

ПРЕЦИЗИОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ISSN 3033-778X



№ 1
2026

ПРЕЦИЗИОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ АО «НПК «СПП»

№ 1. 2026

ISSN 3033-778X

Главный редактор:

д.т.н. Сухой Ю. Г.

Заместители главного редактора:

д.т.н. Агеев Ю. Д.

д.ф.м.н. Трушкова Е. А.

Редакционная коллегия:

к.т.н. Акентьев А. С. (АО «НПК «СПП»), д.т.н. Алеев Р. М. (ОСП «РБМ ОЭК» г. Казань), д.т.н., профессор Бажанов Ю. В. (АО «НПК «СПП»), д.т.н., профессор Бетанов В. В. (АО «РКС»), д.т.н., профессор Бондарева М. К. (ФГБНУ «Экспертно-аналитический центр»), д.т.н., профессор Бусыгин В. П. (ФГКУ «12-й ЦНИИ» МО РФ), д.т.н., профессор Круглов А. В. (АО «РКС»), д.т.н., доцент Малай И. М. (ФГУП «ВНИИФТРИ»), д.т.н., профессор Мальцев Г. Н. (ВКА им. А. Ф. Можайского), д.ф.м.н., профессор Милюков В. К. (Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга МГУ им. М. В. Ломоносова), д.т.н., с.н.с. Олейников И. И. (АО «ЦНИИмаш»), д.т.н., с.н.с. Пасынков В. В. (АО «НПК «СПП»), д.т.н., профессор Пеньков М. М. (АО «ЦНИИмаш»), д.т.н. Полтавец Ю. И. (АО «РКС»), д.т.н., доцент Соколов А. Л. (АО «НПК «СПП»), д.т.н., с.н.с. Тунгушпаев А. Т. (АО «НПК «СПП»), д.т.н. Швыдун В. В. (ФГУП «ВНИИФТРИ»).

Основные разделы журнала:

№	Наименование	Научные специальности ВАК
1.	Информационно-измерительные и управляющие системы	2.2.11.
2.	Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы	2.2.6.
3.	Приборы навигации	2.2.5.
4.	Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения	2.2.13.
5.	Радиолокация и радионавигация	2.2.16.
6.	Системный анализ, управление и обработка информации	2.3.1.
7.	Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов	2.5.16

Содержание:

Журнал «Прецизионные оптические информационно-измерительные и управляющие системы».	
Читателям от генерального директора АО «НПК «СПП»	3
О журнале. Читателям от главного редактора.....	4

Рубрика 2.2.11.

1. Рой Ю. А., Токарев К. Е., Тунгушпаев А. Т., Кутузова Д. М. Перспективы совершенствования сетей квантово-оптических систем (АО «НПК «СПП»)	5
2. Пасынков В. В., Олейников И. И., Архипов С. А. Ключевые аспекты построения космической системы мониторинга техногенных космических объектов в околоземном космическом пространстве (АО «НПК «СПП», АО «ЦНИИмаш»).....	13
3. Гуйда М. В., Боровский В. Ф., Гуйда Н. В., Сухой Ю. Г. Никольская Т. В. Применение технологий искусственного интеллекта в оптических информационно-измерительных и управляющих системах (АО «РКС», АО «НПК «СПП», ГК «Роскосмос»)	21
4. Никольская Т. В., Сухой Ю. Г. Проблемы и перспективы создания отечественных автоматических компактных квантово-оптических станций (АО «НПК «СПП»)	26
5. Румянцев В. Е., Яковлев А. В. Применение методов символического искусственного интеллекта в системе управления лунным лазерным дальномером (Филиал АО «НПК «СПП» в Санкт-Петербурге)	33

Рубрика 2.2.6.

6. Бажанов Ю. В., Степанцов А. М. Расчет оптической системы телескопа с главным зеркалом сферической формы (АО «НПК «СПП»)	38
7. Алеев Р. М., Мурашкин В. В., Чижилов М. А. Разработка и исследование математической модели динамики двухосного опорно-поворотного устройства с прецизионным контуром наведения на основе пьезопривода (ОСП «РБМ ОЭК» г. Казань, АО «НПК «СПП»)	45
8. Новиков А. Ю., Чижилов М. А., Лозов Р. К. Разработка объектива для диапазона волн от 550 нм до 850 нм с применением узкополосных фильтров (ОСП «РБМ ОЭК» г. Казань, АО «НПК «СПП»)	54
9. Алеев Р. М., Григорьев В. Н., Леонтьев А. В., Чижилов М. А., Новиков А. Ю. Передача квантовых сигналов с использованием атмосферной трассы. Вариант построения линзовой оптической системы (ОСП «РБМ ОЭК» г. Казань, АО «НПК «СПП»).....	57
10. Боголюбов И. А., Бажанов Ю. В., Мокшанов В. Н. Оптимизация оптической системы главного телескопа инфракрасного радиометра (АО «НПК «СПП»).....	60
11. Орлов Д. Н., Новиков А. Ю., Сretenский А. А., Сычев В. В., Фоломин А. Е. Деформации опорных подшипников в конструкции оптико-электронных систем (ОСП «РБМ ОЭК» г. Казань, АО «НПК «СПП»)	66
12. Мейтин В. А. Метод разделения функций угловых мер и несущих конструкций (АО «НПК «СПП»).....	71

Рубрика 2.2.13.

13. Швейкин Е. Ю., Ефимов К. Л. Алгоритм обнаружения облаков на изображениях в градациях серого (Филиал АО «НПК «СПП» в Великом Новгороде)	82
14. Галеев Д. Р. Алгоритм обработки тепловизионных изображений (ОСП «РБМ ОЭК» г. Казань)	87
15. Серебряков Д. А., Корнышев Н. П. Гиперспектральная система с компенсацией дополнительных интерференционных мод для высокоточной спектральной визуализации (Филиал АО «НПК «СПП» в Великом Новгороде)	91
2 Требования к материалам для публикации в журнале	95

Уважаемые читатели!

Представляем вам первый выпуск журнала Акционерного общества «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения», который приурочен к 40-летию нашей организации. Это событие знаменует новый этап в развитии предприятия и открывает возможности для обмена знаниями, идеями и опытом в области высокоточных технологий оптического приборостроения.

Ускоренное совершенствование оптических информационно-измерительных и управляющих систем с применением современных оптико-электронных средств обуславливает их эффективное применение для освоения околоземного космического пространства, что, в свою очередь, требует решения ряда научных проблем в вопросах их построения в целях безопасной, надёжной и эффективной эксплуатации оптических систем и комплексов. Обсуждению и решению этих вопросов будет способствовать наш журнал «Прецизионные оптические информационно-измерительные и управляющие системы».

