

Анализ методов и средств контроля систем дистанционного зондирования Земли

77-30569/322927

02, февраль 2012

Афиногенов Е. И., Волосатова Т. М., Сельвесюк Н. И., Чичварин Н. В.

УДК 528.8(875.8)

МГТУ им. Н.Э. Баумана

ВВИА им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина

afinogenov.evgeniy@gmail.com

tamaravol@gmail.com

selvesyuk@yandex.ru

genrih.gertz@gmail.com

Введение

Основой публикации являются результаты проведенных исследований по разработке методов и средств оценки технического состояния современных систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в процессе испытания и эксплуатации. Также рассмотрены вопросы реконструкции аэрофотоснимков с учетом факторов условий полета носителя и регистрации аэрофильма. Исследование проведено с учетом принципиальных (теоретических) ограничений возможностей средств и геоинформационных технологий, обеспечивающих решение задач регистрации данных зондирования и обнаружения (распознавания).

Полученные результаты должны стать основой для создания системы испытания и эксплуатации аппаратуры ДЗЗ, а также позволят создать необходимую базу для формирования современной нормативно-технической документации (стандартов, руководств по испытанию авиационной техники) для оценки основных показателей, характеризующих эффективность применения и техническое состояние цифровой аппаратуры наблюдения

Для решения поставленных задач настоящей статье рассматриваются аэрофотоаппаратура (АФА), системы стабилизации положения АФА на различных носителях и системы привязки аэрофильмов к той или иной системе координат. Учтено, что основной спецификой ДЗЗ с помощью космических ЛА, является стабильность условий полета космического ЛА и условий регистрации с помощью аппаратуры зондирования. Поэтому основное внимание уделено средствам воздушной разведки. Кроме того, проведен анализ средств контроля основных параметров аппаратуры ДЗЗ, определяющих ее качественные характеристики.

Задачи решаются на основе анализа:

- Аэрофотоаппаратуры, применяемой в системах ДЗЗ.
- Средств контроля модуляционной передаточной функции (МПФ) аппаратуры ДЗЗ.
- Основных факторов навигации ЛА и свойств аэрофотоаппаратов, определяющих качество аэрофильмов при различных режимах полета в режиме съемки. Учитываются такие факторы, как смаз изображения, вызванный нескомпенсированным движением изображения в плоскости регистрации и дефокусировка, обусловленного вибрациями на борту ЛА.
- Особенности обработки аэрофильмов.

Качество регистрации и обработки аэрофильмов оценивается по следующим критериям:

- Разрешение на местности.
- Точность привязки кадра аэрофильма к определенной системе координат.

1. Анализ аппаратуры аэрофоторазведки

1.1 Принятые терминология и определения

При анализе учтено, что конструкции отечественной и зарубежной аппаратуры ДЗЗ во многом совпадают. Далее принимается, что аэрофотоаппарат (АФА), это оптико-механический, либо оптико-электронный прибор с элементами автоматики и электроники, предназначенный для получения с самолёта или другого летательного аппарата (ЛА) аэрофотоснимков земной поверхности.

1.2 Методы и средства аэрофотосъемки

1.2.1 Анализ тактико-технических характеристик (ТТХ) АФА с регистрацией на аналоговый носитель

Основные характеристики АФА топографического назначения, либо используемых для решения задач ДЗЗ рассмотрены авторами в работе [20], которая, как и отмечено в публикации, является естественным продолжением статьи [19]. Наверное, для критически настроенного читателя, желающего бегло ознакомиться с материалами настоящей статьи, не знакомясь с материалами работ [19] и [20], полезно отметить следующее:

- В статье [19] проводится системный анализ комплексов военной воздушной разведки и целеуказания с учетом динамики полета летательного аппарата – носителя АФА.
- В статье [20] говорится об анализе собственно аппаратуры военной воздушной разведки и целеуказания с учетом результатов [19], в частности, АФА.
- Настоящая статья посвящена анализу комплексов исключительно гражданского назначения – комплексов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с учетом

динамики полета летательного аппарата – носителя АФА, а также с учетом сходства и отличия гражданских комплексов ДЗЗ и военных комплексов воздушной разведки.

Рассмотрим результаты анализа ТТХ [20] следующих АФА с регистрацией на аналоговый носитель:

АФА-ТЭ, АФА-41, АФА-41, MRB, LMK, ТЭ-100, АФА 41-100, ТЭС-7, ТЭС-10, ТЭ-70, ТЭС-5, ТЭС-5, ТЭ-36, АФА 42/20, АФА 42/50, АФА 42/75, АФА 42/75, АФА 42/100.

Как видно из анализа ТТХ данных АФА, значительный диапазон выдержек, минимальная величина которых достигает 1 мс, принципиально позволяет уменьшить значение модуля вектора смаза. Однако степень компенсации смаза в рассмотренных АФА зависит от точности датчиков параметров полета W – воздушной скорости и H – высоты ЛА. Что касается фактора дефокусировки, то он в значительной мере компенсируется конструкцией АФА. Учет фактора турбулентности атмосферы возможен по методике, рассмотренной далее.

Рассмотрим примеры АФА с аналоговой регистрацией изображений, разработанных в последние десятилетия и успешно применяемые в настоящее время.

Аэрофотокамера для перспективного и планового фотографирования АФА-54

Аэрофотоаппарат АФА-54 предназначен для проведения планового и перспективного фотографирования земной поверхности с различных высот в целях обнаружения и распознавания объектов съемки в интересах народного хозяйства и обороны.

Фотоаппарат оснащен оптической системой компенсации сдвига и автоматической системой контроля экспозиции, корректировка по данным температуры/давления производится автоматически. Фотоаппарат изготавливается в 2-х модификациях с фокусным расстоянием 75 и 100 см. Аэрофотографический комплект состоит из двух фотоаппаратов, каждый вмонтирован в специальное устройство. Для проведения фотографирования в 2-х направлениях (перспективного) и в 3-х направлениях (комбинированного) фотоаппараты могут быть использованы вместе с автоматически поворачивающейся камерой вмонтированной в контейнер АКАФУ-33М. Как вариант, 2 идентичных фотоаппарата, управляемые одним командным прибором, могут быть установлены на носителе.

Аэрофотоаппарат для планового и перспективного фотографирования АК-108Ф

Аэрофотоаппарат АК-108Ф предназначен для проведения планового и перспективного фотографирования земной поверхности при одно-, двух- и трехмаршрутной съемке в дневное время суток в целях обнаружения и распознавания объектов съемки в интересах различных областей народного хозяйства и обороны.

Зеркало головное и кассета выполнены вращающимися и имеют возможность поворота в пределах $\pm 90^\circ$ относительно нулевого положения (плановая съемка), что позволяет производить во время полета перспективную фотосъемку с левого и правого борта ЛА.

Особенности конструкции

1. Автоматическая система, управляемая от бортовой цифровой вычислительной машины носителя, вырабатывающей соответствующие сигналы по вводимым в нее навигационным и экспонетрическим данным.
2. Наличие:
 - системы автоматического регулирования экспозиции;
 - системы линейной компенсации сдвига изображения во время экспонирования;
 - системы активной стабилизации сканирующего зеркала;
 - системы фокусировки по текущим данным температуры, давления и дальности фотографирования;
 - системы встроенного контроля работоспособности аппаратуры;
 - системы синхронизации поворота головного зеркала и кассеты.
 - Возможность фотосъемки в большом диапазоне изменения скоростей (W) и высот полета (H).

Аэрофотоаппарат для перспективного фотографирования АФА-86П

АФА-86П сконструирован для перспективного фотографирования земной поверхности в дневное время со сравнительно низкой высоты над уровнем моря на различных скоростях для обнаружения и распознавания предметов при фотографировании местности в интересах различных областей народного хозяйства и обороны.

Особенности конструкции

Автоматический аэрофотоаппарат АФА-86П управляется установленной на борту электронно-вычислительной машиной, вырабатывающей соответствующие сигналы по вводимым в нее навигационным и экспонетрическим данным. Особенности конструкции аэрофотоаппарата обеспечивают стабильность оптических характеристик при изменении условий окружающей среды, дистанционный ввод экспонетрических данных, фоторегистрацию навигационной и рабочей информации во время внутрикадровых интервалов. Аэрофотоаппарат снабжен встроенной системой проверки технических параметров для защиты от повреждений во время работы. Пленка обрабатывается на борту носителя, но аэрофотоаппарат может быть поставлен в двух модификациях по заказу покупателя: с химической обработкой пленки и без химической обработки пленки.

Используется с целями:

- обнаружения и распознавания объектов-нарушителей границ водного пространства;
- экологического и природно-охранного контроля лесных массивов.

1.2.2 Цифровые аэрофотоаппараты (ЦАФА)

Аналитический обзор ЦАФА, результаты которого приведены ниже, проведен по характеристикам иностранных аппаратов. Связано это с тем, что публикаций по отечественным ЦАФА практически нет. Исключение составляет описание системы оптического наблюдения СОН разработки УОМЗ.

Отметим следующие принципиальные особенности, отличающие конструкцию ЦАФА от АФА с аналоговой регистрацией, существенные для задач, рассматриваемых в настоящей статье.

- Размеры цифрового регистратора могут достигать десятков мм., в то время как размеры аналогового носителя составляют десятки см., поэтому для увеличения поля зрения принимают специальные проектные решения, рассмотренные далее.
- Зерно (условный пиксел) аэрофотопленки может иметь размер до десятых долей Мкм, в то время пиксел цифрового регистратора ограничен единицами Мкм. Это заставляет разработчиков применять специальные решения, например применение нескольких линеек ПЗС, смещенных друг относительно другой на величину, равную дробной части пиксела. Такое техническое решение характерно для космических фотоаппаратов и для ЦАФА разработки Leica.

Для дальнейшего анализа ЦАФА, пригодных для решения задач ДЗЗ полезно использовать следующую квалификацию.

Таблица 1

Классификация цифровых аэрофотоаппаратов по размеру регистрируемого кадра

Класс аэрофотоаппаратов	Размер результирующего кадра, Мпкс
Малоформатные	до 16
Среднеформатные	16–64
Широкоформатные	более 64

Анализ показывает, что наиболее распространены крупноформатные (широкоформатные) камеры, например, UltraCam-X Prime (Microsoft-Vexcel Imaging GmbH, Австрия), DMC (Intergraph Corp., США), ADS80 (Leica Geosystems AG, Швейцария) [1i-4i], которые позиционируются производителями в качестве замены аналоговых аэрофотокамер. Для съемки линейных и небольших площадных объектов эффективны среднеформатные камеры.

Для решения комплексных задач ДЗЗ могут задействоваться комбинации камер — крупноформатная камера снимает в направлении надира, среднеформатные под углом к нему (перспективная съемка). Как отмечалось, размер одного кадра на аналоговом регистраторе как правило составляет 230х230 мм. После сканирования пленки на специальном фотограмметрическом сканере с типичным разрешением 15 мкм получают цифровые изображения размером 15х15 тыс. пикселей, т. е. больше 200 мегапикселей. В настоящее время светочувствительные матрицы такого размера не производятся. Поэтому для получения цифровых изображений сравнимого размера в камерах UltraCam-X и DMC осуществляется «сшивка» фрагментов изображений, полученных несколькими матрицами. В камере UltraCam-X Prime таких матриц девять. Съемка ведется четырьмя объективами, ее синхронизация выполняется за счет движения летательного аппарата таким образом, чтобы совместить центры проекции объективов. Этот фактор является существенным при разработке математической модели полета носителя ЦАФА. Размер результирующего кадра составляет 14 430х9420 пикселей (136 мегапикселей).

В камере DMC применяется другой подход — съемка четырьмя объективами ведется синхронно с точностью 0,01 миллисекунды. Размер результирующего кадра — 13500х8000 пикселей (108 мегапикселей). Другим подходом для получения цифровых изображений большого размера является использование светочувствительной линейки или группы линеек ПЗС, которая, перемещаясь вместе с самолетом, сканирует пространство предметов. Этот метод, принятый при съемке с космических аппаратов, нашел применение и

в аэро съемке (камера ADS80). В отличие от условий формирования спутниковых изображений, когда траектория движения носителя не подвержена колебаниям, аэроизображения требуют дополнительной коррекции, а режим съемки – стабильного горизонтального полета ЛА. Таким образом факторы неустойчивости движения ЛА необходимо учесть в модели возмущенного полета. Крупноформатные камеры UltraCam и DMC используют черно-белые (grayscale) матрицы для получения изображения с высоким разрешением. Одновременно ведется съемка на матрицы с меньшим разрешением, чувствительные в красном, синем, зеленом и инфракрасном диапазонах спектра. Соотношение числа черно-белых и цветных пикселей составляет 22 для DMC и 9 для UltraCam. Для формирования цветных изображений с высоким разрешением для этих камер необходимо использовать алгоритм паншарпенинга (pan-sharpening). Для ADS80 подобные действия не нужны, так как параллельно со съемкой на черно-белую линейку ведется съемка на линейки, чувствительные в красном, синем, зеленом и инфракрасном диапазонах спектра. При этом за счет специальной оптики все линейки имеют единый центр проекции, и процедура получения цветного или спектрального изображения сводится к простому «смешиванию» каналов. Однако факторы неустойчивости полета носителя данного ЦАФА и в данном случае нуждаются учету в математической модели ЛА в режиме аэрофотосъемки.

Среднеформатные камеры по конструкции существенно проще. Наиболее известными являются камеры: RMK-D (Intergraph Z/I Imaging, США), DSS (Applanix Corp., Канада), RCD100 (Leica Geosystems, Швейцария), Rollei AIC (Trimble Navigation, США), DiMAC Lite (DIMAC Systems, Люксембург). Как правило, эта аппаратура имеет разрешение 20–60 мегапикселей, оснащена светочувствительной матрицей Байра, одним объективом и сразу формирует цветное или инфракрасное изображение.

Как отмечалось, важной характеристикой цифровых аэрокамер является физический размер пикселя матрицы. Чем он больше, тем больше фотонов регистрируется в единицу времени, что при прочих равных параметрах позволяет проводить съемку при худших условиях освещенности. Большинство цифровых аэрокамер создают изображения глубиной цвета более 8 бит на пиксел, что позволяет разрешить детали в тенях, недоступные при аналоговой съемке. Угол обзора цифровых камер приблизительно соответствует углу обзора аналоговых камер с фокусным расстоянием 300 мм. Таким образом, цифровые камеры являются длиннофокусными. Быстродействие (число кадров в единицу времени) современных камер таково, что возможна съемка с малых высот, при которых размер пикселя на местности (GSD) составляет единицы (3–5) сантиметров при 60% перекрытии соседних снимков. Однако в этих режимах существенными становятся смаз и дефокусировка. Кроме того, существенным является учет параметров турбулентности

атмосферы (слоя пространства). Фотограмметрическая обработка снимков, полученных цифровыми кадровыми аэрокамерами, в основном аналогична обработке аналоговых снимков. Более того, процедура внутреннего ориентирования цифровых аэроснимков в известных комплексах (ГИС) значительно упрощена и заключается в вводе данных из паспорта камеры. Для сканирующей камеры ADS80 значительная часть фотограмметрической обработки проводится с использованием программного обеспечения. Некоторые цифровые фотограмметрические системы позволяют выполнять стереообработку (построение ЦМР, рисовку в стереорежиме) и ортотрансформирование материалов, полученных на основе снимков ADS80.

Компания DiMAC Systems производит выпуск крупноформатной аэрокамеры DiMAC WiDE+ с разрешением 13000x8900 пикселей (116 мегапикселей). Изображение (цветное или инфракрасное) формируется из двух 60-мегапиксельных модулей и не требует паншарпенинга.

