко // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2000. – 5, № 3. – С. 148–154.
 42. Корниенко Ю. В. Построение безызыбыточных антенных конфигураций на гексагональной решетке методом случайного поиска / Ю. В. Корниенко // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2002. – 7, № 1. – С. 142–153.
 43. Kornienko Yu. V. Informational efficiency of a multibeam interferometer in the observation of an object through the terrestrial atmosphere / Yu. V. Kornienko, V. V. Pugach // Proc. Intern. Conf. Astronomy in Ukraine 2000 and beyond. Kinematics and physics of celestial bodies, supplement. – Kiev, 2000. – № 3. – P. 302–304.

44. *Kopilovich L. E.* Construction of nonredundant antenna configurations on square and hexagonal grids of large size / L. E. Kopilovich // *Experimental Astronomy*, 2013. – 36, N 1–2. – P. 425–430.
45. *Kopilovich L. E.* Upper estimates for the element number of nonredundant antenna configurations on square and hexagonal grids / L. E. Kopilovich // *Experimental Astronomy*. – 2010. – 28, N 1 – P. 1–9.
46. *Уваров В. Н.* О возможности получения изображений с дифракционным разрешением при наблюдении сквозь неоднородную среду / В. Н. Уваров // *Докл. АН УССР*. – 1979. – № 10. – С. 839–841.
47. *Roddier F.* Redundant versus nonredundant beam recombination in an aperture synthesis with coherent optical arrays / F. Roddier // *J. of Optical Society of America. Series A*. – 1987. – 4, N 8. – P. 1396–1401.
48. *Корниенко Ю. В.* Интерферометрический подход к проблеме видения сквозь турбулентную атмосферу / Ю. В. Корниенко // *Кинематика и физика небесных тел*. – 1994. – 10, № 2. – С. 98–106.
49. *Kornienko Yu. V.* Studies of the interferometric method for forming astronomical images as to its resistance to phase distortions in atmosphere / Yu. V. Kornienko, V. A. Leyferov // *Кинематика и физика небесных тел*. – 1994. – 10, № 1. – С. 65–67.
50. *Корниенко Ю. В.* Информационная эффективность многолучевого интерферометра при наблюдении объекта сквозь неоднородную среду / Ю. В. Корниенко, В. А. Лейферов, В. В. Пугач // *Радиофизика и электрон.*: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – X., 1997. – 2, № 2. – С. 132–136.
51. *Корниенко Ю. В.* Устойчивость интерферометрического метода формирования изображений к фазовым искажениям волнового фронта / Ю. В. Корниенко // *Доп. НАН України*. – 2000. – № 5. – С. 78–82.
52. *Пугач В. В.* Интерферометрический метод формирования изображений: обзор результатов и моделирование / В. В. Пугач // *Радиофизика и электрон.*: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – X., 2004. – 9, спецвып. – С. 140–153.
53. *Корниенко Ю. В.* Интерферометрический метод формирования изображений как основа построения многозеркальных телескопов / Ю. В. Корниенко, В. В. Пугач // *Вісник астрономічної школи*. – 2004. – 3, № 2. – С. 70–80.
54. *Корниенко Ю. В.* Проблема видения сквозь турбулентную атмосферу и интерферометрический метод формирования изображений / Ю. В. Корниенко, В. В. Пугач // *Успехи современной радиоэлектрон. Зарубежная электрон.* – 2004. – № 1. – С. 52–57.
55. *Kornienko Yu.* Interferometric method for image formation: the basic ideas and computer simulation / Yu. Kornienko, V. Pugach // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Suppl. Ser. Proc. Intern. Conf. Astronomy in Ukraine – Past, Present and Future*. – 2005. – N 5. – P. 534–536.
56. *Корниенко Ю. В.* Накопление фаз фурье-компонент при наблюдении объекта с помощью телескопа с составной апертурой / Ю. В. Корниенко, С. И. Скуратовский // *Доп. НАН України*. – 2011. – № 10. – С. 73–79.
57. *Корниенко Ю. В.* Накопление фаз фурье-компонент при наблюдении объекта сквозь турбулентную атмосферу III / Ю. В. Корниенко, С. И. Скуратовский // *Кинематика и физика небесных тел*. – 2013. – 29, № 2. – С. 50–61.
58. *Скуратовский С. И.* Реконструкция изображения объекта по серии его мгновенных изображений, полученных сквозь турбулентную атмосферу: дис. ... канд. физ.-мат. наук / С. И. Скуратовский; Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – X., 2013. – 146 с.

Рукопись поступила 24.09.2013.

Yu. V. Kornienko

VISION THROUGH TURBULENT ATMOSPHERE

The paper is dedicated to the 110-anniversary of A. Ya. Usikov. The history of scientific researches in the digital image processing at the Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the National Academy of Sciences of Ukraine (IRE of NASU) is briefly written. The main point of the paper is the reaching of the diffraction resolution in observations through the turbulent atmosphere and the new results obtained in the IRE.

Key words: history of IRE of NASU, image processing, astronomical observation, turbulent atmosphere.

Ю. В. Корнієнко

БАЧЕННЯ КРИЗЬ ТУРБУЛЕНТНУ АТМОСФЕРУ

Стаття присвячена 110-річчю зі дня народження О. Я. Усикова. Стисло викладено історію досліджень в Інституті радіофизики та електроніки ім. О. Я. Усикова Національної академії наук України (ІРЕ НАНУ) з цифрової обробки зображень, які започаткував О. Я. Усиков. Головну увагу приділено проблемі досягнення дифракційного розділення при спостереженні крізь турбулентну атмосферу та новим результатам, які отримано в цьому напрямі в ІРЕ НАНУ за останній час.

Ключові слова: історія ІРЕ НАНУ, обробка зображень, астрономічні спостереження, турбулентна атмосфера.