Основными целями издания являются: популяризация научных достижений и инженерных решений в области высокоточных оптических приборов и систем; содействие внедрению инновационных технологий в производство; укрепление связей между научным сообществом, промышленностью и государственными органами; формирование дискуссионной площадки для обсуждения актуальных проблем и перспектив развития отрасли. Мы надеемся, что журнал станет основой для консолидации знаний в области оптического приборостроения и развития технологий для прецизионных оптических информационно-измерительных и управляющих систем.

Объединяя знания учёных, инженеров и производителей, журнал будет способствовать внедрению разработок в серийные образцы и формированию единой научно-технической политики, обеспечит лидерство российской науки в создании прецизионных оптических систем нового поколения с применением искусственного интеллекта и цифровых технологий. В журнале будут публиковаться не только теоретические работы, но и практические рекомендации, чтобы сократить путь от научной идеи до разработки конкретных промышленных образцов. Журнал в публикуемых материалах призван реализовать девиз нашей научно-производственной корпорации – «От фантастики к серии!».

С уважением,

Генеральный директор АО «НПК «СПП»

Ю. А. Рой

О журнале!

Журнал «Прецизионные оптические информационно-измерительные и управляющие системы» создан приказом генерального директора АО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения» (АО «НПК «СПП») в соответствии с действующим законодательством Российской Федерации и уставом предприятия. Издателем журнала является АО «НПК «СПП». Сокращенное официальное наименование журнала «ПОИИУС».

Основная миссия журнала – открытая публикация статей высокого качества и научного значения в целях поддержания научно-исследовательской, практической и экспериментальной деятельности учёных; повышение научного престижа АО «НПК «СПП»; внедрение передовых достижений науки в практику работы научно-производственных организаций; содействие молодым учёным в продвижении их научных результатов.

Первостепенными задачами журнала являются: внесение существенного вклада в развитие отечественной науки в области прецизионных оптических информационно-измерительных и управляющих систем, активизация деятельности научных кадров, выявление научного потенциала для внедрения передовых достижений науки в производство, формирование открытой научной полемики по обсуждаемым вопросам.

Основа политики журнала актуальность и научная новизна публикуемых материалов, дискуссионность, открытость издания для авторов и читателей, продвижение работ молодых специалистов и аспирантов.

В журнале будут освещаться темы по научным специальностям ВАК: оптические и оптико-электронные приборы и комплексы; информационно-измерительные и управляющие системы; системный анализ, управление и обработка информации; радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения; приборы навигации, радиолокация и радионавигация; динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов.

Для публикации принимаются научные статьи, обзоры, рецензии, отзывы, а также материалы научных конференций, соответствующие научным специальностям журнала.

С уважением,

Главный редактор

Ю. Г. Сухой

УДК 629.78+621.378.32+528.2

ПЕРСПЕКТИВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СЕТЕЙ КВАНТОВО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ*Юрий Арсентьевич Рой – канд. техн. наук**Константин Евгеньевич Токарев**Альберт Толевжанович Тунгушпаев –**д-р техн. наук**Дарья Михайловна Кутузова**АО «НПК «СПП», info@npk-spp.ru*

В статье проанализированы основные направления и перспективы развития сетей зарубежных и отечественных квантово-оптических средств. Рассмотрены вопросы создания малогабаритных лазерных измерительных систем. Сформулированы требования по совершенствованию квантово-оптических информационно-измерительных и управляющих систем с учётом специфики орбит космических аппаратов.

Ключевые слова: квантово-оптическая система, космический аппарат, лазерная станция, оптические измерения, сеть лазерного слежения.

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES IN OPTICAL INFORMATION MEASUREMENT AND CONTROL SYSTEMS*Yury A. Roy – Cand. Sc. (Technology)**Konstantin E. Tokarev**Albert T. Tungushpaev – Dr. Sc. (Technology)**Darya M. Kutuzova**JSC «RPC «PSI», info@npk-spp.ru*

The article analyzes the main directions and prospects for the development of networks of foreign and domestic quantum-optical tools. The issues of creating small-sized laser measurement systems are considered. Requirements for improving quantum-optical information, measurement, and control systems are formulated, taking into account the specifics of spacecraft orbits.

Key words: quantum-optical system, satellite, laser station, optical measurements, laser tracking network

Для определения орбит космических аппаратов (КА) используются, в основном, запросные и беззапросные радиотехнические измерения дальности до КА, а также угловые измерения в системе координат радиотехнических

запросных станций. Особенности и преимуществами этих измерений является их независимость от погодных условий и возможность непрерывного использования. Вместе с тем, в последнее время стала развиваться лазерная спутниковая дальнометрия на основе применения квантово-оптических систем (КОС), которая позволяет получить более высокую точность измерения расстояний до КА. К недостаткам лазерной дальнометрии относятся её неприменимость при большой облачности и сложность проведения измерений в дневных условиях при засветке приемной оптики Солнцем, а также ночью и в сумерках – Луной. Высокая стоимость изготовления квантово-оптических средств и необходимость использования достаточно точной плоскости горизонта для наведения лазера также относятся к препятствиям при развёртывании сетей КОС [1,2]. Вместе с тем эти недостатки компенсируются высокой точностью лазерных измерений, что позволяет использовать их при решении высокоточных задач космической геодезии, контроле точности определения орбит КА по радиотехническим измерениям, синхронизации бортовых и наземных шкал времени. Основным проблемным вопросом в настоящее время является невозможность использования полноценной сети КОС для определения орбит КА ввиду их недостаточного количества. Российская сеть КОС состоит из станций различной ведомственной принадлежности [1,3]: 5 КОС принадлежат Госкорпорации «Роскосмос», 4 КОС входят в систему «Росстандарта», 9 КОС принадлежат Министерству обороны РФ и обеспечивают, главным образом, контроль эфемерид навигационных КА системы ГЛОНАСС, 8 станций входит в состав космической геодезической сети, 5 станций принадлежат институту прикладной астрономии Российской академии наук. Ввиду разнородности и ведомственных особенностей решаемых задач отечественные КОС не объединены в единую сеть и не все входят в Международную службу лазерной дальнометрии (International Laser Ranging Service (ILRS)).