Уральский оптико-механический завод производит малогабаритные системы круглосуточного оптического наблюдения СОН-910 и СОН-820. Устанавливают их на беспилотных носителях сухопутного и морского базирования. Используемое в данных системах оборудование (в стандартной комплектации — видеокамеру и тепловизор) монтируют на подвижную часть гиростабилизированной платформы, которая с помощью микромеханических гироскопов компенсирует вибрацию летательного аппарата. В результате частично фильтруются вибрации относительно земной системы координат, что обуславливает высокую четкость изображения. Следует заметить, что в известных иностранных системах наблюдения чаще всего стабилизируется не положение камеры относительно земли, а ее линия визирования в пространстве. Оптические оси при этом стабилизируются независимо от изменений пространственного положения ЛА. Однако изображение получается размытым, т. к. высокочастотные составляющие вибрации при таком способе не отфильтровываются. Соответственно дальность обнаружения и распознавания объектов у таких систем фактически значительно ниже.

Основные выводы проведенного анализа:

- Такие факторы, как направленный смаз, дефокусировка, обусловленная вибрациями и собственно дефокусировка – неизменные спутники аппаратуры ДЗЗ.
- Для компенсации вышеперечисленных факторов необходимо периодически проводить контроль важнейших характеристик аппаратуры ДЗЗ.
- Возможна наземная обработка искаженных изображений, для чего необходимо прежде регулярно измерять оптическую передаточную функцию объектива.

В настоящей работе использована общепринятая терминология, раскрытая ниже. При этом аппарат, являющийся центральным элементом любой из систем ДЗЗ, по сложившейся традиции именуется аэрофотоаппаратом.

Таким образом, далее принимается, что аэрофотосъёмка, как способ дистанционного зондирования - это фотографирование местности специальным аэрофотоаппаратом (АФА), установленным на самолёте, вертолёте, как пилотируемых, так и беспилотных.

К аппаратуре ДЗЗ предъявляются жёсткие требования в отношении обеспечения высоких измерительных и изобразительных свойств снимков, включая свойство построения 3D – изображений местности.

Независимо от назначения в соответствии со сложившейся практикой, плоскость регистрации аэрофотоаппарата может занимать заданное горизонтальное (плановая регистрация наиболее распространена) или наклонное (перспективная регистрация) положения. Обычно регистрацию выполняют однообъективным аэрофотоаппаратом, но в ЦАФА для увеличения площади, фотографируемой на одном снимке, — многообъективным аэрофотоаппаратом. В каждый момент фотографирования центр проектирования и плоскость аэроснимка занимают произвольное положение, в виду подвижности основания [1, 2]. Величины, определяющие пространственное положение снимка относительно принятой системы координат, называются элементами внешнего ориентирования снимка — три линейные координаты центра проектирования X_s , Y_s , Z_s и три угла, определяющие поворот снимка вокруг трёх осей координат. Для определения по аэроснимкам пространственных координат сфотографированных точек требуется сначала найти элементы внешнего ориентирования снимков, что связано с нахождением координат определённых геодезически некоторых точек, хорошо изобразившихся на снимках. Как известно [2] для установления в полёте элементов внешнего ориентирования применяют статоскоп, фиксирующий по изменению давления воздуха изменение высоты полёта, измеритель скорости – манометрический, либо доплеровский, высотомер, определяющий высоту фотографирования относительно местности, радиогеодезические станции, дающие возможность находить:

- расстояния от ЛА до пунктов триангуляции, расположенных на земной поверхности в определенных точках, - эти данные позволяют вычислить плановые координаты центра проектирования.
- Показания гировертикали, дающие возможность найти углы наклона снимка, их также можно определить обработкой снимков, на которых сфотографированы звёздное небо, положение Солнца или линия горизонта.

В последние десятилетия для определения геодезических координат в аппаратуре ДЗЗ активно применяются GPS и ГЛОНАС.

Перечисленная аппаратура обладает погрешностями, которые следует учесть при контроле параметров действующей аппаратуры.

Основными характеристиками АФА, принятыми во внимание при анализе, являются фокусное расстояние, формат кадра, минимальное время выдержки. Последнее особенно существенно для устранения фактора смаза при фотографировании со скоростных ЛА. При цифровой регистрации из-за особенностей конструкции цифровых регистраторов, имеющих более ограниченные линейные размеры, чем фотопленка распространены многообъективные АФА.

Фотографирование, осуществляемое аэрофотоаппаратом, установленным на самолете или каком-либо другом летательном аппарате, характеризуется следующими особенностями [1, 2, 3]:

- Воздушное фотографирование зачастую осуществляется с нежесткого основания, совершающего сложное движение под действием непрерывных аэродинамических возмущений и вибраций ЛА.
- Даже при стабилизации основания при условии стабилизации летательного аппарата системой ориентации остаточные возмущения случайным образом меняют положение линии визирования АФА.
- Между объектом фотографирования и фотографирующей системой всегда находится слой атмосферы, обладающий свойством светорассеяния с ярко выраженной спектральной избирательностью и переменной передаточной функцией.
- Освещенность объектов фотографирования и их контраст изменяются в значительном диапазоне, что предъявляет повышенные требования ко всей фотографирующей аппаратуре и к оптической системе в особенности.
- Изменяющиеся условия полета (температура, давление) влияют на параметры фотографирующей системы, что требует разработки способов компенсации (либо учета) этого влияния на качество изображения.
- Малые размеры изображения отдельных объектов фотографирования требуют повышенной разрешающей способности системы объектив — фоторегистратор и увеличения добротности фотографирующей системы.
- Важной особенностью фотографирования с помощью систем ДЗЗ является постоянство фокусировки и независимость ее от высоты фотографирования, поскольку оптическая система аэрофотоаппарата настроена на бесконечность.

- В процессе эксплуатации некоторые параметры аппаратуры ДЗЗ меняют свои значения, что можно учесть при обработке аэрофотоснимков путем решения обратной задачи. Для этого необходим постоянный контроль параметров АФА в процессе эксплуатации.

У современных аэрофотоаппаратов продолжительность цикла работы аэрофотоаппарата может изменяться от нескольких тысячных долей секунды у специальных аэрофотоаппаратов и до нескольких секунд у топографических. Последнее существенно влияет на появление смаза при регистрации.

Рациональное построение циклограммы работы аэрофотоаппарата предусматривает такой порядок чередования элементов цикла, при котором экспонирование регистратора происходило бы при колебаниях аэрофотоаппарата, меньших пороговых значений этих колебаний. Как отмечалось, основное требование, предъявляемое к аэрофотоаппаратам, независимо от типа регистратора - это обеспечение высокого качества изображения, которое может быть выполнено только при следующих условиях:

- Максимальная разрешающая способность по всему полю изображения.
- Большая светосила оптической системы при правильной передаче контраста изображения.
- Отсутствие влияния работы затвора на качество изображения. Затвор не должен вносить искажений в изображение и должен иметь высокий оптический коэффициент полезного действия, что характерно для центральных затворов.
- Высокоточное выравнивание аэрофотоплёнки в фокальной плоскости аэрофотокамеры, применяющей аналоговые фоторегистраторы.
- Высокое качество амортизации аэрофотокамеры при фотографировании с самолета (и особенно – с вертолета) и стабилизация оптической оси объектива.
- Постоянство элементов внутреннего ориентирования: фокусного расстояния камеры и главной точки снимка.

Важными требованиями являются возможность стабилизации оптической оси и введение поправки на угол сноса, а также сохранение заданного интервала между циклами съемки. Удовлетворение этих требований обеспечивает постоянство перекрытия между снимками. Это существенно и при решении задачи формирования стереопар для построения 3D изображений [2].

Наиболее распространенные на сегодняшний день АФА с цифровой записью видеоинформации используют в качестве фотоприемников линейки и матрицы ПЗС, заполняющие поле зрения оптической системы так, чтобы во-первых повысить

разрешение, во-вторых обеспечить обзор в передней и дальней полусфере и в третьих, для решения задач стереофотограмметрии.

Типичным представителем таких АФА, использующий линейки, является аппарат фирмы Leica. Названный АФА предназначен для решения задач топографической съемки, а также для нужд промышленности и сельского хозяйства. Схема построения аппаратуры во многом аналогична той, которая применяется в космических системах ДЗЗ.

Но если, как отмечалось, носитель космических средств ДЗЗ отличается стабильной траекторией полета, то применение таких средств на воздушном ЛА требует соблюдения горизонтального, стабильного по тангажу и крену полету самолета-носителя. Отклонения необходимо в данном случае регистрировать для компенсации при наземной обработке аэрофильмов.

1.3 Модели аэрофотоаппаратов

Как отмечалось, основной подсистемой аппаратуры ДЗ является АФА. Для построения аппаратуры оперативного контроля основных параметров АФА необходимо выбрать, либо построить соответствующую модель, которая с заданной степенью адекватности отражает наиболее существенные особенности аппаратуры и позволяющую учитывать внешние факторы режимов съемки. На Рисунке 1[20]. представлена структура системы, использующей в качестве фоторегистратора фотопленку. Такие системы далее будут называться оптико-механическими.

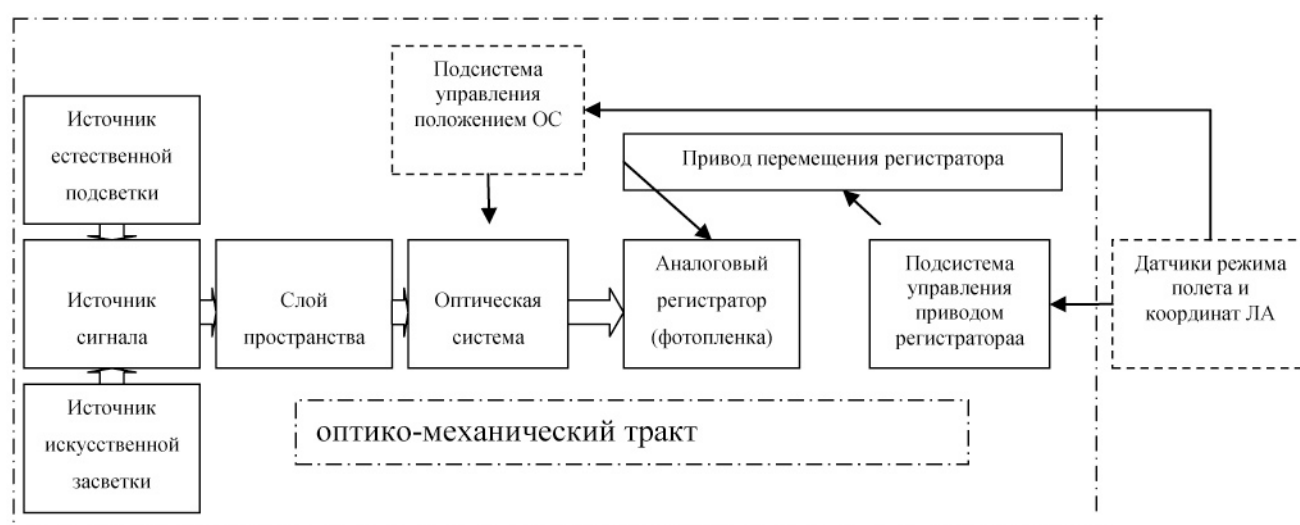


Рисунок 1. Функциональная схема обобщенной оптико-механической системы, моделирующая АФА [8, 20].

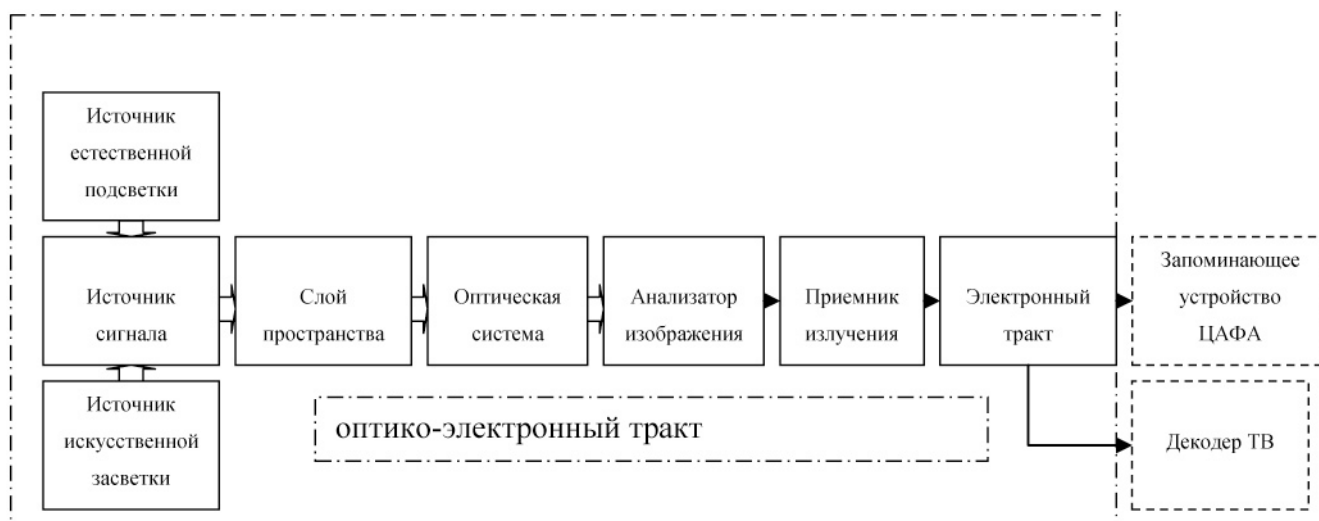


Рисунок 2. Функциональная схема обобщенной оптико-электронной системы, моделирующая ЦАФА, либо видеокамеры [8, 20].

Модель ЦАФА, как ОЭС (Рисунок 2 [8, 20]) рассматривается в двух модификациях, состоящих из двух основных компонент:

- Неизменная подсистема, обеспечивающая предварительную обработку сигнала.
- Подсистема, состав и назначение которой определяет функциональное назначение ОЭС в целом.
- Анализ показывает, что независимо от назначения ОЭС, в ней обязательно присутствует оптико-электронный тракт (ОЭТ), обеспечивающий предварительную обработку сигнала.

На рисунке 2 выделен оптико-электронный тракт, состав которого не зависит от назначения ОЭС и подсистема, обозначенная выделенным пунктиром тремя видами оконченных каскадов.

Во первой модификации реализуется модельное представление структуры ОЭС регистрирующего типа (это подсистемы фотоаппарата или видеокамеры, обеспечивающие запись изображения на какой-либо носитель информации).

Во второй модификации рассматривается модель структуры информационной ОЭС, конечным каскадом которой является зрительный анализатор человека-оператора (это, например, ТВ-система, тепловизор, и.т.п.)

Под регистратором подразумевается устройство, выполняющее функции отображения результатов измерений в виде изображений (это, например, дисплей)

Под декодером понимается устройство, восстанавливающее изображение по закону сканирования, который передается от анализатора (кодера) по шине «синхросигнал».

Отмеченный штрих-пунктиром блок «оптико–электронный тракт» в рассматриваемой структуре является неизменной компонентой любой оптико – электронной системы. В формировании аппаратной функции его свойства играют определяющую роль. Поэтому модель ОЭТ далее будет рассматриваться, как основная часть модели ОЭС.

Как показал анализ, в модели ОЭТ необходимо учесть аппаратную функцию (импульсный отклик) объектива и слоя пространства. В свою очередь, при расчете параметров модель аппаратной функции должна учитывать и дифракционные явления и aberrации оптической системы, а также факторы, существенным образом влияющие на вид аппаратной функции АФА и ЦАФА– дефокусировка, смаз и турбулентность атмосферы (слоя пространства).

В соответствии с изложенным, в основу выбора и уточнения модели ОЭТ в настоящей работе заложены следующие требования:

- модель должна учитывать основные факторы, определяющие аппаратную функцию оптико-электронного тракта с известной степенью адекватности;
- Модель должна отвечать требованию полноты. Анализ методов модельного представления ОЭС [9], позволил сделать вывод о возможности использования частотно-пространственных и частотно – временных представлений, принятых в теории оптико-электронных систем.