Ввиду невысокой стоимости и распространения беззапросных измерительных станций (БИС) радиодиапазона в настоящее время наиболее широкое распространение получил метод определения орбитальных параметров навигационных КА по измерениям БИС их наземного контура управления (НКУ). По низкоорбитальным КА измерения проводятся командно-измерительными станциями и аппаратурой спутниковой навигации. Международная служба глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) (International GNSS Service (IGS)) в настоящее время использует несколько сотен постоянно действующих базовых станций геодезического класса, измерения которых практически равномерно могут покрывать орбиты навигационных спутников и доступны для потребителей, однако операторы глобальных и региональных навигационных систем, включая низкоорбитальные системы, обычно используют средства, входящие в свой НКУ. Использование высокоточных фазовых измерений, низкая стоимость БИС и радиотехнической аппаратуры спутниковой навигации (АСН), возможность их непрерывной круглосуточной эксплуатации и расположение БИС по всему земному шару дают определенное преимущество беззапросных измерительных средств перед квантово-оптическими системами. Это позволяет высокоточным сервисам, например, Российской системе высокоточного определения эфемеридно-временной информации (СВО ЭВИ) [4], за счёт более равномерного покрытия орбит и исключения систематических ошибок измерений БИС получать прецизионные орбиты навигационных КА. Использование измерений Международной службы лазерной дальнометрии ограничивается тем, что она включает в себя на порядок меньшее количество станций, чем БИС международной сети и функциональных дополнений навигационных спутниковых систем, причём эти станции неравномерно распределены по территории Земного шара. Особенно, мало лазерных станций расположено в южном полушарии Земли. Наибольшее количество станций размещено в Европе. Существующая сеть ILRS включает 42 действующие (эксплуатируемые) в настоящее время станции [5], из них в северном полушарии – 33 станции, в южном полушарии – 9 станций. Станция име-

ет статус «эксплуатируемая», если она соответствует требованиям к точности, объёму и передаче измерительных данных, а также требованиям по использованию общепринятых систем координат. Тем станциям, которые не соответствуют указанным требованиям, присваивается статус «ассоциированных» [5]. ILRS координирует деятельность международной сети станций спутниковой лазерной дальнометрии (SLR) и Лунной лазерной дальнометрии (LLR). Для удобства проведения измерений и взаимодействия станций сети она разделена на подсети по регионам: Европейская сеть лазерного слежения (EUROLAS), Западно-Тихоокеанская сеть лазерного слежения (WPLTN), сеть НАСА. Лунная лазерная дальнометрия (LLR) проводится в настоящее время четырьмя станциями. Из них две находятся в Европе и две в Северной Америке. В международную сеть ILRS входят 11 российских станций (8 на территории России, 1 в Бразилии, 1 в Казахстане и 1 в Южной Африке). Станции, входящие в ILRS, должны соответствовать определённым требованиям к форматам и процедурам предоставления данных, а также к качеству (точности) измерительных данных. В связи с малым количеством квантово-оптических (лазерных) станций на одном пункте с ними часто располагают радиотехнические средства для их юстировки с помощью лазерных станций. Дополнительно это бывает связано с космическими или научно-исследовательскими национальными и международными программами. Кроме неравномерности распределения сети станций ILRS по Земному шару дополнительным ограничением их сетевого применения является отличие в их производительности и стабильности [5], в результате чего обработка измерений сети станций приводит к ошибкам, например, при определении опорных точек Международной земной системы отсчёта (ITRF) [6]. Так как лазерные станции имеют длительное время изготовления и вводились в разные годы, они имеют различия в техническом и технологическом оснащении (тип и функциональность лазера, конструкция телескопа, тип опорно-поворотного устройства, способ определения времени и фиксации импульсов, тип фотоприёмного устройства), что приводит к разным возможностям их использования в целевых проектах. В послед-

нее время лазерные станции приспособляют для работы в светлое время суток за счёт использования точных систем наведения на КА и спектральной фильтрации помех. Так метод обеспечения проведения измерений дальности до КА в дневное время был реализован в России для КОС типа «Сажень-ТМ», такая станция была введена в эксплуатацию в июне 2014 года в г. Бразилиа (Бразилия). Кроме этого, совершенствуются применяемые в ILRS стандарты частоты, регистраторы времени излучения и приёма импульсов, а также фотодетекторы. Одной из наиболее современных российских лазерных станций является лазерная станция «Точка» [7], показанная на рисунке 1.



Рисунок 1 - Лазерная станция «Точка»

Лазерная станция «Точка» является всепогодным круглосуточным автоматизированным измерительным комплексом, разработанным для дальнейшего повышения точности и надежности эфемеридно-временного обеспечения КА геодезии и навигации. Она применяется для высот полёта КА до 25000 км. Погрешность лазерных измерений двусторонней дальности для этой станции составляет около 1 мм, псевдодальности – 6 мм [7]. При измерении псевдодальности используются бортовые фотоприёмники. Лазерная станция «Точка» включает также радиочастотную беззапросную измерительную систему (БИС). Погрешность радиочастотной псевдодальности для БИС составляет 1 см при проведении фазовых измерений и 12 см при проведении кодовых измерений. Необходимо отметить, что до 2000-х годов станции ILRS оснащались Nd:YAG-лазерами с главной длиной световой

волны 1064 нм. Применялась схема повышения частоты до второй гармоники с целью получения длины волны 532 нм, соответствующей зелёному спектру излучения, который находится в середине видимого спектра волн, пропускаемых атмосферой Земли. Использовались, главным образом, лазеры с энергией в импульсе 30-100 мДж и продолжительностью импульсов 50-300 пс, которые излучались с частотой 5-10 Гц. В качестве детекторов использовались детекторы с компенсированным однофотонным лавинным диодом C-SPAD и детекторы с микроканальным пластинчатым фотоумножителем MCP-PMT, а в качестве измерителей временных интервалов использовались таймеры Stanford SR620 и Hewlett-Packard 5370B [8], суммарный вклад которых в ошибки измерений доходил до 100 пс (около 3 см). Вместе с тем, для повышения точности измерений целесообразно повышать частоту следования импульсов и уменьшать их длительность, что и было реализовано в более современных станциях ILRS. С применением более точных таймеров событий Thales/Dassault и EventTech A033-ET, имеющих ошибки около 5 пс, удалось повысить точность измерения дальности до 1-3 мм. Кроме этого, в последнее время стали использоваться более современные стандарты частоты и времени, использующие водородные мазеры. В целях обеспечения безопасности для летательных аппаратов (самолётов) энергия в импульсе для 50-300 пс импульсного лазера, применяемого в ILRS, в современных станциях была понижена до 0.25-0.5 мДж при частоте импульсов 1-2 кГц. Так, в 2004 году на лазерной станции Австрийской академии наук в городе Грац был установлен твердотельный лазер с высокой добротностью и диодной накачкой с энергией в импульсе 0.4 мДж, длительностью импульса 10 пс и частотой повторения импульсов 2 кГц [9]. С 2008 по 2011 год уже шесть станций ILRS перешли на частоту излучения импульсов 2 кГц. Сверхкороткие лазерные импульсы и высокая частота их повторения позволяют существенно уменьшить ошибки измерения дальности за счёт повышения частоты их регистрации высокоточными таймерами. Это также позволяет фиксировать больше отражённых импульсов при вращении или изменении ориентации КА. Следует отметить, что

для маломощных лазеров 0.25-0.5 мДж на КА требуется установка светоотражателей или ретрорефлекторных систем из них. Для фиксации диффузного рассеяния от космических объектов, что необходимо при отслеживании космического мусора, необходимы более мощные лазеры с энергией в импульсе 25-100 мДж. Ввиду этого ряд станций ILRS имеют в своём составе, как маломощные, так и более мощные лазеры. Мощные лазеры позволяют проводить уточнение орбит объектов космического мусора. Обычные лазерные станции SLR используют мощность лазера около 1 Вт для высокоточной лазерной локации КА, оснащённых светоотражателями (энергия в импульсе 0.25-0.5 мДж при частоте импульсов 1-2 кГц). Обычно при отслеживании космического мусора лазеры с мощностью 25-100 Вт имеют более низкую частоту излучения импульсов (100-200 Гц) и длительность импульсов около 10 нс. В настоящее время NASA создаёт новую систему лазерной локации геодезических КА (Space Geodesy Satellite Laser Ranging (SGSLR)), предназначенную для замены существующей сети станций NASA и для установки лазерных станций в новых местах по всему земному шару [10]. Станции SGSLR смогут проводить измерения в ночное и дневное время по КА на высотах от 300 км до 36000 км, оснащённых ретрорефлекторными панелями. Апертура телескопической системы таких станций составляет 50 см. В качестве лазерного передатчика используется Nd:YAG-лазер с частотой передачи импульсов 2 кГц и длительностью импульса 50 пс. Температурный диапазон работы станций составляет от -40°C до +50° C. На большинстве станций применяется лазер RGL-532, разработанный компанией «Photonics Industries», который имеет длительность импульса 50 пс, энергию в импульсе 2,5 мДж при длине волны 532 нм. Частота следования импульсов доходит до 4 кГц при номинальной частоте 2 кГц. Для предотвращения влияния передаваемых лазерных импульсов на отражённые от КА сигналы используется чередование частоты от 1.9 кГц до 2 кГц. Любая новая станция сети ILRS, кроме точного контроля орбит, предназначена для улучшения геодезических параметров системы ITRF, ввиду чего предпочтительным является равномерное распределение

станций по земному шару, включая Антарктиду. Для уточнения влияния на формирование параметров системы ITRF станции SLR должны использоваться совместно с другими геодезическими и навигационными системами, например, GNSS и DORIS. Однако вклад станций ILRS постоянно возрастает за счёт повышения точности измерений в результате модернизации оборудования и широкого внедрения передовых технологий. В идеале лазерная станция должна быть надёжно закреплена на устойчивом основании, желательно на скальной породе, чтобы точность её измерений ограничивалась только доступными технологиями и точностью калибровки. При этом станции ILRS должны располагаться вдали от крупных разломов и зон локальных искажений. Станции, расположенные в местах, которые позволяют отслеживать движение КА над океанами, позволяют наряду с альтиметрами, гравиметрами и другими приборами уточнять параметры Земли. Для обеспечения точности работы станций необходим мониторинг устойчивости основания станций в целях контроля проседаний грунта и его локальных смещений. Для мониторинга устойчивости требуется точная привязка к наземным геодезическим сетям, участкам местности и региональным территориям. Вместе с тем, отдельные станции лазерной локации были спроектированы как мобильные, чтобы они могли обслуживать несколько территорий и участвовать в региональных проектах. Однако наибольшая точность была достигнута постоянно действующими на определённом месте станциями в связи с тем, что ранее существовавшие технологии не позволяли обеспечить достаточную точность мобильных станций и оперативно получать от них измерительную информацию. Вместе с тем, следует отметить, что они необходимы для точного определения орбит КА, особенно низких, за счёт создания широкой сети таких станций. Так французская переносная станция лазерной локации [11] перемещалась, для поддержки океанографической миссии Jason-2 и эксперимента по передаче времени T2L2. Известна транспортабельная ММОС «Сажень-ТМ» (Россия) [12], которая может перевозиться в фургоне и устанавливаться на подготовленной позиции, а также корейская станция ARGO-M [13], показанная на рисунке 2.

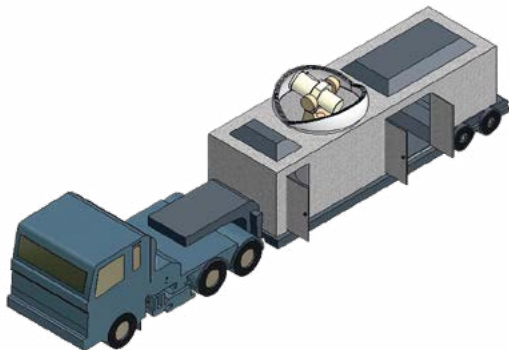


Рисунок 2 - Корейская станция ARGO-M

Новая корейская станция ARGO-M является транспортабельной [14], она была перевезена из Даэдока на основную станцию городе Седжон в 2015 году. ARGO-M имеет Nd:YAG-лазер с излучением на длине волны 532 нм. Максимальная энергия в импульсе составляет 2.5 мДж, длительность импульса составляет 50 пс, частота излучения импульсов – 2 кГц. Станция ARGO-M оснащена оптической системой с приёмным телескопом 40 см передающим телескопом 10 см. Она предназначена для лазерной дальнометрии по КА на высотах от 300 до 25 000 км как в дневное, так и в ночное время. ARGO-M также предоставляет высокоточные данные о дальности, которые необходимы для разработки и совершенствования системы ITRF. Китайская транспортируемая станция TROS1000 [15] размещена в прицепе размером 15 x 2,5 м. Она была перемещена из провинции Хубэй в провинцию Шаньдун для установки на сейсмографической станции Жунчэн. Станция TROS1000 показана на рисунке 3 [7,15].