1.4 Краткий анализ компонент схемы ОЭТ, определяющих аппаратную функцию ЦАФА

Источник сигнала

Источник сигнала рассматривается здесь, либо как первичный, либо как вторичный. В первом случае это источник собственного излучения, которое является физическим носителем, как полезного сигнала, так и помехи в виде фонового излучения. Во втором случае это источник рассеянного (отраженного) излучения, которое возникает при естественной или искусственной подсветке. В этом случае также возможно присутствие фонового излучения. В любом из рассмотренных случаев модельное представление источника сигнала для подавляющего большинства ОЭС, как объектов проектирования, представимо, как нормированное распределение яркости в пространстве предметов. Для построения аппаратуры контроля в качестве источника сигнала используются различные миры абсолютного контраста. На рисунке 3 показаны тест-объекты видимого диапазона для аэрофотографических и телевизионных систем плановой и перспективной съемки, позволяющие производить интегральную оценку характеристик систем ДЗЗ.



Рисунок 3 (www.lii.ru). Тест – объекты ЛИИ МАП им. М.М. Громова.

Слой пространства

Определяется, как пространственный фильтр с распределенными конструктивными параметрами.

В некогерентном приближении слой пространства характеризуется вещественным коэффициентом пропускания и передаточной функцией, определяемой турбулентностями и флуктуациями значений показателя преломления. Таким образом, математическая модель некогерентного импульсного отклика слоя пространства сводится к учету нормированного импульсного отклика и коэффициента спектрального пропускания. Турбулентность атмосферы учитывается в модели импульсного отклика. Учет реального состояния слоя пространства возможен только в процессе выполнения зондирования косвенными способами с использованием дополнительной аппаратуры.

Оптическая система (ОС)

В настоящей работе в качестве основы математической модели ОС принимается хорошо изученная оптическая передаточная функция (ОПФ, ОТФ). Последующий анализ показывает, что аппаратура контроля наиболее часто ориентирована на измерение ОПФ. При этом аппаратная функция (импульсный отклик ОС) легко может быть определена как обратное преобразование Фурье от ОПФ:

$$h_{oc}(x', y') = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} OTF_n(u_x, u_y) \exp \{ +2\pi j (u_x x', u_y y') \} du_x du_y ;$$

где $OTF_n(\cdot, \cdot)$ – нормированная оптическая передаточная функция (ОПФ);

u_x, u_y – пространственные частоты ;

x', y' – координаты в плоскости изображения;

$j=\sqrt{-1}$;

λ - длина волны.

Как показал анализ, основной компонентой, определяющей качество аппаратуры ДЗЗ в целом, является оптическая система. При этом периодическому контролю подлежит ориентация и стабильность положения оптической системы относительно плоскости регистратора. Контроль этих факторов проводится путем интегрального измерения модуляционной передаточной функции (МТФ). Для АФА с регистрацией при правильной конструкции АФА и соблюдения режима регистрации основным фактором, определяющим качество регистрации изображения является МТФ. Однако в процессе эксплуатации может меняться жесткость конструкции объектива. Поэтому периодически необходимо автономно контролировать оптическую систему. Вопросы измерения ОПФ путем измерения ЧКХ и ЧФХ рассматриваются ниже.

Анализатор изображения (Кодер)

Рассматривается, как устройство для кодирования подмножества признаков из множества признаков в пространстве предметов в виде одной или нескольких временных кодовых последовательностей, передаваемых параллельно, параллельно-последовательно, последовательно.

Можно считать, что основным свойством анализатора изображения является свойство менять размерность сигнала, путем преобразования пространственного сигнала во временной.

При выборе математической модели кодера принято во внимание, что ЦАФА используют в качестве элементной базы фотоприемные устройства с электронным сканированием (матричные, линейные ПЗС и т.п.). Для названных устройств характерен линейный закон сканирования в различных модификациях, который адекватно описывается в декартовой системе координат. Во многих АФА с регистрацией изображений на аналоговый носитель в роли кодера выступает сканирующее устройство. Стабильность его функционирования подлежит автономной проверке.

Приемник излучения (ПИ)

Основные конструктивные параметры ПИ в работе отнесены к характеристикам

чувствительного слоя:

- спектральная вольтовая чувствительность;
- обнаружительная способность;

- спектральная плотность собственных шумов;
- постоянная времени;

Таким образом, в работе различаются понятия "приемник излучения" и "фотоприемное устройство" (ф.п.у). Последнее понимается, как последовательность, содержащая детектор излучения, пространственный, временной и спектральный фильтры. Приемник излучения понимается здесь, в соответствии с определением, как детектор излучения. Реальное ф.п.у. образуется как совокупность звеньев:

- анализатор изображения (пространственный фильтр);
- приемник излучения (энергетический фильтр);
- временной фильтр;
- безынерционная нелинейность.

В настоящей работе ПИ рассматривается в линейном приближении. Это допущение сделано в предположении, что подавляющее число ОЭС всегда закладываются условия, исключающие функционирование на нелинейном участке интегральной вольтовой чувствительности ПИ. Модельное представление ПИ с учетом многообразия его фильтрующих свойств в спектральной, пространственной и временной области обосновывается в, исходя из следующего:

Пространственные фильтрующие свойства ПИ можно учесть в модели кодера, а временные – в модели электронного тракта.

Таким образом, модель ПИ в настоящей работе рассматривается, как совокупность спектрального и временного фильтров [9].

При этом временные инерционные свойства ПИ приписываются последующему аналоговому электронному тракту ОЭС.

Спектральные свойства ОЭС в целом учитываются моделью, в которой спектральные пропускания слоя пространства, оптической системы, энергетических фильтров учитываются, как произведение соответствующих коэффициентов спектрального пропускания τ .

В соответствии с изложенным, модель приемника излучения рассматривается, как модель преобразователя физического носителя сигнала – потока лучистой энергии в электрический сигнал $U(t)$.

Основной фактор, определяющим стабильность свойств приемника излучения – деградация чувствительного слоя, проявляющаяся в понижении пороговой

чувствительности. Контроль этого параметра возможно осуществлять путем интегрального контроля АФА.

Электронный тракт

С учетом выбранного в настоящей работе уровня детализации, аналоговый электронный тракт ОЭС рассматривается в линейном приближении. При этом считается допустимым пренебречь шумами квантования АЦП и ЦАП.

Как известно, частотные характеристики электронного тракта определяются на основе его передаточной функции, которая в свою очередь определяется, как преобразование Фурье от импульсного отклика. Поэтому далее аналоговая часть электронного тракта рассматривается на основе аппаратной функции, либо передаточной функции.

В самом общем виде электронный тракт в обобщенной модели необходимо рассматривать при системном анализе в двух аспектах:

- Аналоговая обработка сигнала
- Аналого-цифровая обработка сигнала

В любом случае электронный тракт применительно к ЦАФА имеет модельное представление в виде импульсного отклика $H_3(t)$ [10] и характеризуется основным конструктивным параметром – полосой пропускания. Электронный тракт отличается стабильностью и контролю не подлежит. Тем не менее, модель рассматривается, так как учитывается при решении обратной задачи, рассмотренной ниже.

1.5 Модуляционная передаточная функция ОЭТ (МПФ, МТФ)

Большинство формирующих изображение подсистем, в частности подсистем ДЗЗ в первом приближении можно рассматривать как линейные и инвариантные к сдвигу [9,10]. Изображения, сформированные такими системами, претерпевают линейные пространственно-инвариантные искажения, характеризующиеся тем, что механизм их возникновения один и тот же для всех точек (x,y) . Линейные искажения проявляются в ослаблении верхних частот исходного изображения. Визуально это приводит к ухудшению его резкости. В процессе записи изображения искажаются также шумами, присутствующими в любом реальном физическом устройстве. В ряде практически важных случаев шум можно считать аддитивным и независимым от исходного изображения [9].

С учетом рассмотренных выше моделей отдельных звеньев для оптико-электронного тракта цифрового АФА можно записать:

$$\tilde{\Phi}_x(v_x, v_y) = \tau_\lambda L_{0\lambda} \beta^2 \sin^2 \alpha' \tilde{L}(\beta v_x, \beta v_y) \tilde{H}_N(v_x, v_y) H_a(v_x, v_y),$$

где:

τ_λ – коэффициент спектрального пропускания слоя пространства и оптической системы;

$L(x,y)$ – яркостное поле пространства предметов;

$L_{0\lambda}$ – средняя спектральная яркость пространства предметов;

β – линейное увеличение оптической системы;

α' – задний апертурный угол ОС;

$\tilde{H}(\cdot,\cdot)$ – оптическая передаточная функция;

$\tilde{H}_a(\cdot,\cdot)$ – пространственная передаточная функция анализатора изображения;

λ – длина волны излучения.

$\tilde{\Phi}_\lambda(\cdot,\cdot)$ – пространственная спектральная плотность потока излучения. Индекс « λ » введен в выражение для того, чтобы подчеркнуть, что оно получено с учетом энергетического спектра излучения в пространстве предметов.

Переход к пространственным координатам $x_p(t)$; $y_p(t)$ можно осуществить, применяя обратное преобразование Фурье к пространственной спектральной плотности потока излучения.

Следует отметить, что функция $\Phi_x(x_p, y_p)$ описывает сигнал на выходе анализатора изображения при любом плоско-параллельном движении анализирующего элемента. Это учитывает тенденции в развитии АИ и современной элементной базы. ЦАФА различного назначения снабжаются анализатором изображения, реализуемыми электронными сканерами, управление которыми возможно лишь в декартовой системе координат.

Таким образом, модель ОЭС, и в частности аппаратуры ДЗЗ, в линейном приближении можно представить в виде оператора, описывающего модель типа «черный ящик»:

$$R(\mathbf{p})[f(x,y)] = g(x,y),$$

где $R(\mathbf{p})[.]$ – оператор, соответствующий преобразующей системе,

$\mathbf{p}$ – вектор конструктивных параметров оптико-электронной системы ДЗЗ,

$f(x,y)$ – функция, описывающая распределение контраста входного изображения,

$g(x,y)$ – функция, описывающая распределение контраста выходного изображения,

(x,y) – пространственные координаты.

В частотной области оператором $R(\mathbf{p})[.]$ является МПФ (MTF).

Допущение о линейности модели ОЭТ можно считать корректным, поскольку нелинейность реальных ОЭС определяется несовершенствами и физическими ограничениями элементной базы.

Как отмечалось в работах [10, 20], восстановление смазанного и дефокусированного изображений можно формализовать путем постановки и решения обратной задачи.

В большинстве известных случаев решение обратной задачи сводится к следующему:

- Известен выходной сигнал, описанный функцией, задающей контраст изображения на выходе линейной преобразующей системы;
- Известна аппаратная функция линейной преобразующей системы.

Необходимо определить функцию, задающую контраст входного изображения. Эта задача сводится к определению интеграла типа свертки, что показано ниже с учетом смаза и дефокусировки, обусловленных нештатными режимами съемки и свойствами слоя пространства в момент аэрофотосъемки.

Обратные задачи, такие как решение интегрального уравнения, относятся к некорректным задачам, и ниже об этом будет сказано подробнее. Для решения некорректных задач применим метод регуляризации Тихонова [5], с помощью которого будет достигнута требуемая устойчивость.

В современных системах обработки изображений есть возможность выполнения свертки изображения с ядром (эта операция также называется конволюцией). Реже встречается возможность решения обратной задачи (деконволюции). Еще реже решается обратная задача относительно ядра. Однако именно эта задача может лежать в основе метода интегрального контроля качества аппаратуры ДЗЗ.

Обращение оператора

Рассмотрим упрощенную модель оптико-электронной системы ЦАФА, описываемую интегральным уравнением Фредгольма первого рода:

$$\int_a^b k(p, x, s_x, y, s_y) g(s_x, s_y) ds_x ds_y = f(x, y),$$

где:

s_x, s_y – пространственные координаты,

$k(p, x, s_x, y, s_y)$ – ядро интегрального уравнения, описывающее оптико-электронную систему. Оно же является импульсным откликом системы и преобразование Фурье от него, как известно, является искомой передаточной функцией при решении задачи деконволюции.

Интегральным уравнением Фредгольма первого рода описываются такие искажения, как дифракционное рассеяние, aberrации оптической системы, фильтрация в электронном тракте и линейный смаз. Первые три фактора, указанные выше, можно рассматривать, как эквивалентную дефокусировку. Учет линейного смаза необходимо рассматривать отдельно, поскольку он не является фактором, обусловленным внутренними свойствами ОЭС.

Постановка и решение задачи восстановления смаза.

При регистрации цветных аэрофидьмов при выполнении ДЗЗ, как известно, используется та или иная система кодирования цвета. Чаще всего используется система координат RGB. В

этой системе каждая цветовая компонента рассматривается, как черно-белая. Это позволяет рассматривать известную постановку задачи для случая регистрации черно-белого изображения. При этом будем рассматривать случай, когда оптическая система фоторегистратора может быть представлена в геометрическом приближении, а факторы, обусловленные дифракцией, aberrациями ОС и фильтрующими свойствами слоя пространства приписать эквивалентной дефокусировке.

Это уравнение можно записать в виде интегрального уравнения Фредгольма I рода типа свертки:

$$\int_a^b k(x-s_x; y-s_y) g(s_x; s_y) ds_x ds_y = f(x; y)$$

где

$$k(x) = \begin{cases} 1/\Delta & \text{при } x \in [-\Delta, 0], \\ 0 & \text{при } x \notin [-\Delta, 0]. \end{cases}$$

Итак, получено интегральное уравнение типа свертки для реконструкции смазанного изображения. Отметим, что явление смаза присуще только оптическому тракту ОЭС, поэтому дальнейшие выкладки проводятся относительно оптической системы.

Основываясь на свойствах свертки, данное уравнение в частотной области можно записать как

$$K(u, v) G(u, v) = F(u, v)$$

где (u, v) – координаты в частотной области, K, G, F – Фурье-образы соответствующих функций. $K(u, v)$ в данном случае является оптической передаточной функцией.

Для решения задачи можно применить регуляризацию [9, 10], когда в качестве функции W принимается:

$$W(u, v) = \frac{K^*(u, v)}{|K(u, v)|^2 + \alpha M(u, v)}$$

где $M(u, v)$ – четная неотрицательная функция, например $M(u, v)=1$, α – параметр регуляризации, « $*$ » обозначает комплексно сопряженную величину. Параметр регуляризации выбирается таким образом, чтобы добиться стабильности решения, но не внести слишком много искажений в решение. Оптимальное значение параметра регуляризации дает хорошее восстановление.

Таким образом, важнейшими факторами, которые необходимо учитывать при обработке аэрофильмов являются дефокусировка и линейный смаз. Для восстановления дефокусированных изображений необходимо знать модуляционную передаточную функцию аппаратуры ДЗЗ. Для восстановления смазанных изображений необходимо определить величину и направление смаза, значения которого можно во многих практических случаях с помощью спектрального или градиентного методов, но с обязательной экспертной оценкой

со стороны оператора, что снижает точность восстановления. Поэтому для повышения точности необходимо измерять вектор смаза. Полежнее возможно при учете динамики полета ЛА.

Методы расчета остаточных значений вектора смаза рассмотрены в первой работе цикла статей [12].

Для решения обратной задачи при учете дефокусировки, возникающей при воздействии вибрационных факторов необходимо либо построить адекватную модель модуляционной передаточной функции АФА, либо найти метод объективного контроля МПФ непосредственно при выполнении аэрофотосъемки.

Для выбора модели импульсного отклика ОЭТ и регистратора в работе проведено исследование наиболее распространенных представлений соответствующих функций, зависящих от одного параметра, что позволяет предложить в качестве модели гауссоиду.