Рисунок 3 - Китайская транспортируемая станция TROS1000

Транспортабельная система лазерной локации космического мусора под названием STAR-C

была разработана в Немецком аэрокосмическом центре в Штутгарте [16] и предназначена для определения дальности до космического мусора на низких околоземных орбитах. Она вместе с оборудованием и рабочими местами размещена в 20-футовом контейнере, который может работать автономно с помощью генератора мощностью 14 кВт. Система лазерной дальнометрии поднимается над крышей контейнера с помощью подъёмного механизма в течение 1 минуты. В качестве источника лазерных импульсов используется система с Nd:YAG-лазером с длиной волны 1064 нм. При частоте повторения импульсов около 100 Гц энергия импульса этого лазера составляет около 100 мДж. Длительность импульса – менее 10 нс. Вместе с тем, получили развитие и более малогабаритные перебазированные лазерные станции, например, Французская переносная лазерная станция (FTLRS) [11] и малогабаритная лазерная станция miniSLR немецкого аэрокосмического центра (DLR) [17]. Станция FTLRS оснащена Nd:YAG-лазером с энергией в импульсе 100 мДж, массой около 80 кг. Длительность импульса составляет 100 пс на длине волны 1064 нм, частота излучения – 10 Гц. Измерение дальности до КА, оснащённых ретрорефлекторами, осуществляется до высоты 6000 км с использованием телескопической системы диаметром 13 см, установленной на моторизованном штативе. Она передислоцируется в 8 контейнерах общей массой 300 кг. Компактная система спутниковой лазерной станции miniSLR имеет апертуру телескопической системы 20 см. В miniSLR используется лазер с энергией в импульсе 0.2 мДж, длительностью импульса около 400 пс и частотой излучения импульсов 30 кГц. Вся установка заключена в алюминиевую коробку размером 1.8 м × 1.2 м × 1.6 м и весит, примерно, 200 кг, не включая дополнительное оборудование. Затраты, связанные с созданием малогабаритных переносных лазерных станций, можно сократить путём их полной автоматизации, использования новых малогабаритных недорогих лазеров, телескопов и фотоприёмных устройств. Использование достаточно большого количества лазерных станций определённой архитектуры с требуемым покрытием орбит КА позволило бы получить прецизионные орбиты не только КА на средних орбитах,

но и на низких орбитах. Вопрос применения КОС для прецизионного определения низких орбит больших и малых КА в настоящее время не до конца исследован [18]. Необходимо отметить, что недостаточно точно моделируемые ускорения, связанные со световым давлением и влиянием атмосферы, затрудняют определение и прогнозирование параметров орбиты низкоорбитальных КА на уровне точности измерений КОС даже при достаточно большом числе измерений [18,19]. На практике широкое распространение получил способ использования измерений КОС для оценки эфемеридной информации ГЛОНАСС и точности работы аппаратуры спутниковой навигации на низкоорбитальных КА, например, КА «Кондор-ФКА». Он заключается в анализе отклонений измерений КОС от орбит, определённых по радиоизмерениям. Статистическая обработка отклонений (невязок) измерений КОС от орбит, построенных по радиоизмерениям, позволяет проводить контроль и оценку применения различных моделей атмосферы и светового давления, используемых при навигационно-баллистическом обеспечении управления КА. Так, в целях обеспечения требований по точности привязки снимков оптико-электронной аппаратуры КА «Кондор-ФКА» привлекаются КОС АО «НПК «СПП», обеспечивающие сбор высокоточной измерительной информации от ретрорефлекторных систем «Пирамида», установленных на КА. Измерительная информация КОС применяется для проведения периодических калибровок аппаратуры спутниковой навигации. По результатам задействования КОС при лётных испытаниях КА «Кондор-ФКА» были разработаны предложения по технологическому циклу уточнения орбиты КА «Кондор-ФКА» и согласованию моделей движения КА, используемых в центре управления полётом КА и на пунктах эксплуатации КОС. Оптический канал может использоваться для сверки бортовых и наземных шкал времени низкоорбитальных КА путём применения технологии беззапросной квантово-оптической системы (БКОС), как это реализовано в системе ГЛОНАСС [7], где БКОС включает наземную беззапросную КОС (НБКОС) и бортовую беззапросную КОС (ББКОС). Однако, практическое использование данной технологии для низкоорбитальных КА затрудняется отсут-

ствием на их борту аппаратуры, аналогичной ББКОС, а режимы работы существующих НБКОС в части взаимодействия с низкоорбитальными КА требуют исследований. Для использования данной технологии при управлении КА на низких, средних и высоких орбитах КОС целесообразно объединять в сеть в целях синхронизации наземных шкал времени. Это возможно путём совершенствования КОС, уменьшения стоимости разработки и оптимизации территориального размещения КОС, а также создания изделий, аналогичных БКОС (ББКОС и НБКОС), но пригодных для работы с КА на различных орбитах. Системный анализ требований к построению сетей КОС, в том числе для определения орбит низкоорбитальных КА, показал, что в настоящее время требуется:

- существенное удешевление стоимости создания КОС для экономически обоснованного создания их сетей;
- уменьшение размеров и габаритов КОС для более лёгкого их перемещения, создание переносных КОС для своевременного изменения конфигурации сети при работе по различным орбитальным группировкам малых КА;
- применение ультракоротких импульсных лазеров (фемтосекундных и пикосекундных) и лазеров с регулируемой длиной волны;
- разработка лазеров на новых физических принципах, например, квантовых каскадных лазеров и лазеров на основе плазмы;
- снижение стоимости применяемых лазерных технологий;
- создание системы прецизионного сличения времени бортовых и наземных средств;
- создание универсальной КОС, совмещающей в себе функции измерений и работы с бортовыми устройствами синхронизирующими устройствами;
- соединение всех квантово-оптических средств сети высокоскоростными каналами связи;
- автоматизация работы малогабаритных переносных КОС и высокоскоростная передача их данных в центры обработки результатов измерений;
- разработка методик оптимального размещения КОС для различных типов орбит.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глотов В.Д., Карутин С.Н., Кожин А.Л., Митрикас В.В., А.А. Пафнутаев. О возможных направлениях использования квантово-оптических станций в программе ГЛОНАСС. // Труды Института прикладной астрономии РАН, - 2019. - Вып. 50, - С. 23-30.
2. Эбауэр К.В. Высокоточное определение динамических параметров Земли с использованием данных лазерной локации околоземных спутников. Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук. – М.: ФАНО. ФГБУН ИА РАН, 2015. – 145с.
3. Рой Ю.А., Садовников М.А., Шаргородский В.Д. Российская сеть лазерной дальнометрии – основа для дальнейшего повышения точности геодезического и эфемеридно-временного обеспечения ГЛОНАСС. Доклад на 6-м Международном симпозиуме «МЕТРОЛОГИЯ ВРЕМЕНИ И ПРОСТРАНСТВА» 17–19 сентября 2012 года. Издательство: Федеральное государственное унитарное предприятие “Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений” (Менделеево), - 2013. С. 284.
4. «Глобальная система высокоточного определения навигационной и эфемеридно-временной информации в реальном времени для гражданских потребителей (СВО ЭВИ): Интерфейсный контрольный документ». – М.: АО «НПК «СПП», - 2021.
5. International Laser Ranging Service A service of the International Association of Geodesy. <https://ilrs.gsfc.nasa.gov>.
6. Pavlis EC, Pearlman MR, Noll CE, Combrinck L, Bianco G (2017) Report of the international association of geodesy 2015–2017: International Laser Ranging Service (ILRS). <https://ilrs.gsfc.nasa.gov>.
7. Борисов Б.А., Донченко С.И., Жабин А.С., Мурашкин В.В., Пархоменко Н.Н., Рой Ю.А., Садовников М.А., Соколов А.Л., Титов Е.В., Шаргородский В.Д. О создании радиолазерных комплексов «Точка» для решения задач космической геодезии и навигации // Фотоника. - 2022. – Т.16. - № 5. - С. 370-391.
8. Matthew Wilkinson, Ulrich Schreiber, Ivan Procházka, Christopher Moore, John Degnan, Georg Kirchner, Zhang Zhongping, Peter Dunn, Victor Shargorodskiy, Mikhail Sadovnikov, Clément Courde, Hiroo Kunitomori. The next generation of satellite laser ranging systems // Journal of Geodesy. 2018. <https://doi.org/10.1007/s00190-018-1196-1>.
9. Kirchner G., Koidl F. Graz kHz SLR system: design, experiences and results. The 14th International Workshop on Laser Ranging. San Fernando Spain, June 7-11, 2004, pp. 501-505.
10. McGarry JF, Hoffman ED, Degnan JJ et al. NASA's satellite laser ranging systems for the 21st century. Journal of Geodesy. 2018. <https://doi.org/10.1007/s00190-018-1191-6>.
11. Nicolas J., Pierron F., Samain E. et al. Centimeter Accuracy for the French Transportable Laser Ranging Station (FTLRS) through Sub-System Controls // Surveys in Geophysics 22, 449-464 (2001). <https://doi.org/10.1023/A:1015612032752>
12. Шаргородский В. Д. Лазерная дальнометрия. Задачи. Современное состояние. Перспективы. Презентация. <https://docs.yandex.ru/docs/view?tm1770016966&tld=ru&lang=ru&name=Shargorodsky-laser-ranging-luas-2007.pdf>
13. H. Lim, M. Choi, E. Park, E. Choi, S. Bang, S. Yu, T. Kim, D. Kucharski, Y. Kim, D. Kim, K. Seong, N. Ka, C. Choi, J. Hwang. Technical Aspects and Progress of Korean SLR Systems. Korea Astronomy and Space Science Institute. <https://ilrs.gsfc.nasa.gov>.
14. Choi E-J, Bang S-C, Sung K-P et al (2015) Design and development of high-repetition-rate satellite lasers ranging system. Journal Astron Space Sci 32 (3): 209–219. <https://doi.org/10.5140/JASS.2015.32.3.209>
15. Tangyong G., Peiyuan W., Xin L. et al. Progress of the satellite laser ranging system TROS1000. Geodesy and Geodynamics 6 (1): 67–72. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2014.12.004>
16. Humbert L, Hasenohr T, Hampf D, Riede W (2017) Design and commissioning of a transportable laser ranging station STAR-C. In: Advanced Maui optical and space surveillance

technologies conference, Wailea, Hawaii.

17. Daniel Hampf, Paul Wagner, Ewan Schafer, Wolfgang Riede. Concept for a new minimal SLR system. German Aerospace Center, Stuttgart, Germany. https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1770128701&tld=ru&lang=en&name=Session8_Hampf_Paper.pdf.

18. Токарев К.Е. Анализ требований к построению сетей квантово-оптических систем для определения орбит малых космических аппаратов. К.Э. Циолковский: проблемы индустриализации космоса и рационального использования земных ресурсов. Материалы 60-х Научных чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского. Часть 1. Калуга: ИП Стрельцов И.А. (Изд-во «Эйдос»). 2025. ISBN 978-5-907928-67-1 (ч.1) Стр. 62-65.

19. Сухой Ю.Г., Мошин А.А. Моделирование движения низкоорбитального космического аппарата в атмосфере Земли в условиях неопределённости гелиогеофизических возмущений // Сборник тезисов докладов 59-х Научных чтений, посвящённых разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского. Часть 1. - Калуга, 2024 - С. 265-269.

УДК 629.78+520.8

КЛЮЧЕВЫЕ АСПЕКТЫ ПОСТРОЕНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ТЕХНОГЕННЫХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В ОКОЛОЗЕМНОМ КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Владимир Викторович Пасынков¹ – д-р техн. наук

Игорь Игоревич Олейников² – д-р техн. наук

Сергей Алексеевич Архипов¹ – канд. техн. наук

¹АО «НПК «СПП», info@nprk-spp.ru

²АО «ЦНИИмаш», oleynikovii@tsniimash.ru

В статье сформулированы ключевые аспекты построения космической системы мониторинга техногенных космических объектов (КС ТКО). КС ТКО предназначена для получения дополнительной целевой информации о ТКО, недоступной сети наземных оптико-электронных станций. Предложен состав КС ТКО, проведено сравнение ожидаемых тактико-технических характеристик КС ТКО для двух вариантов построения орбитальной группировки КА на основе кубсатов и малых космических аппаратов.

Ключевые слова: техногенный космический объект, космическая система мониторинга, бортовая оптико-электронная аппаратура, космический мусор, орбитальная группировка.