Функция часто применяется при модельном представлении МПФ с учетом осесимметричных аберраций и дифракции. В нашем случае ее удобно применять и при реализации следующей методики:

- ЛА пролетает над контрольной точкой, в которой расположен тест-объект.
- Производится регистрация аэрофильма тест-объекта с учетом атмосферных условий, близких к условиям ДЗЗ и с учетом свойств стандартного режима полета носителя аппаратных средств ДЗЗ и собственно аппаратных средств.
- Производится плановая регистрация областей земной поверхности, лежащих ДЗЗ.
- При наземной обработке на рабочем месте оператора решается обратная задача относительно МПФ ОЭТ. Исследования показали, что удобно решать эту задачу с применением ранее указанной модели импульсного отклика, как начального приближения.
- Решается обратная задача деконволюции относительно реально зарегистрированного аэрофильма с учетом найденной МПФ.

Дальнейшее рассмотрение задач, поставленных в настоящей работе необходимо проводить с учетом тактико-технических характеристик АФА, пригодных для решения задач ДЗЗ.

2. Анализ методов контроля передаточных функций оптических систем и оптико-электронных приборов

Для того чтобы оценить возможность создания средств контроля этих характеристик проведём аналитический обзор методов и аппаратуры для определения передаточных характеристик оптических и оптико-электронных систем, характерных для АФА и ЦАФА.

Исторически эти методы начали развиваться для контроля оптических систем. Вопросы теории и практики измерения передаточных функций оптических систем подробно рассмотрены в монографиях [9, 10]. В качестве введения в рассмотрение разных методов измерения передаточных функций рассмотрим основные теоретические предпосылки.

2.1 Постановка задачи измерения передаточных функций оптических систем

Известно, что распределение интенсивности в изображении изолированной точки описывается функцией рассеяния точки $A(x, y)$. Поскольку представляет интерес относительное распределение интенсивности I , удобно нормировать функцию рассеяния, приняв за единицу двумерный интеграл

$$\int_{-\infty-\infty}^{\infty \infty} A(x, y) dx dy = 1 \quad (1)$$

Изображение бесконечно длинной светящейся нити может быть получено суммированием бесконечного числа светящихся точек, расположенных вдоль неё. Математическое описание, называемое функцией рассеяния линии $A_l(x)$ имеет вид

$$A_l(x) = \int_{-\infty}^{\infty} A(x, y) dy \quad (2)$$

а условие нормировки функции рассеяния линии

$$\int_{-\infty}^{\infty} A_l(x) dx = 1 \quad (3)$$

В случае края полуплоскости распределение интенсивности в направлении, перпендикулярном к краю ножа, описывается суммированием функций рассеяния линий в пределах полуплоскости. Для каждого значения координаты x_0 эта интенсивность равна

$$I_b(x_0) = \int_{-\infty}^{x_0} A_l(x) dx \quad (4)$$

Из формулы (4) видно, что $A_l(x)$ есть производная интенсивности пограничной кривой

$$A_l(x) = \frac{dI_b(x)}{dx} \quad (5)$$

Естественно, $A_l(x)$ и $I_b(x)$ зависят от тех же параметров, что и функция рассеяния точки и могут различаться для разных ориентировок линии (щели) или края ножа.

Для определения интенсивности изображения $\Gamma'(x)$ одномерного объекта в точке x нужно найти интеграл свёртки

$$\Gamma'(x) = \int_{-\infty}^{\infty} A_l(\xi) \cdot I(x - \xi) d\xi \quad (6)$$

а в случае двумерного объекта $I(x,y)$ интеграл свёртки имеет вид

$$\Gamma'(x,y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A(\xi,\eta) \cdot I(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta \quad (7)$$

где ξ и η – координаты функции рассеяния точки.

Очевидно, нет надобности вычислять распределение интенсивности в плоскости изображения $\Gamma'(x,y)$ как свертку распределения интенсивности в объекте $I(x,y)$ с функцией рассеяния точки $A(\xi,\eta)$ по формуле (7), а можно упростить задачу, вычислив преобразование Фурье изображения, так как преобразование Фурье изображения равно произведению преобразований Фурье объекта $I(x,y)$ и изображения изолированной точки.

Таким образом, если от распределения интенсивности в объекте перейти к преобразованию Фурье, т. е. к спектру пространственных частот объекта,

$$g(p,q) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x,y) \cdot \exp(-i \cdot 2 \cdot \pi \cdot (p \cdot x + q \cdot y)) \cdot dx dy \quad (8)$$

а от функции рассеяния точки $A(x,y)$ к преобразованию Фурье

$$D(p,q) = \int \int A(x,y) \cdot \exp(-i \cdot 2 \cdot \pi \cdot (p \cdot x + q \cdot y)) \cdot dx dy \quad (9)$$

то спектр пространственных частот p и q изображения, т. е. преобразование Фурье от распределения интенсивности в изображении $\Gamma'(x,y)$ равен

$$g'(p,q) = D(p,q) \cdot g(p,q) \quad (10)$$

2.2 Оптическая передаточная функция

Если объект представлен в виде суммы гармоник (синусоидальных составляющих) различных пространственных частот, то изображение, построенное линейной системой в пределах изопланатической зоны, можно получить суммированием соответствующих (по частоте) гармоник, для каждой из которых действие изображающей системы учитывается своим коэффициентом $D(p,q)$ по формуле (9). Функция $D(p,q)$, определяющая, каким образом каждая частотная составляющая передается прибором с учетом дифракции,

аббераций, ошибок изготовления оптической системы, называется оптической передаточной функцией (ОПФ) системы.

В более простом случае для одномерного объекта $I(x)$ (что чаще всего встречается при измерениях ОПФ, когда объект — решетка из параллельных штрихов, узкая щель и т. п.) — ОПФ становится функцией одного аргумента — пространственной частоты p (в направлении x). При $q = 0$ из выражения (9) имеем:

$$D(p) = \int_{-\infty}^{\infty} A_l(x) \cdot \exp(-i \cdot 2 \cdot \pi \cdot p \cdot x) \cdot dx \quad (12)$$

Оптическую передаточную функцию можно записать и в тригонометрической форме. Используя формулу Эйлера имеем :

$$D(p) = \int_{-\infty}^{\infty} A_l(x) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot p \cdot x) dx - i \cdot \int_{-\infty}^{\infty} A_l(x) \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot p \cdot x) dx = C(p) - i \cdot S(p) \quad (13)$$

где интегралы, обозначенные через C и S , называются соответственно косинус- и синус-преобразованиями функции рассеяния. Как видно из выражения (13), C и S представляют собою соответственно вещественную и мнимую части комплексной функции $D(p)$. Поэтому модуль комплексной функции по определению равен

$$T(p) = \sqrt{C^2(p) + S^2(p)} \quad (14)$$

а аргумент $\varphi(p)$ может быть определен из соотношений

$$\sin \varphi(p) = \frac{S(p)}{T(p)} \quad (15)$$

$$\cos \varphi(p) = \frac{C(p)}{T(p)} \quad (16)$$

2.3 Косинусоидальный объект и его изображение

Для лучшего уяснения смысла модуля $T(p)$ и аргумента $\varphi(p)$ комплексной ОПФ рассмотрим более подробно, как изображается отдельная частотная составляющая объекта системой, имеющей известную функцию рассеяния. Возьмем объект, характеризующийся косинусоидальным распределением.

$$I(x) = I_0 + I_1 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot p \cdot x) \quad (17)$$

Как показано в [9, 10] интенсивность изображения будет равна

$$I'(x) = I_0 + I_1 \cdot T(p) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot p \cdot x - \varphi(p)) \quad (18)$$

2.4 Функции передачи модуляции и фазы

Таким образом, изображение косинусоидального объекта остается косинусоидальным, и притом такой же пространственной частоты, как объект. Тем не менее

изображение (18) отличается от объекта (17) двумя особенностями. Первая из них состоит в том, что модуляция, равная отношению амплитуды переменной составляющей распределения к среднему значению (т. е. к постоянной составляющей), оказывается для изображения меньшей, чем для объекта, а именно в объекте

$$m = \frac{I_1}{I_0} \quad (19)$$

а в изображении

$$m' = \frac{I_1 \cdot T(p)}{I_0} \quad (20)$$

т. е.

$$T(p) = \frac{m'}{m} \quad (21)$$

Таким образом, значение модуля $T(p)$ оптической передаточной функции для каждой пространственной частоты равно отношению модуляции в изображении гармонической составляющей к модуляции в объекте. Его называют коэффициентом передачи модуляции (КПМ) системы. Совокупность значений КПМ для различных пространственных частот составляет функцию передачи модуляции (ФПМ) системы.

Следует заметить, что для значения пространственной частоты $p = 0$ величина $T(0) = 1$.

Вторая особенность заключается в том, что распределение интенсивности в изображении отличается от наблюдаемого у объекта еще и сдвигом косинусоиды на $\varphi(p)$ (в угловой мере). Совокупность значений сдвига (смещения) фазы $\varphi(p)$ для различных пространственных частот составляет функцию передачи фазы (ФПФ) системы.

Линейное смещение косинусоиды Δx (рис. 1, б) должно составлять, очевидно, такую же часть от периода равного $1/p$, какую фазовый угол сдвига $\varphi(p)$ составляет от 2π , т. е.

$$\Delta x = \frac{\varphi(p)}{2 \cdot \pi \cdot p} \quad (22)$$

2.5 Модуляция и контраст

Исторически сложилось так, что контраст в оптике для разных случаев и задач определяют по различным формулам. Наилучшее соответствие модуляции даёт формула контраста

$$K = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (23)$$

где $I_{\max}$ и $I_{\min}$ – экстремальные значения интенсивностей.

Действительно, если воспользоваться для контраста формулой (23), то получаем, что (по рис. 1, а) контраст объекта равен модуляции объекта

$$K = \frac{(I_0 + I_1) - (I_0 - I_1)}{(I_0 + I_1) + (I_0 - I_1)} = \frac{I_1}{I_0} = m \quad (24)$$

Тогда модуль оптической передаточной функции будет равен отношению контраста изображения к контрасту объекта на частоте p .

$$T(p) = \frac{K'}{K} \quad (25)$$

Отметим также, что для составных изображающих систем (аэрофотосъёмочная аппаратура состоит по крайней мере из двух основных ступеней- объектива и фотоплёнки или ПЗС-матрицы) ФПМ равна произведению ФПМ, а ФПФ равна сумме ФПФ отдельных ступеней [9].

2.6 Установки для измерения ОПФ

К настоящему времени разработано большое количество различных установок для определения ОПФ оптических и оптико-электронных систем. Разные авторы предлагают их классификации, но лучше согласиться с автором [9, 19], где рассмотрение установок идёт по трём поколениям, которые совершенствовались с развитием научно-технического прогресса.

К первому поколению относились установки, где в качестве регистрации информации использовались фотоплёнки или простые фотоэлектрические приёмники без электронной фильтрации сигналов. Поэтому в качестве тест объектов использовались специально изготовленные синусоидальные миры, а в качестве анализаторов изображения использовались узкие подвижные щели, шириной которой можно было пренебречь при анализе. Щели и синусоидальные миры можно менять местами без изменения результатов измерений.

Поскольку синусоидальные миры было изготавливать дорого и их нужно было иметь много для перекрытия всего диапазона пространственных частот большой номенклатуры выпускаемых объективов, то появились установки, где в качестве тест объектов выступали периодические, но не синусоидальные миры, регистрация проводилась фотоэлектрическими приёмниками, а частотный анализ осуществлялся с помощью узкополосных электрических фильтров. Эти установки, использующие сканирование изображения периодического тест-объекта, относятся ко второму поколению.

Особенность установок электронного гармонического анализа заключается в том, что конструкция периодического тест-объекта несколько упрощена, так как он имеет только одну пространственную частоту, а гармоническому анализу подвергается периодический электрический сигнал, получаемый от фотоэлектрического приемника, стоящего позади анализирующей щели. Гармонический анализ такого электрического сигнала можно выполнить

с помощью набора узкополосных электрических фильтров (при постоянной скорости сканирования) или посредством изменения скорости движения тест-объекта (при одном электрическом фильтре). В результате гармонического анализа определяются амплитуды спектральных составляющих изображения, каждая из которых может быть представлена, как произведение амплитуды спектральной составляющей объекта на соответствующую ОПФ изображающей системы. Если тест-объект, имеющий пространственную частоту p , движется с линейной скоростью V мм/с, то фотоприемник позади анализирующей щели зарегистрирует сигнал временной частоты $f = p \cdot V$ Гц. При постоянной настройке электрического фильтра на f Гц и при различных скоростях перемещения тест-объекта V_j можно измерить ряд гармоник, т.е. спектральных составляющих изображения

$$p_j = f / V_j \quad (26)$$

Для нахождения ОПФ изображающей системы целесообразно выбрать такой объект, спектр которого «богат» гармониками. Подходящими объектами такого рода являются узкая щель и край полуплоскости. Оба эти объекта использовались в установках для измерения ОПФ. Для получения периодического сигнала тест-объект может содержать ряд последовательных щелей или краев полуплоскости и двигаться в одном направлении, но можно использовать и тест-объект с одной щелью или одним краем полуплоскости, совершающий возвратно-поступательное движение относительно щели, анализирующей изображение.

Анализ изображения периодического тест-объекта, имеющего вид решетки из узких штрихов (щелей), предложенный Бёрчем [11, 12], был развит и практически реализован в Государственном оптическом институте Н.П. Березиным [13], а затем там же была создана универсальная установка для определения ФПМ объективов, имеющая шифр ЮС105 [14]. Установки, аналогичные по схеме, нашли себе применение и на некоторых других отечественных предприятиях [15].

Установка ЮС105, предназначена для определения функций передачи модуляции (ФПМ) объективов различного назначения в широком диапазоне их фокусных расстояний (от 10 до 1000 мм) и полей зрения: угловых до $\pm 70^\circ$, линейных до $2y' = 800$ мм.

Установка оснащена тремя сменными тест-объектами - цилиндрами с числом штрихов решетки (на полной окружности) 180, 360 и 720 и пространственной частотой решеток, соответственно, $p_0 = 0,55; 1,1$ и $2,2$ мм⁻¹. Ширина штриха всех трех решеток одинакова и составляет $b = 0,02$ мм. Отношение ширины штриха к шагу решетки равно, соответственно, $p=1 : 100; 1 : 50$ и $1 : 25$.

Если яркость штрихов тест- объекта равно $I_{\max}$, а яркость фона $I_{\min}$, то спектр Фурье амплитуд тест- объекта содержит постоянную составляющую с амплитудой

$$A_0 = (I_{\max} - I_{\min}) \cdot \rho + I_{\min} \quad (27)$$

и набор гармонических составляющих

$$A_j = 2 \cdot (I_{\max} - I_{\min}) \cdot \rho \cdot \frac{\sin(j \cdot \pi \cdot \rho)}{\pi \cdot \rho} \quad (28)$$

где j — номер гармоники.

Из формулы (28) следует, что амплитуды нескольких первых гармоник примерно одинаковы, но для больших j амплитуда падает уже заметнее и, наконец, становится равной нулю для номера гармоники $j' = 1/\rho$.

Когда цилиндр с тест-объектом вращается, то изображения штрихов тест-объекта, построенные исследуемым объективом (т. е. «цепочка» функций рассеяния щелей), последовательно проходят по анализирующей щели. В этом случае электрический сигнал фотоприемника содержит переменные составляющие как основной частоты, т. е. частоты следования штрихов f_1 Гц, так и более высоких временных частот, кратных основной, т. е. $2f_1$, $3f_1$ и т. д. Значение f_1 равно произведению числа штрихов тест-объекта на число оборотов его в секунду. Частота f_1 выбирается равной 1000 - 1500 Гц. Первой гармонике сигнала f_1 соответствует пространственная частота изображения

$$p'_1 = \frac{p_0 \cdot f'_k}{f'_{ob}} \quad (29)$$

где f'_k и f'_{ob} - фокусные расстояния, соответственно, коллиматорного и исследуемого объективов, а более высоким гармоникам сигнала можно поставить в соответствие кратные пространственные частоты $2p'_1$, $3p'_1$ и т. д. Амплитуды спектра сигнала измеряются либо анализатором гармоник низких частот типа С4-48 (или С4-44), либо с помощью набора узкополосных фильтров. Результаты измерения дают, таким образом, КПМ исследуемой системы для ряда пространственных частот. Спектр самого тест-объекта можно учесть, если результат измерения КПМ умножить на поправочный коэффициент, который определяется по формуле, вытекающей из выражения (28),

$$k(p) = \frac{\pi \cdot b \cdot j \cdot p_0}{\sin(\pi \cdot b \cdot j \cdot p_0)} \quad (30)$$

По своей форме выражение (30) аналогично поправке, которую надо вводить в результат измерения для учета конечной ширины анализирующей щели. Измеренные амплитуды гармонических составляющих спектра изображения будут пропорциональны значениям КПМ лишь в том случае, если во время измерений сохраняется одно и то же значение постоянной составляющей. Действительно, модуляцию в изображении, равную

$$m'(p) = \frac{I'_{\max} - I'_{\min}}{I'_{\max} + I'_{\min}} \quad (31)$$

где $I'_{\max}$ и $I'_{\min}$ — экстремальные значения освещенности в изображении, можно представить как отношение амплитуды переменной составляющей A к постоянной составляющей, т. е. к среднему значению A_{av} , поскольку

$$\frac{A}{A_{av}} = \frac{(I'_{\max} - I'_{\min})/2}{(I'_{\max} + I'_{\min})/2} = m'(p) \quad (32)$$

Среднее значение сигнала выбирают во время градуировки таким, чтобы обеспечить $T(0)=1$ при нулевой пространственной частоте, и затем поддерживают постоянным при измерениях.

2.7 Современные установки для измерения ОПФ

К современным установкам для определения ОПФ оптических систем третьего поколения относится, прежде всего, оборудование фирмы «Ealing Beck Ltd» типа EROS (Equipment for measuring the Response of Optical Systems). Это оборудование позволяет производить измерения ФПМ путем выполнения в реальном масштабе времени оптического Фурье-анализа изображения периодической структуры испытуемой оптической системы.

В настоящее время существует ряд моделей семейства [16], начиная с больших, типа EROS-4, которые наряду с измерением ФПМ позволяют определять и функцию передачи фазы, и кончая более компактными моделями типа EROS -200, пришедшими на смену установкам тип E-100, E-110, которые измеряют только ФПМ. Данные устройства позволяют исследовать оптические системы в диапазоне пространственных частот вплоть до 200 мм^{-1} в спектральном диапазоне от 400 до 1100 нм. Точность измерений ФПМ достаточно высока и составляет 1 % для EROS-4 и 3 % для EROS -200. Одной из особенностей устройств данного семейства является блочная конструкция (за исключением установки EROS-4), что позволяет компоновать их для работы практически с любым типом объективов и оптических систем. Следует отметить, что фирменное оборудование в настоящее время широко используется и признается в качестве стандартного для точной и объективной оценки характеристик оптических систем во многих странах мира.

Принцип действия.

Принцип действия установок этой группы для измерения ОПФ рассмотрим на примере EROS -200.

Базисная модель (основной вариант) состоит из трех основных узлов, которые могут быть размещены на оптической скамье или плите. Это - объект-генератор, анализатор изображения и электронный процессор. Объект-генератор представляет собой блок, состоящий из источника света, конденсора и точной прецизионной щели. В состав

анализатора изображения входят селектор пространственных: частот, сканирующее устройство, визуальный канал и узел фотоприемника. Сканирующее устройство имеет в своем составе радиальную решетку, которая одновременно выполняет роль тест-объекта и модулятора. Селектор включает сменную оптику и анализирующую щель.

С выхода фотоприемника сигнал поступает на электронный процессор. Амплитуда переменной составляющей электрического сигнала с выхода приемника пропорциональна величине ФПМ на данной пространственной частоте. В установке EROS -200 в основу принципа действия положен оптико-электронный анализ с использованием узкополосного электрического фильтра.

Интенсивность изображения будет определяться на данной установке в соответствии с уравнением (18). Поэтому значения ФПМ как модуля преобразования Фурье функции рассеяния пропорциональны амплитуде переменной составляющей светового потока.

Формирование пространственных частот происходит следующим образом. Небольшой участок радиальной решетки (решетки) высококачественным сменным объективом проецируется в плоскость щели-маски. Диск, на котором расположена решетка, может вращаться относительно своей оси. При изменении угла поворота диска пространственная частота в плоскости щели изменяется от нулевой до максимальной. Значение частоты зависит от увеличения сменного объектива.

Частота в плоскости щели равна

$$p = p_d \cdot M \cdot \sin\Theta \quad (33)$$

где p_d - пространственная частота решетки, M - увеличение сменных объективов, Θ -угол между линиями решетки и щель-маски.

Радиальная решетка в качестве модулятора непрерывно вращается вокруг собственной оси, которая смещена относительно щели и оси оптической системы. Это не влияет на величину пространственной частоты, но позволяет увеличить временную частоту до 4,25 кГц, определяемую скоростью вращения решетки относительно собственной оси. Следует отметить, что решетка, используемая в качестве тест-объекта, не является синусоидальной, а имеет штрихи прямоугольного профиля. Выделение гармонической составляющей нужной частоты осуществляется при помощи электрического фильтра в электронном блоке. В принципе несущественно, когда происходит фильтрация, до или после получения изображения. В обоих случаях результат один и тот же: качество оптической системы оценивается для синусоидальной составляющей.

Принцип обратимости в оптике позволяет использовать Фурье - анализатор в качестве тест-объекта в предметной плоскости, так и в плоскости изображения. Такая пере-
становка не изменяет результатов измерения ОПФ. Выбор схемы измерения определяется

конструктивными и эксплуатационными особенностями. Преимущество варианта схемы с тест-объектом в плоскости изображения заключается, в основном, в том, что пространственная частота в изображении не зависит от фокусных расстояний исследуемого и коллиматорного объективов.

Одной из отличительных особенностей системы EROS -200 является ее модульная конструкция. Узлы и блоки EROS -200 могут быть заменены или дополнены другими в зависимости от особенностей исследуемых оптических систем и требований по их исследованию. Это не сказывается ни на простоте управления, ни на точности измерений. В самом простом случае автоматизированным может быть только сканирующее устройство. Самый сложный вариант: когда все операции, такие как фокусировка, выбор ориентации системы, проведение измерений по полю и установка заданных углов запрограммированы и выполняются с высокой точностью.

В установках оптико-электронного гармонического анализа довольно широко используют вращающуюся радиальную мишу со штрихами прямоугольного профиля. В качестве анализирующего элемента может выступать не только щель, но и точечная диафрагма. Использование точечной диафрагмы позволяет уменьшить ошибку измерений, обусловленную сходимостью штрихов. Так, погрешность в определении КПМ у центра миры из-за не параллельности штрихов в пределах пятна рассеяния может достигать 5% [12].

Описание установки, в которой в качестве анализирующего элемента используется точечная диафрагма, представлено в [17]. Указанная установка отличается простотой, но в то же время высокой точностью и широкими возможностями и позволяет проводить измерения как ФПМ, так и ФПФ оптических систем.

Изображение тест-объекта, в качестве которого используется точечная диафрагма сканируется радиальной решеткой. Диафрагма имеет диаметр 0,025 мм и освещается галогенной лампой накаливания.

Модулированный световой поток при помощи фотоприемника преобразуется в переменный электрический сигнал, который обрабатывается далее усилителем с синхронным детектором. Использование усилителя с синхронным детектором позволяет не только регистрировать слабые сигналы с малым отношением сигнал/шум, но и определять ФПМ наряду с ФПФ. В качестве коллиматора используется параболическое зеркало с фокусным расстоянием 200 см и диаметром 26 см. Изменение пространственной частоты в пределах от 3 до 120 мм⁻¹ осуществляется при помощи микрообъективов с различным увеличением.

Принцип действия установки заключается в следующем. Выражение для величины сигнала, регистрируемого фотоприемником, может быть представлено в виде:

$$S(p_1, t) = a_0 + \sum_n a_n \frac{T(n \cdot p_1)}{k(p_1)} \cos(2 \cdot \pi \cdot n \cdot p_1 \cdot V \cdot t + \varphi(n \cdot p_1)) \quad (34)$$

где a_0 - величина постоянной составляющей, a_n - амплитуда n -ой гармоники, p_1 - частота первой гармоники, V -скорость вращения раstra, $T(n \cdot p_1)$ - ФПМ, $\varphi(n \cdot p_1)$ - фаза, $k(p_1)$ - поправочный коэффициент, учитывающий конечные размеры диафрагмы.

Для первой гармоники имеем:

$$S_1(p_1, t) = a_1 \cdot \frac{T(p_1)}{k(p_1)} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot p_1 \cdot V \cdot t + \varphi(p_1)) \quad (35)$$

Амплитуда и фаза соответствующих гармоник определяются при помощи электронного блока, включающего в себя усилитель с синхронным детектором, что позволяет значительно увеличить отношение сигнал/шум. Величина постоянной составляющей определяется суммарным световым потоком, прошедшим через тест-объект. Контраст (коэффициент модуляции) для частоты первой гармоники определяется выражением

$$C_1 = \frac{a_1 \cdot T(p_1)}{a_0 \cdot k(p_1)} \quad (36)$$

Величина, характеризующая коэффициент передачи модуляции оптической системы, т.е. отношение модуляции в изображении к величине модуляции решетки (раstra) объекта, имеет вид

$$\frac{C_1}{C_0} = \frac{T(p_1)}{k(p_1)} \quad (37)$$

Поправочный коэффициент $k(p)$, учитывающий конечные размеры точечной диафрагмы, определяется как

$$k(p_1) = \frac{\pi \cdot r \cdot p_1}{J_1(2 \cdot \pi \cdot r \cdot p_1)} \quad (38)$$

где $J(2 \cdot \pi \cdot r \cdot p_1)$ - функция Бесселя первого порядка, r - радиус отверстия диафрагмы в плоскости изображения испытуемого объектива. Так, для диафрагмы радиусом $r = 12,5$ мкм величина поправки увеличивается от 1 (для пространственной частоты 20 мм^{-1}) до 1,4 (для частоты 100 мм^{-1}).

Величина фазы $\varphi(p_1)$ оптической передаточной функции определяется при помощи устройства синхронного детектирования как разность фаз между фазами первой гармоники и опорным сигналом.

Дальнейшее развитие получили методы измерения функции передачи модуляции, основанные на гармоническом анализе непериодических тест-объектов. ФПМ контролируемого объектива в установках нового поколения определяют как Фурье-преобразования изображения непериодического тест-объекта. Процедура Фурье-преобра-

зования обычно выполняется с помощью ЭВМ. Однако, существуют способы [18, 19], где это реализуется иначе. В связи с этим интересен метод, в котором контролируемый объектив строит изображение непериодического тест-объекта (щели) в виде функции рассеяния линии. Микрообъектив переносит это изображение в плоскость анализа, где помещается фоточувствительный приемник. В качестве фотоприёмника используется ПЗС- линейка, причем ПЗС- линейка располагается перпендикулярно длинной стороне щелевого источника. Изображение тест- объекта имеет пространственное распределение освещенности $E(x)$ в направлении, перпендикулярном длине щели, в виде функции рассеяния линии $A(x)$. Зарядовый рельеф ПЗС- линейки формируется в соответствии с распределением $E(x)$, а следовательно, и $A(x)$. Так как фотоприемник работает в рассматриваемой установке в режиме непрерывного считывания зарядов, то в случае, если источник излучения имеет постоянную яркость, на выходе фотоприемника амплитуда электрического сигнала постоянна. Управление процессом перемещения зарядов с постоянной скоростью V и синхронизация работы схемы обработки сигналов осуществляется специальным синхрогенератором. По мере передвижения зарядов по освещенному участку ПЗС- линейки величина зарядов возрастает в каждой точке на величину, пропорциональную значению освещенности изображения в данной точке, т.е. ПЗС- линейка производит интегрирующее считывание значений пространственного распределения освещенности вдоль направления движения зарядов. При постоянной скорости линейного перемещения амплитуда электрического сигнала на выходе ПЗС- линейки будет постоянна. При этом уровень постоянного сигнала можно задавать регулировкой яркости источника. В этом случае уровень постоянного сигнала пропорционален коэффициенту передачи модуляции КПМ на нулевой пространственной частоте. Теперь, модулируя излучение с временной частотой f_i , соответствующей пространственной частоте

$$p_i = \frac{f_i}{V} \quad (39)$$

по закону

$$I(t) = m \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_i \cdot t) \quad (40)$$

получим, что освещенность изображения тест- объекта также модулирована по этому же закону. И с выхода ПЗС- линейки поступает переменный электрический сигнал, частота которого равна заданной частоте f_i , а амплитуда зависит от пространственной частоты p_i , и определяется выражением

$$U(p_i) = \int_{-\infty}^{\infty} A(x) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot p_i \cdot x) \cdot dx \quad (41)$$

Его величина пропорциональна КПМ контролируемого объекта на пространственной частоте p_i . Последовательно изменяя частоту модуляции излучения источника, можно получить на выходе ПЗС- линейки переменные сигналы, пропорциональные КПМ на требуемых пространственных частотах. Значения КПМ на требуемых пространственных частотах определяют ФПМ контролируемого объекта. Этот метод измерения ФПМ реализован на установке в следующем составе.

Установка состоит из источника излучения, выполненного в виде светодиода, который подключен к выходу управляемого источника тока. Излучение светодиода конденсором фокусируется в плоскость тест- объекта узкой щелевой диафрагмы. Щелевая диафрагма расположена в фокальной плоскости коллиматорного объектива. Коллимированное излучение попадает в контролируемый объектив, который строит изображение тест- объекта в своей фокальной плоскости.

Эта плоскость с помощью микрообъектива сопрягается с плоскостью анализа, где помещается анализирующий блок, выполненный в виде линейного прибора с переносом заряда (ЛППЗ). Фоточувствительная поверхность ЛППЗ расположена в плоскости изображения так, что направление движения зарядов осуществляется перпендикулярно щелевой диафрагме. Выход ЛППЗ подключен к блоку предварительной обработки. Управление считыванием сигнала осуществляется синхрогенератором, подключенным как на ЛППЗ, так и на блок предварительной обработки. Выход блока предварительной обработки соединен с регистрирующим прибором, а также подключен ко входу фильтра нижних частот. Сигнал с выхода фильтра подается на схему сравнения, куда поступает сигнал с выхода регулируемого источника опорного напряжения. Схема вырабатывает разностный сигнал, поступающий далее на управляемый источник тока, на выходе которого включен светодиод. При этом на выходе источника тока изменяется значение амплитуды постоянной составляющей тока светодиода. Такая обратная связь позволяет изменять яркость свечения светодиода в соответствии с изменением коэффициента пропускания оптической системы установки, что дает возможность исключить влияние изменений коэффициента пропускания и тем самым повысить достоверность контроля. Модуляция излучения с временной частотой f_i осуществляется с помощью генератора синусоидальных колебаний.

Этот метод и установка позволяют производить контроль в широком диапазоне пространственных частот без использования механизмов сканирования, при этом переход от одного значения пространственной частоты к другому производится с высоким быстродействием. Кроме того, установка обладает более высокой надежностью, точностью по сравнению с установками аналогичного типа, без применения ЭВМ.