KEY ASPECTS OF CONSTRUCTING A SPACE SYSTEM FOR MONITORING MAN-MADE SPACE OBJECTS IN NEAR-EARTH SPACE

Vladimir V. Pasyunkov¹ – Dr. Sc. (Technology)

Igor I. Oleinikov² – Dr. Sc. (Technology)

Sergey A. Arkhipov¹ – Cand. Sc. (Technology)

¹JSC «RPC «PSI», info@nprk-spp.ru

²JSC «TsNIIMash», oleynikovii@tsniimash.ru

The article outlines the key aspects of building a space system for man-made space objects (SS MSO). SS MSO is designed to obtain additional targeted information about MSO that is inaccessible to a network of ground-based optoelectronic stations. The composition of the SS MSO is proposed, and the expected tactical and technical characteristics of the SS MSO are compared for two variants of constructing an orbital spacecraft grouping based on: 1) cubesats; 2) small spacecraft.

Key words: man-made space object, space system, spacecraft, on-board optical-electronic equipment.

На протяжении всей космической эры, начиная с 1957 г., число запусков космических аппаратов (КА) и, соответственно, степень засоренности околоземного космического пространства (ОКП) техногенными космическими объектами (ТКО), к которым относят действующие КА и космический мусор (прекратившие свое активное функционирование КА, различного рода материальные фрагменты космической деятельности, обломки КА), неуклонно и практически монотонно возрастают [1]. На сегодняшний день гарантированных методов защиты КА от столкновений с фрагментами космического мусора не существует. Наиболее эффективным остается подход, связанный с интеграцией аппаратно-программных, общесистемных, информационных, коммуникационных, измерительных и организационных средств и технологий в автоматизированную систему предупреждения опасных сближений (АСПОС ОКП) [2]. Аналогично зарубежным аналогам развитие действующей АСПОС ОКП должно предусматривать, наряду с развитием наземных радиолокационных и оптико-электронных средств мониторинга ОКП, создание оптико-электронных средств космического базирования [3,4]. Закономерными являются следующие вопросы: зачем создавать космическую систему мониторинга ТКО (КС ТКО) и каковы должны быть назначение и технические характеристики и КС ТКО. К общим достоинствам наземных средств контроля ТКО в околоземном космическом пространстве (ОКП) относятся их ремонтпригодность, отсутствие массогабаритных ограничений и практически неограниченные сроки эксплуатации. Наземные радиолокационные средства (РЛС) контроля ТКО в ОКП не имеют ограничений на сезонные и погодные условия и позволяют осуществлять мониторинг ТКО, имеющих размер до 4 см, на низких орбитах. Однако стоимость создания РЛС и дальнейшей эксплуатации весьма велика. Наземные оптико-электронные станции (НОЭС) обеспечивают мониторинг ТКО на средних и

высоких орбитах. Однако функциональные возможности НОЭС (длительность наблюдений, зона действия, погрешности координатных и некоординатных измерений) обусловлены состоянием атмосферы и могут существенно снижаться в зависимости от сезона наблюдений, метеорологических и астроклиматических условий в месте размещения НОЭС. Результативное функционирование НОЭС ограничено сумеречным и ночным временем и за сутки не превышает $5\div 8$ часов. Заметим также, что стоимость создания и эксплуатации крупногабаритных наземных телескопов с диаметром зрачка более 1.0 м приближается к стоимости РЛС. Космическая оптико-электронная аппаратура, предназначенная для мониторинга ТКО, размещается на борту КА, где отсутствует метеорологическая и сезонно-суточная зависимость наблюдений. Среднесуточное время результативного функционирования космических средств приближается к 24 часам. Космические средства обладают дополнительным преимуществом – отсутствием территориальных ограничений по месту размещения, в отличие от наземных средств, которые размещаются в основном на территории России. К недостаткам космических средств следует отнести ограничения по массогабаритным показателям и сроку функционирования, отсутствие возможности ремонта в процессе эксплуатации, высокую стоимость разработки, изготовления и запуска, сравнимую с затратами на радиолокационные средства. Оценка успешности применения средств мониторинга ТКО носит комплексный характер и содержит требования к точности координатных и некоординатных измерений; предельной проникающей способности; к полноте мониторинга ОКП; оперативности получения целевой информации по любому ТКО; производительности мониторинга. По отдельности ни космические, ни наземные средства не удовлетворяют этим комплексным требованиям. Отсюда следует необходимость их совместного использования с целью получения максимально возможного успешного системного результата. Важнейшим концептуальным аспектом построения КС ТКО является следующее утверждение о роли и месте КС ТКО в составе перспективной ГС мониторинга ОКП. На начальной стадии, с

учетом значительной стоимости современной космической техники, создание КС ТКО должно быть направлено на рациональное дополнение существующих и возможных ограничений сети НОЭС. КС ТКО должна играть роль «уникального помощника» наземных средств, обеспечивающего своевременное получение необходимой дополнительной целевой информации по ТКО [5]. В перспективе, с развитием и удешевлением космической техники и, как следствие, ростом возможностей и производительности КС ТКО, значимость места КС ТКО как специального инструмента должна возрастать. Согласно ГОСТ Р 53802-2010 [6], космическая система (КС) представляет совокупность одного или нескольких космических и специальных комплексов, предназначенных для решения целевых задач. Космический комплекс (КК) включает совокупность функционально взаимосвязанных орбитальных и наземных технических средств, обеспечивающих как самостоятельное решение целевых задач на основе использования космического пространства, так и в составе космической системы. Специальный комплекс (СПК) – это совокупность взаимосвязанных технических средств или аппаратуры приема и передачи информации с программным обеспечением, сооружений, предназначенных для приема специальной информации космических аппаратов, ее регистрации, обработки, хранения и представления потребителям. Приведенные определения раскрывают следующий важный ключевой аспект. КС ТКО должна строиться таким образом, чтобы обеспечить полноценное решение целевой задачи – мониторинг ОКП на протяжении всего жизненного цикла космической системы (создание, запуск КА, летные испытания, эксплуатация). При этом в составе КС ТКО четко выделяются два сегмента: космический комплекс (инструментальный) и специальный наземный комплекс (информационный). Требуемая структурная схема КС ТКО представлена на рисунке 1.