Метод [19], аналогичный рассмотренному выше, позволяет кроме функции передачи модуляции измерять также и функцию передачи фазы. Контролируемый объектив формирует изображение щелевого тест-объекта в плоскости анализа на фотоприёмных площадках ПЗС-линейки. Если ПЗС-линейка работает в режиме непрерывного считывания зарядов, величина зарядового пакета возрастает по мере передвижения его по освещённому участку ПЗС-линейки в каждой точке на величину, пропорциональную значению освещённости, т.е. с помощью такого режима работы производится интегрирующее считывание значений освещённости изображения. При движении зарядового рельефа с постоянной линейной скоростью V и временной круговой частоте модуляции ω излучения источника анализируемая пространственная частота определяется выражением

$$p_i = \frac{\omega}{2\pi \cdot V} \quad (42)$$

а сигнал с выхода ЛППЗ определяется как

$$S(\omega, t) = k \cdot \left[\int_{-\infty}^{\infty} A(x) dx + \cos(\omega \cdot t) \cdot \int_{-\infty}^{\infty} A(x) \cdot \cos \frac{\omega}{V} x dx - \sin(\omega \cdot t) \cdot \int_{-\infty}^{\infty} A(x) \cdot \sin \frac{\omega}{V} x dx \right] \quad (43)$$

Первый интеграл в выражении (43) при введении нормирования равен единице, второй и третий есть косинус $C(p)$ и синус $S(p)$ преобразования Фурье функции $A(x)$. Так как $2\pi \cdot p = \omega/V$, $x = V \cdot t$, то

$$S(\omega, t) = k + k \cdot [C(p) \cdot \cos(2\pi \cdot p \cdot x) - S(p) \cdot \sin(2\pi \cdot p \cdot x)] \quad (44)$$

Тогда ФПМ определяется как

$$T(p) = \sqrt{C(p)^2 + S(p)^2} \quad (45)$$

а функция передачи фазы находится из соотношений

$$\sin \varphi(p) = \frac{S(p)}{T(p)}, \cos \varphi(p) = \frac{C(p)}{T(p)} \quad (46)$$

Умножив и разделив слагаемые в квадратных скобках выражения (44) на $T(p)$, получаем

$$S(\omega, t) = k + k \cdot T(p) \cdot [\cos \varphi \cdot \cos(2\pi \cdot p \cdot x) - \sin \varphi \cdot \sin(2\pi \cdot p \cdot x)] = k + k \cdot T(p) \cdot \cos(2\pi \cdot p \cdot x - \varphi(p)) \quad (47)$$

Таким образом, электрический сигнал на выходе ЛППЗ полностью соответствует математическому выражению для ОПФ контролируемой оптической системы. Функция $\varphi(p)$ является ФПФ контролируемой оптической системы.

Работает установка следующим образом. Сигнал $S(\omega, t)$ с ЛППЗ поступает в блок 10 предварительной обработки, в котором происходит предварительное усиление и осуществляется двойная коррелированная выборка. Двойная коррелированная выборка повышает отношение сигнал/шум и устраняет помехи, обусловленные прохождением и наложением на полезный сигнал импульсов синхрогенератора. С выхода блока 10

предварительной обработки сигнал поступает в регистрирующий прибор, где измеряется его амплитуда. Фильтр нижних частот, включенный в цепь отрицательной обратной связи, пропускает на вход схемы сравнения только низкочастотную составляющую сигнала, амплитуда которого может изменяться в процессе работы установки. Схема сравнения производит сравнение амплитуды сигнала, поступающего от фильтра нижних частот, вырабатывая при этом разностный сигнал, подаваемый на второй вход управляемого источника тока, на выходе которого изменяется значение амплитуды постоянной составляющей тока светодиода. Измерение фазовых характеристик состоит из двух тактов. В первом такте формирователь сигналов управления задает нижнюю частоту сигнала модуляции с управляемого генератора. В течение первого такта устройство производит компенсацию времени запаздывания t_z на нижней пространственной частоте сигнала с ЛППЗ, по отношению к сигналу гармонической модуляции $S_0(t)$, поступающему с генератора, который используется как опорный.

Величина времени запаздывания определяется местоположением изображения тест-объекта 3 на чувствительной поверхности ЛППЗ. Время задержки зависит также от величины скорости движения V зарядового рельефа. Компенсация времени запаздывания t_z осуществляется с помощью контура автоматической подстройки времени запаздывания, куда входит фазовый детектор, регулируемый элемент задержки, управляемый генератор, схема выборки-хранения и интегратор. Время первого такта определяется временем установления переходного процесса в указанном контуре. Во время первого такта схема выборки - хранения под воздействием управляющего сигнала с блока предварительной обработки находится в режиме выборки. При этом с выхода фазового детектора на основной вход схемы через интегратор поступает сигнал, амплитуда которого пропорциональна разности фаз (времени запаздывания) сравниваемых сигналов. После установления переходного процесса, когда разность фаз между опорным сигналом $S_0(t)$, поступающим с выхода регулируемого элемента задержки, и сигналом с выхода ЛППЗ равна нулю, блок предварительной обработки формирует второй такт.

Достижение нулевой разности фаз производится регулировкой времени задержки t_z с помощью элемента задержки, управляемой за счет изменения частоты импульсов генератора. Во время второго такта отключается контур автоматической подстройки времени запаздывания, что обеспечивает фиксированное время задержки t_z . Во втором такте производится измерение разности фаз на заданных пространственных частотах, т.е. ФПФ контролируемой системы, с помощью фазового детектора, с выхода которого сигнал, пропорциональный разности фаз, поступает через ФНЧ 21 на прибор регистрации.

2.8 Установки для измерения ОПФ с цифровым преобразованием Фурье.

Рассмотрим теперь некоторые примеры установок, в которых используются при измерении ОПФ цифровые методы преобразования Фурье. Таким примером является одна из последних моделей в семействе EROS - установка Solid State EROS [20]. Появлению этой установки предшествовали успехи в технологии создания твердотельных чувствительных элементов, а также разработки в области математического обеспечения. Все это вместе взятое позволило создать установку, которая является достижением в последнее десятилетие.

Уже отмечалось, что семейство установок EROS в настоящее время является известным как наиболее многосторонний и объективный анализатор характеристик объективов, как для видимого, так и ИК диапазона. Новое оборудование Solid State позволяет проводить измерения и непосредственно наблюдать на дисплее результаты исследований в реальном масштабе времени. Оно имеет модульную конструкцию, что позволяет использовать ее для исследования в принципе любой оптической системы.

Система Solid State EROS, удовлетворяющая требованиям автоматизации измерений с помощью компьютера, практически исключает возможность ошибок со стороны оператора, в то же время значительно ускоряет процедуру измерений. Отличительной особенностью системы является применение в качестве приемника излучения фотодиодной матрицы высокого разрешения, которая позволяет получить ФРЛ контролируемого объектива без механического сканирования во время измерений. Установка отличается высокой надежностью и компактностью.

Принцип действия.

Solid State EROS является идеальным высококачественным испытательным инструментом для проведения фундаментальных исследований оптических систем.

Установка включает в себя объект-генератор, зеркальный коллиматор, анализатор изображения, поворотное устройство для проведения измерений по полю зрения, установленные на универсальной прецизионной плите. В качестве тест-объекта используется узкая щель, которая освещается источником света.

Особенностью установки, как уже отмечалось, является использование линейной матрицы фотодетекторов для измерения ФРЛ испытуемых систем. Линейка - матрица располагает перпендикулярно щели тест-объекта. Распределение интенсивности в изображении щели, т.е. ФРЛ, регистрируется приемником. Дальнейшая обработка осуществляется при помощи компьютера. Все результаты измерений отображаются на дисплее. В результате измерений вводится поправка на конечную ширину щели и апертуру приемника. Полное время для получения всей необходимой информации вычисления и индикации на дисплее составляет менее 100 мсек.

Solid State EROS полностью совместима с существующим оборудованием предшествующей установки EROS - 200.

Другим примером универсальной, полностью автоматизированной установки является EO1200. Установка EO1200 [20] измеряет оптические параметры объектива при минимальном вмешательстве оператора. Эта установка особенно хорошо подходит, благодаря обширным автоматическим возможностям, для использования на производственных линиях, но при ее разработке было также предусмотрено использование в качестве прибора общего пользования за счет расширения программного обеспечения. Установка разработана в модульной конструкции. Сменные модули также расширяют возможности контроля оптики. Так, сменные модули источников и приемников излучения позволяют перекрыть спектральный диапазон от 0,3 мкм до 20 мкм.

Работа установки.

Свет излучается источником проходит через фильтр, модулятор и точечную диафрагму, расположенную в фокальной плоскости коллиматора. Размер точечной диафрагмы и фокусное расстояние коллиматора выбраны таким образом, чтобы обеспечить желаемый размер пятна рассеяния в фокальной плоскости контролируемого объектива. Коллимированное излучение попадает на поворотное плоское зеркало. Поворотное зеркало служит для формирования осевых или наклонных пучков и располагается рядом с входным зрачком контролируемого объектива. После отражения от поворотного зеркала излучение падает на контролируемый объектив, который фокусирует излучение в своей фокальной плоскости. Далее следует полевая линза 6, которая сопрягает выходной зрачок объектива и плоскость фотоприемника. В фокальной плоскости объектива располагается нож сагитально - тангенциального анализатора. Нож имеет вертикальную и горизонтальную кромки и приводится в движение из опорной точки с помощью трех управляемых вычислительной машиной шаговых двигателей по трем координатам. Благодаря полевой линзе, вся энергия, проходящая через контролируемый объектив, попадает на фотоприемник в пределах расчетного допустимого отклонения и распределяется по площадке приемника независимо от величины перекрытия ножом абберационного пятна контролируемого объектива. Выходной сигнал приемника преобразуется в цифровой и подается в вычислительную машину. Сигнал, регистрируемый фотоприёмником при движении кромки ножа в направлении координаты x , воспроизводится на мониторе вычислительной машины и является функцией кромки ножа $G(x)$, которая будет исходной для вычисления функции передачи модуляции.

Известно, что оптическая передаточная функция (ОПФ), модулем которой является функция передачи модуляции (ФПМ), определяется как нормализованный Фурье - образ

функции рассеяния линии. Функция рассеяния линии в свою очередь представляет собой производную от функции кромки ножа (пограничной кривой). Эта зависимость выражается в уравнении

$$T(p) = |OTF| = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{dG(x)}{dx} e^{-i \cdot 2 \cdot \pi \cdot p \cdot x} dx}{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{dG(x)}{dx} dx} \quad (48)$$

Выражение в знаменателе представляет собой множитель, приравнивающий функцию передачи модуляции на частоте $p = 0$ к единице (нормировка). Его величина будет равна $G(\infty) - G(-\infty) = G_{\max} - G_{\min}$. С помощью подстановки $e^{-i \cdot 2 \cdot \pi \cdot p \cdot x} = \cos(2 \cdot \pi \cdot p \cdot x) - i \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot p \cdot x)$ уравнение (48) может быть приведено к виду

$$T(p) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{dG(x)}{dx} \cos(2 \cdot \pi \cdot p \cdot x) dx - i \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dG(x)}{dx} \sin(2 \cdot \pi \cdot p \cdot x) dx}{G_{\max} - G_{\min}} \quad (49)$$

Так как модуль комплексного числа определяется как корень квадратный из суммы квадратов действительной и мнимой частей, то

$$T(p) = \sqrt{\frac{\left(\int_{-\infty}^{\infty} \frac{dG(x)}{dx} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot p \cdot x) dx\right)^2 + \left(\int_{-\infty}^{\infty} \frac{dG(x)}{dx} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot p \cdot x) dx\right)^2}{G_{\max} - G_{\min}}} \quad (50)$$

Микро-ЭВМ установки вычисляет эти интегралы от синусов и косинусов как суммы для каждой из десяти частот при каждом сканировании функции кромки ножа. Сагиттальная составляющая функции передачи модуляции измеряется при сканировании горизонтальной кромкой ножа, а меридиональная составляющая - при сканировании вертикальной кромкой.

Ввод в память машины координат траектории движения ножа позволяет получить такие параметры, как задний фокальный отрезок и эффективное фокусное расстояние.

Составные части установки.

Источник излучения. Модульная конструкция источников излучения позволяет перекрыть широкий спектральный диапазон. Так для измерений в ИК области спектра используется глобар модели 4570244 фирмы "Перкин Эльмер". Излучение источника модулируется на частоте 1 кГц оптическим затвором модели H2IAI фирмы "Дженерал электрик", обеспечивающим также сигнал для схемы синхронного детектирования.

Анализатор. Анализатор содержит три привода модели I4QI фирмы "Аэротех". "X"-привод, укрепленный под углом 45 градусов, передвигает нож поперек пятна шагами с минимальным пределом 1,767 мкм. "Z" - привод передвигает нож вдоль оси объектива с целью определения плоскости наилучшего изображения, "Y"-привод обеспечивает вне осевое

положение ножа. Анализатор содержит охлаждаемый приемник модели HgCdTe-60. Охлаждение осуществляется жидким азотом. Приемник снабжен полевым объективом. Сигнал с приемника подается на предварительный усилитель, расположенный непосредственно за ним. Предусилитель сконструирован так, чтобы работать с тремя типами приемников: инфракрасным, фотоумножителем и кремниевым фотодиодом. Блок приемника имеет ручную регулировку положения по координате " Z ", положения по высоте" Y " и по координате "X".

Поворотное зеркало. Платформа с поворотным зеркалом позволяет устанавливать зеркало на заданные полевые углы.

Основной процессор. Этот узел прибора обрабатывает данные, полученные от анализатора, и управляет перемещением ножа анализатора. Основной процессор содержит также селективный усилитель с шириной полосы пропускания 30 Гц и интегрирующим фильтром с постоянной времени 0,1 сек. Фаза и ноль селективного усилителя устанавливаются вручную. В узел основного процессора входит микропроцессор, который управляет всеми платформами, аналого-цифровой преобразователь, и интерфейсный блок для подключения внешней ЭВМ. В качестве внешней ЭВМ применяется компьютер фирмы "Apple".

Заключение.

Задача достоверного и оперативного определения качества изображения широкого класса оптических систем является весьма актуальной в настоящее время. Среди многочисленных устройств, предназначенных для измерения оптической передаточной функции, наибольшее распространение получили фотоэлектрические установки со сканированием воздушного изображения.

За сравнительно короткий промежуток времени быстрое развитие различных методов измерений и усовершенствование аппаратных средств привело к созданию эффективных способов контроля. Несмотря на многообразие измерительных установок и методов, заложенных в их принцип действия, системы со сканированием имеют два общих обязательных узла. Это узел тест-объекта и анализирующие устройства, расположенные в плоскости изображения исследуемой системы. При этом, в простейших установках определяется только коэффициент передачи модуляции из расчетов на основании измеренных значений освещенности в изображении периодической структуры тест-объекта.

В более совершенных установках модуляция в изображении определялась при помощи электронных устройств. Кроме того, некоторые установки этого класса позволяют определять также и функцию передачи фазы. Наконец, в более поздних устройствах регистрируется функция рассеяния линии (точки) или пограничная кривая исследуемой системы и далее, при помощи средств вычислительной техники, полученные результаты

обрабатываются и выдаются в удобной для оператора форме. Установки этого типа обычно полностью автоматизированы и обладают широкими функциональными возможностями. Кроме измерений полной оптической передаточной функции (т.е. функции передачи модуляции и функции передачи фазы) как в центре поля зрения, так и на краю, эти установки позволяют определять эффективное фокусное расстояние, задний вершинный отрезок и т.д.

В настоящее время при измерении качественных характеристик оптических систем используются установки, основанные на разнообразных методах измерений. При сравнении различных устройств и методов, заложенных в них, можно заключить, что все они имеют как достоинства, так и недостатки. При этом, совершенствование установок обычно сопровождается усложнением конструкции и повышением их стоимости. Однако, это компенсируется более высокой точностью измерений, уменьшением времени исследования, все более полной информацией об испытуемом объекте и т.д.

В настоящем обзоре была сделана попытка дать ряд практических сведений, касающихся наиболее доступных методов измерений ОПФ и оборудования, реализующих эти методы. Этот материал может послужить начальной основой для разработки компактного оборудования для контроля передаточной функции всего тракта аппаратуры аэрофотосъёмки с плёночными и цифровыми носителями информации в процессе её эксплуатации, что необходимо для повышения качества аэрофотосъёмки с помощью цифровых методов коррекции изображений.

Необходимо отметить, что для определения ФПМ оптико-электронной аппаратуры с целью оценки её разрешающей способности в процессе эксплуатации возможно использование изображений, получаемых с помощью этой же аппаратуры. С этой целью применяются изображения, насыщенные объектами в виде резких краев полуплоскостей (населённые пункты, промышленные объекты и т.д.) и статистические методы для определения ФПМ [15]. К сожалению нам не известны работы, где эти методы прошли надёжную экспериментальную проверку, которая бы подтвердила точность получения оценок ФПМ, пригодных для повышения качества изображений аэрофотосъёмки с помощью цифровых методов коррекции изображений.

3. Результаты решения обратной задачи относительно ядра

Как отмечалось, представляется интересной возможность интегральной оценки МПФ по известному идеальному изображению тест объекта и его изображению, зарегистрированной в реальных условиях. При этом учитываются свойства слоя пространства. Ниже приведены результаты экспериментов. В них ищется такой параметр регуляризации, при котором разница

между восстановленным ядром и каким-либо эталонным ядром минимальна по среднеквадратическому критерию.

Эталонные ядра задаются в виде классов ядер, внутри которых ядра различающихся лишь одним параметром. Например, это могут быть «гауссоиды» $k(x, y, r) = \exp(-(x*x + y*y)/(r*r))$, которые отличаются друг от друга только одним параметром r . Другими классами ядер могут быть импульсные отклики, приведенные выше, а параметром у всех них будет. Можно даже создать класс, соответствующий аппаратным функциям реально выпускаемых систем, но придется использовать интерполяцию либо другие методы, т.к. подразумевается, что параметр r не дискретный.

Процесс поиска ядра идет автоматически. Сравниваются все восстановленные, с разными параметрами регуляризации, ядра и все эталонные, с разными значениями параметра r , ядра. За оптимальное принимается пара эталонного и восстановленного ядра, имеющая минимальное значение среднеквадратического критерия сравнения.

На рисунке 4 приведены искаженные изображения и полученные программой восстановленные ядра, принятые за оптимальные. Во всех приведенных случаях за идеальное изображение бралось то, которое представлено на рисунке 3, а ядро всегда искалось среди гауссоид. Восстановленное ядро приведено в таблице в виде модуляции яркостью, и слева и сверху от ядра приведены сечения данного ядра по оси x и y . Участки ядра, для которых приведены сечения, обозначены перекрестьем.

На рисунке 3 приведено изображение тест – объекта, принятое за идеальное.

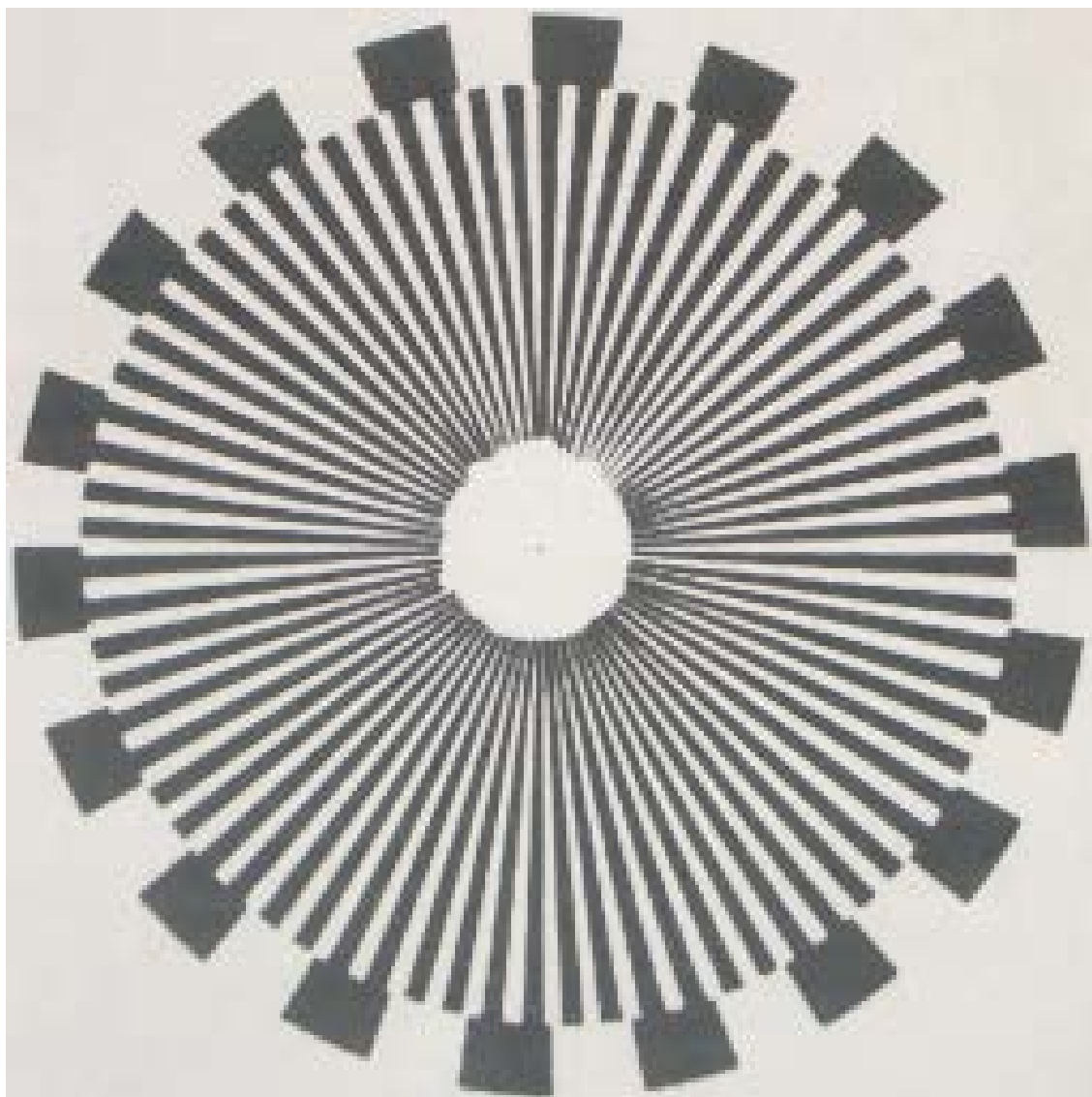
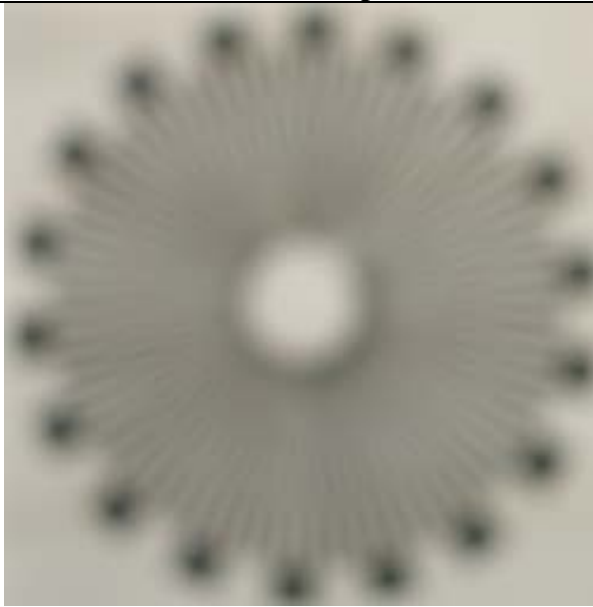
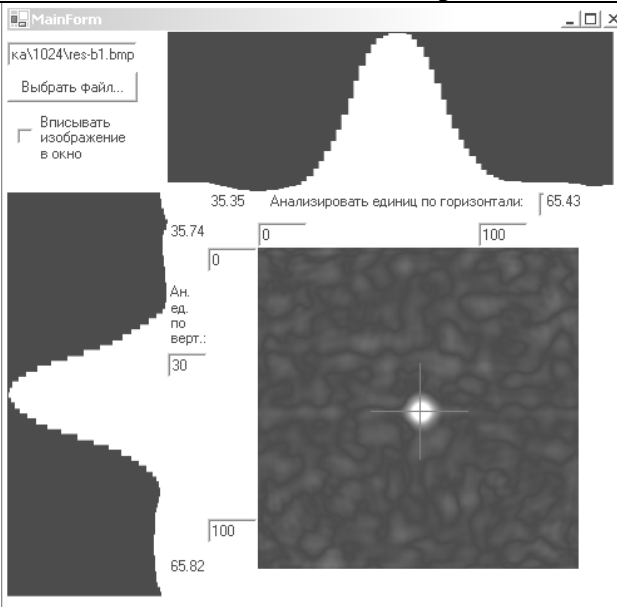
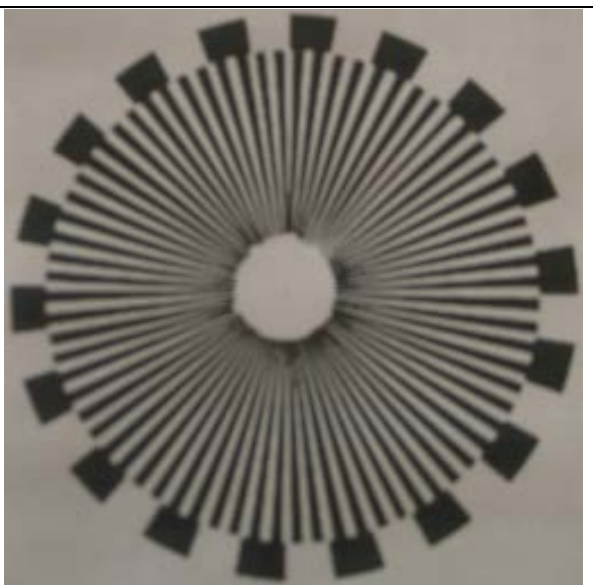
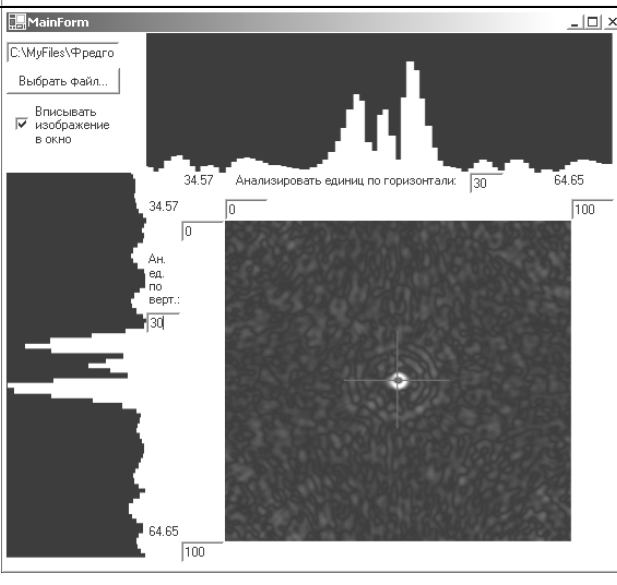
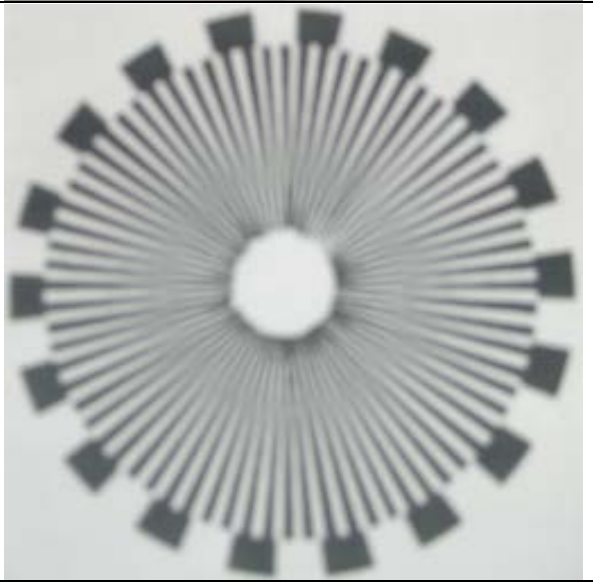
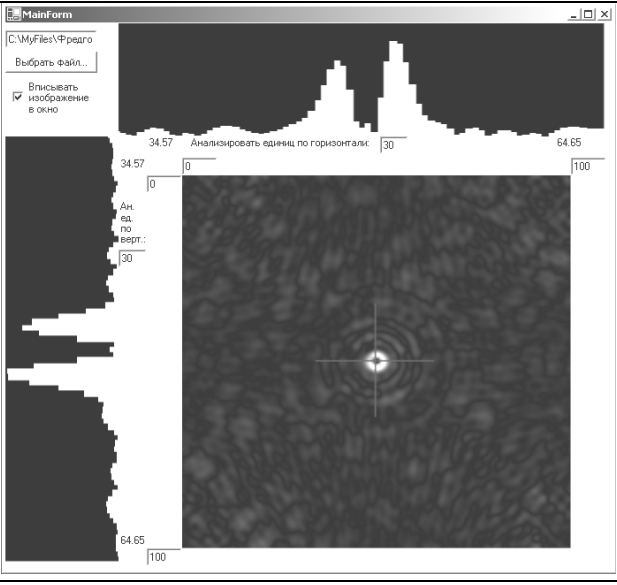


Рис. 3 [8]- Изображение, принятое за идеальное

На рисунке 4 [8] приведены результаты определения ядра.

№	Искаженное изображение	Восстановленное ядро
1		 MainForm ка\1024\res-b1.bmp Выбрать файл... ☐ Вписывать изображение в окно 35.35 Анализировать единиц по горизонтали: 65.43 35.74 0 100 Ан. ед. по верт.: 30 100 65.82
2		 MainForm C:\MyFiles\Фредго Выбрать файл... ☒ Вписывать изображение в окно 34.57 Анализировать единиц по горизонтали: 64.65 34.57 0 100 Ан. ед. по верт.: 30 100 64.65
3		 MainForm C:\MyFiles\Фредго Выбрать файл... ☒ Вписывать изображение в окно 34.57 Анализировать единиц по горизонтали: 64.65 34.57 0 100 Ан. ед. по верт.: 30 100 64.65

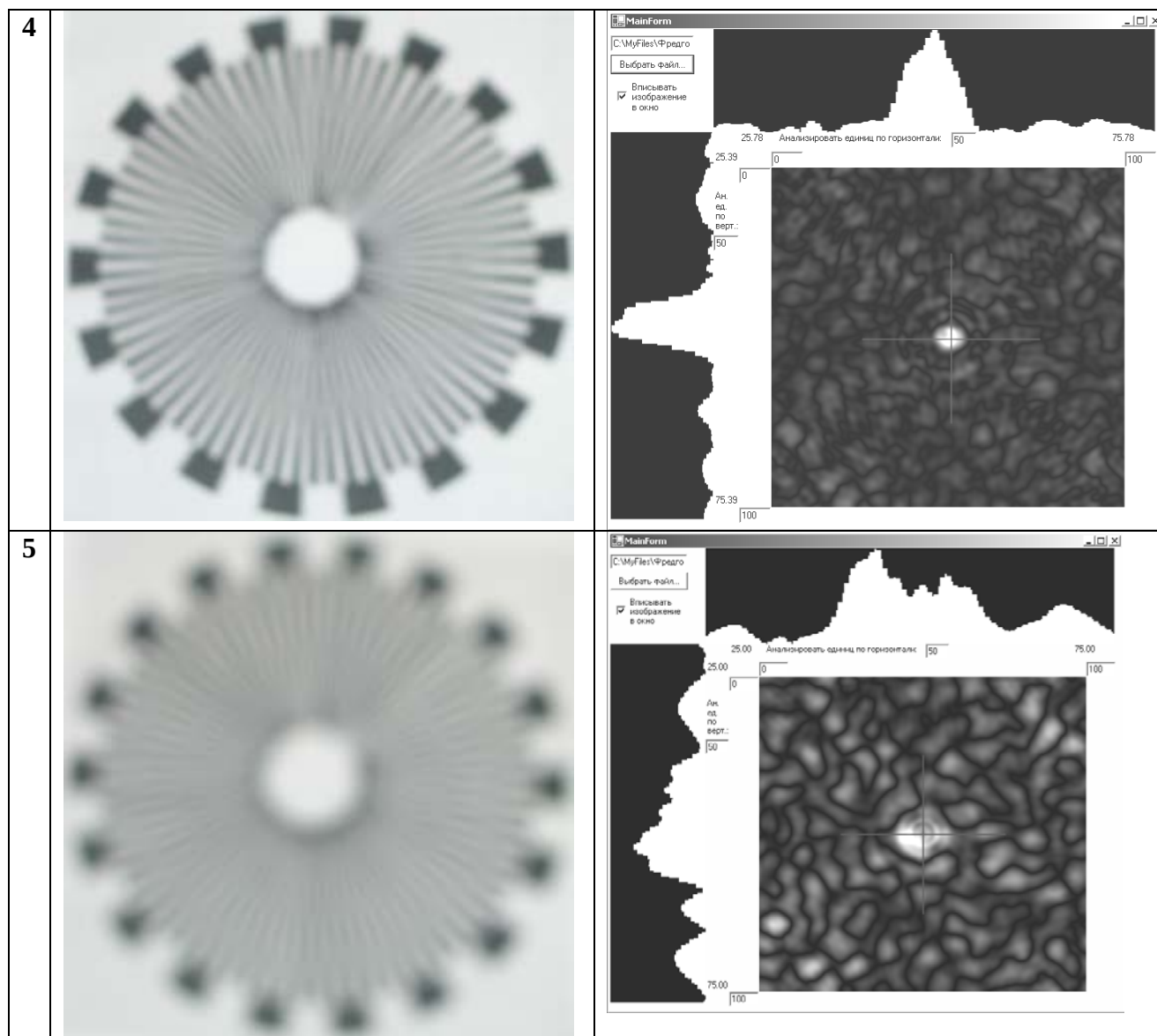


Рис. 4 - Восстановленные ядра.

Как видно из рисунка 4, ядра восстанавливаются. При этом значения параметра регуляризации достигают значений $10^3 - 10^5$ отн. ед.

Для получения МПФ достаточно выполнить преобразование Фурье от массива значений ядра.

Таким образом, результаты испытаний показали, что поставленная в настоящей работе задача оперативного контроля МПФ аппаратуры ДЗЗ имеет решение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные анализ и исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. В процессе эксплуатации аппаратура ДЗЗ претерпевает качественные изменения, подлежащие компенсации, либо учету при обработке зарегистрированных изображений.

2. Контроль средств ДЗЗ в зависимости от сроков эксплуатации необходимо вести следующими методами:
- Путем покомпонентного контроля узлов (прежде всего, объектива) при частичном демонтаже с использованием известных штатных приборов и установок.
 - Путем интегральной оценки МПФ всего тракта.
3. Предложена методика оперативного контроля аппаратуры ДЗЗ и коррекции результатов съемки, заключающаяся в следующем:
- Непосредственно перед съемкой в метеоусловиях, близких условиям района съемки, регистрируется тест-объект.
 - Производится плановая съемка в районе разведки.
 - В наземных условиях по зафиксированному и идеальному изображениям тест-объекта решается обратная задача относительно ядра уравнения Фредгольма.
 - Функция, описывающая ядро, имеет двоякое назначение – используется для определения МПФ, либо для восстановления расфокусированных изображений путем решения обратной задачи относительно найденного ядра.

Работа выполнена при поддержке Гранта РФФИ № 11-08-00850-а

Используемые источники

- 1 Кулагин С. В., Апарин Е. М. Проектирование фото- и киноприборов. М, Машиностроение, 1986 г.
2. Савиных В. П., Кучко А. С., Стеценко А. Ф. Аэрокосмическая фотосъемка. "Картгеоцентр" – "Геозидат", 1997 г.
3. Лаврова Н. И., Стеценко А. Ф. Аэрофотосъемка. Аэрофотосъемочное оборудование.
4. Мосеев А. В., Филиппов М. В., Чичварин Н. В. Математическая модель оптико-электронного прибора для решения задачи синтеза в САПР// Тез. докл. на советском национальном комитете международной ассоциации по математическому и машинному моделированию, Горький, 1987 г.
5. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. Учебное пособие для ВУЗов. М.: Наука, 1986 г.

6. Верлань А. Ф., Сизиков В. С. Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы. Справочное пособие. Киев: Наукова думка, 1986 г.
7. Мосягин Г. М., Немтинов В. Б., Лебедев Е. Н. Теория оптико-электронных систем. Учебник для студентов ВУЗов по оптическим специальностям, М, Машиностроение, 1990 г.
8. Т.М. Волосатова, А.В. Воронов, Н.В. Чичварин Математическое и программное обеспечения решения задач анализа и синтеза для САПР оптико-электронных систем. - Компьютерные технологии. Приложение, №2, 2008 г.
9. М.Я.Шульман. Измерение передаточных функций оптических систем. Л.,Машиностроение,1980 г.
- 10.М.Я.Шульман . Автоматическая фокусировка оптических систем. Л. ,Машиностроение, 1990 г.
11. Birch K.G. A lens testing apparatus. Optica Acta, 1958, 5- hors serie, p.271-273.
12. Birch K.G. A scanning instrument for the measurement of optical frequency response. Proc.Phys.Soc., 1961,77,pt.4,№ 496, p.901-912.
- 13.Березин Н.П. Установка для измерения ЧКХ фотографических объективов. ОМП,1961,№11,с.29-32.
- 14.Шульман М.Я., Соколова Н.Н., Васильев Ю.В. и др. Прибор для измерения частотно-контрастных характеристик объективов различного назначения . ОМП, 1973,№7,с.33-36.
15. Новик Ф.С., Ногин А.П. Киносъемочная оптика ,М.,Искусство,1968 г.
16. EROS OTF Lens Testing. Проспект фирмы «Ealing Beck Ltd», England.
- 17.Tiziani H. The use of the optical transfer function for assessing the quality of optical systems, Photogrammetrics, 1978,v.34, p.45-68.
- 18.T.C. Grisolia, I.R. Pren. A device for the optical transfer function measurement, Journal of Optics,1985,v.16,№2, p.77-81.
19. Афиногенов Е. И., Волосатова Т. М., Сельвесюк Н. И., Чичварин Н. В. Метод системного анализа комплексов аэрофоторазведки. **//technomag.edu.ru: Наука и Образование: электронное научно-техническое издание. 2011. выпуск 11. URL <http://technomag.edu.ru/doc/239824.html> (дата обращения 10.11.2011)**
20. Афиногенов Е. И., Волосатова Т. М., Сельвесюк Н. И., Чичварин Н. В. Метод системного анализа аппаратуры и режимов аэрофоторазведки. . **//technomag.edu.ru: Наука и Образование: электронное научно-техническое издание. 2011. выпуск 12. URL <http://technomag.edu.ru/doc/261314.html> (дата обращения 27.12.2011)**
21. Брызгалов В.А., Великотный М.А., Демидов Н.В. Авторское свидетельство,SU 1160254 А 07.06.85 г. Бюл.№21.

22. Брызгалов В.А., Великотный М.А., Демидов Н.В. Авторское свидетельство, SU 1296640 A 23.01.86 г. Бюл. №3.

23. Проспект фирмы Ealing Electro-Optics Inc., Solid state EROS advanced lens testing.

24. Bode A. Messung der modulationsübertragungsfunktion von hochleistungs objektiven, Bild und ton, 1980, №5, 141-151.

25. Smirnov M.V., Korolev A.N., Sivykov I.N., Zvezdin D.I. Method and software of automatic resolution evaluating of optic-electronic telescopic land remote sensing system , The 10-th Annual International AeroSense Symposium, Orlando, Florida, USA, (8-12 April 1996).

1i. www.laserlocation.ru/chapter8.html

2i. venta-vlg.ru/blog/aerofotoapparaty.html

3i. geoprofi.ru/default.aspx

4i. jena.ru/catalog/air_equipment/vexcel/

5i. gisa.ru/51120.html

6i. www.lii.ru

Analysis of methods and means of controlling Earth remote sensing systems

77-30569/322927

02, February 2012

Afinogenov E.I., Volosatova T.M., Sel'vesyuk N.I., Chichvarin N.V.

Bauman Moscow State Technical University

VVIA im. professora N.E. Jukovskogo i Yu.A. Gagarina

afinogenov.evgeniy@gmail.com

tamaravol@gmail.com

selvesyuk@yandex.ru

genrih.gertz@gmail.com

This paper covers the research results and analysis of methods and means of technical assessment of the condition of Earth remote sensing (ERS) systems during the test and on-stream periods. The obtained results are to provide a basis for further development of testing equipment for Earth remote sensing systems; moreover, they will provide a huge base of technical documentation (standards, guidelines for aircraft equipment testing etc.) for estimation of basic parameters which characterize the efficiency of application of digital observation equipment and their technical condition. The authors proposed a technique of online testing of the transfer function of remote sensing equipment during the on-stream period with a subsequent compensation of defocusing.

Publications with keywords: [the complex](#), [transmit function](#), [remote Earth sensing](#), [the plane](#), [aerocamera](#), [recorder](#), [blur](#), [defocusing](#)

Publications with words: [the complex](#), [transmit function](#), [remote Earth sensing](#), [the plane](#), [aerocamera](#), [recorder](#), [blur](#), [defocusing](#)

References

1. Kulagin S.V., Aparin E.M. *Proektirovanie foto- i kinopriborov* [Design of photo and video devices]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 280 p.
2. Savinykh V.P., Kuchko A.S., Stetsenko A.F. *Aerokosmicheskaya fotos"emka* [Aerospace photography]. Moscow, Kartgeotsentr-Geodezizdat Publ., 1997. 378 p.
3. Lavrova N.I., Stetsenko A.F. *Aerofotos"emka. Aerofotos"emnoye oborudovanie* [Aerial photography. Aerial photography equipment]. Moscow, Nedra Publ., 1981. 292 p.
4. Moseev A.V., Filippov M.V., Chichvarin N.V. *Matematicheskaya model' optiko-elektronnogo pribora dlia resheniya zadachi sinteza v SAPR* (in Russ.) [A mathematical model of optoelectronic device for solving the synthesis problem in CAD]. Abstr. of the Report at the Soviet Nat. Comm. of the Int. Assoc. for Mathematical and Computer Modeling. Gor'kii, 1987.

5. Tikhonov A.N., Arsenin V.Ia. *Metody resheniia nekorrektnykh zadach* [Methods for solving incorrect problems]. Moscow, Nauka Publ., 1986 p.
6. Verlan' A.F., Sizikov V.S. *Integral'nye uravneniia: metody, algoritmy, programmy* [Integral equations: Methods, algorithms, software]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1986.
7. Mosiagin G.M., Nemtinov V.B., Lebedev E.N. *Teoriia optiko-elektronnykh sistem* [The theory of optoelectronic systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 431 p.
8. Volosatova T.M., Voronov A.V., Chichvarin N.V. Matematicheskoe i programmnoe obespecheniie resheniia zadachi analiza i sinteza dlia SAPR optiko-elektronnykh sistem [Mathematical and software solutions for analysis and synthesis problems for CAD of optoelectronic systems]. *Informatsionnye tekhnologii*, 2008, no. 4, suppl., pp. 2-32.
9. Shul'man M.Ia. *Izmerenie peredatochnykh funktsii opticheskikh sistem* [Measurement of transfer functions of optical systems]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1980. 208 p.
10. Shul'man M.Ia. *Avtomaticheskaiia fokusirovka opticheskikh sistem* [Auto-focusing of optical systems]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1980. 379 p.
11. Birch K.G. A lens testing apparatus. *Optica Acta*, 1958, no. 5 (Spec. iss.), pp. 271-273.
12. Birch K.G. A scanning instrument for the measurement of optical frequency response. *Proceedings of the Physical Society*, 1961, vol. 77, no. 4, pp. 901-912.
13. Berezin N.P. Ustanovka dlia izmereniia ChKKh fotograficheskikh ob"ektivov [Device for measuring the MTF of photographic lenses]. *Optiko-mekhanicheskaiia promyshlennost'*, 1961, no. 11, pp. 29-32.
14. Shul'man M.Ia., Sokolova N.N., Vasil'ev Iu.V., e.a. Pribor dlia izmereniia chastotno-kontrastnykh kharakteristik ob"ektivov razlichnogo naznacheniia [A device for measuring the frequency-contrast characteristics of multi-purpose lenses]. *Optiko-mekhanicheskaiia promyshlennost'*, 1973, no. 7, pp. 33-36.
15. Novik F.S., Nogin A.P. *Kinos"emochnaia optika* [Filming optics]. Moscow, Iskusstvo Publ., 1968. 408 p.
16. *EROS OTF Lens Testing*. «Ealing Beck Ltd» Company's brochure, England.
17. Tiziani H. The use of the optical transfer function for assessing the quality of optical systems. *Photogrammetria*, 1978, vol. 34, no. 2, pp.45-68.
18. [Grisolia J.C.](#), [Priu J.R.](#) A device for the optical transfer function measurement. *Journal of Optics*, 1985, vol. 16, no. 2, pp. 77-81.
19. Afinogenov E.I., Volosatova T.M., Sel'vesiuk N.I., Chichvarin N.V. Metod sistemnogo analiza kompleksov aerofotorazvedki [[Method of equipment's and aerial reconnaissance modes' system analysis](#)]. *Nauka i Obrazovanie*, 2011, no. 11. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/239824.html>. Accessed Nov. 10, 2011.
20. Afinogenov E.I., Volosatova T.M., Sel'vesiuk N.I., Chichvarin N.V. Metod sistemnogo analiza apparatury i rezhimov aerofotorazvedki [[System analysis for the reconnaissance photography complexes](#)]. *Nauka i Obrazovanie*, 2011, no. 11. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/261314.html>. Accessed Dec. 27, 2011.
21. Bryzgalov V.A., Velikotnyi M.A., Demidov N.V. *USSR Author's Certif., no. 1160254 A*. 1985.
22. Bryzgalov V.A., Velikotnyi M.A., Demidov N.V. *USSR Author's Certif., no. 1296640 A*. 1986.

23. *Solid state EROS advanced lens testing*. Ealing Electro-Optics Inc., Company's brochure.
24. Bode A. Messung der modulationsübertragungsfunktion von hochleistungs objective. *Bild und ton*, 1980, no. 5, pp. 141-151.
25. Smirnov M.V., Korolev A.N., Sivykov I.N., Zvezdin D.I. Method and software of automatic resolution evaluating of optic-electronic telescopic land remote sensing system. *10th Annual Int. AeroSense Symp.*, Orlando, FL, USA, April 8-12, 1996.
- 1i. *Laser-radar topography method and real-time mapping systems*. Available at: <http://www.laserlocation.ru/chapter8.html>.
- 2i. *Aerial cameras*. Available at: <http://venta-vlg.ru/blog/aerofotoapparaty.html>.
- 3i. *Geoprofi.ru*. Available at: <http://geoprofi.ru/default.aspx>.
- 4i. *Jena instruments*. Available at: http://jena.ru/catalog/air_equipment/vexcel/
- 5i. *GIS portal*. Available at: <http://gisa.ru/51120.html>.
- 6i. *M.M. Gromov Flight Research Institute*. Available at: <http://www.lii.ru>.