Отметим, что управляющим элементом всей КС ТКО логично назначить командный информационно-вычислительный комплекс (КИВК), исходя из целевой задачи. КИВК должен обеспечивать как внешнее взаимодействие КС ТКО, так и внутреннюю координацию

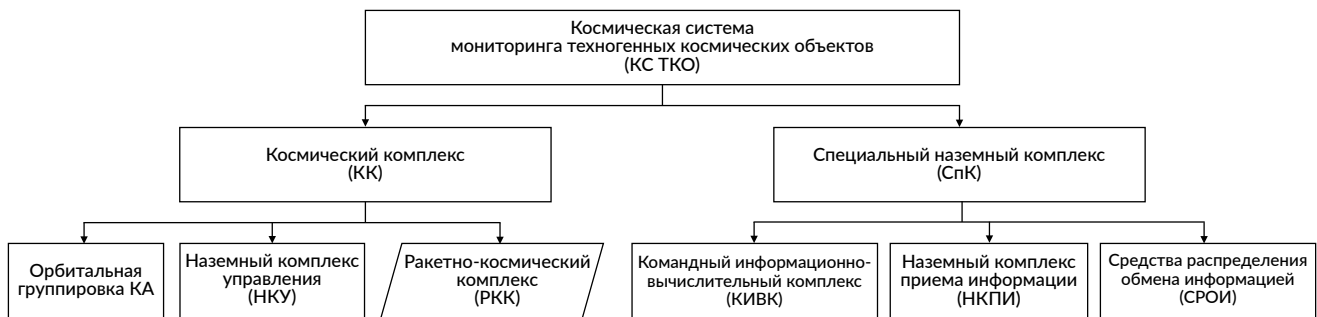


Рисунок 1 - Структурная схема КС ТКО

(планирование работы) всей КС ТКО. КС ТКО входит в глобальную систему (ГС), которая должна быть логическим развитием АСПОС ОКП. Внешние, взаимодействующие с КС ТКО составные части ГС:

- ЦПУ – центральный пункт управления, осуществляющий административное управление и мониторинг технического состояния всех составных частей ГС, в том числе и КС ТКО;
- ГИАЦ – главный информационно-аналитический центр, осуществляющий хранение, ведение и актуализацию каталога ТКО (ГИАЦ на основе заявок потребителей формирует задания, включающие в себя последовательность задач для исполнения КС ТКО);
- ССПД – система связи и передачи данных (ССПД обеспечивает связь и передачу данных между всеми составными частями ГС).

В перечне задач мониторинга ТКО в ОКП можно выделить следующие типы. Условное наименование типа задачи указано курсивом. «Каталог» – мониторинг ОКП по заданиям ГИАЦ с целью получения координатной и некоординатной целевой информации (ЦИ) о каталогизированных ТКО, расчет элементов их орбит, передача ЦИ в ГИАЦ для принятия решения об актуализации Каталога ТКО. «Барьер» – мониторинг заданной ГИАЦ области контроля ОКП (зона барьера) на длительных интервалах времени с целью получения ЦИ по всем ТКО, движущимся в зоне барьера, передача ЦИ в ГИАЦ для принятия решения о включении ГКО в каталог ТКО. «Обнаружение» – мониторинг заданной ГИАЦ области контроля ОКП с целью обнаружения отдельного некаталогизированного гипотетического космического объекта (ГКО).

Получение ЦИ по ГКО, расчет элементов орбиты ГКО, передача ЦИ в ГИАЦ для принятия решения о включении ГКО в каталог ТКО. «Стереосъемка» – синхронизированный мониторинг заданного ГИАЦ ТКО с использованием БОЭА, установленной на двух КА, расчет элементов орбиты, передача ЦИ в ГИАЦ для принятия решения об актуализации каталога ТКО. «Сопровождение» – мониторинг заданной ГИАЦ траектории ТКО на длительных интервалах времени с целью получения координатной ЦИ, передача ЦИ в ГИАЦ. «Изображение» – получение изображений заданного ГИАЦ отдельного ТКО, передача изображений в ГИАЦ. Анализ указанных типовых задач позволяет сформулировать [5-7] следующий комплексный ключевой аспект, касающийся требований назначения КС ТКО и состава аппаратуры бортовых оптико-электронных комплексов (ОЭК):

- а) КС ТКО предназначена для мониторинга ОКП с целью поиска и обнаружения ТКО, получения, предварительной обработки и передачи ЦИ в ГИАЦ;
- б) в состав бортовых ОЭК должны входить: бортовая оптико-электронная аппаратура (БОЭА), терминалы лазерной связи (ТЛС);
- в) ОЭК должны обеспечивать регистрацию ТКО с блеском до 18^m в зоне действия: по долготе от 0° до 360° , по наклонению от 0° до 180° , по высотам от 250 до 70 000 км;
- г) КА должен обеспечивать возможность оперативного перенацеливания поля зрения БОЭА;
- д) ОЭК в составе КА должен обеспечивать погрешность получения координатной информации с погрешностью $\sim 1''$.

Малыми космическим аппаратами (МКА)

принято считать КА, масса которых вместе с полезной нагрузкой находится в диапазоне от 100 до 1000 кг. К микро-КА (кубсатам) относят КА с массой от 10 до 100 кг. Очевидно, что относительная простота схемотехнических решений кубсатов и, как следствие, их меньшая стоимость позволят создать орбитальную группировку кубсатов численностью более чем на порядок превосходящую численность орбитальной группировки МКА. Соответственно, общее поле обзора и производительность группировки кубсатов превысят аналогичные характеристики группировки МКА. Однако массогабаритные ограничения кубсатов в сравнении с МКА снижают две важнейшие технических характеристики. D – диаметр входного зрачка объектива БОЭА: 80÷130 мм – кубсат; 200÷600 мм – МКА; $\Delta_{\text{укА}}$ – погрешность стабилизации вектора угловой скорости КА: 0,01°/с – кубсат; 0,0005 °/с – МКА. Прочие основные технических характеристики БОЭА для кубсата и БОЭА для МКА, к которым относятся: угловое поле зрения, рабочий спектральный диапазон, размер пиксела, шумы и другие характеристики приемника изображения, могут быть примерно одинаковыми. Согласно закона Погсона диаметр входного зрачка D определяет проникающую способность m БОЭА. Для зрачка $D = 130$ мм в сравнении со зрачком $D=600$ мм проникающая способность снижается на 3.3^m , что приводит к уменьшению предельного расстояния обнаружения ТКО в 4.6 раза. Следствием этого является уменьшение в 20 раз объема пространства, в котором осуществляется мониторинг ТКО. Устранение этого недостатка возможно лишь за счет увеличения численности кубсатов, соответственно, в 20 раз. Снижение проникающей способности БОЭА кубсата влечет за собой второй недостаток кубсата – отсутствие возможности обнаружения ТКО с предельно малыми размерами, которые

регистрируются БОЭА МКА при прочих одинаковых условиях. В таблице 1 представлена зависимость порицающей проникающей способности БОЭА для различных значений проекции вектора угловой скорости $\omega_{\text{ТКО}}$ линии визирования направленной на ТКО, рассчитанная для отношения сигнал/шум 4 и времени экспонирования кадра 0,2 с.

Используя модель эталонной ламбертовской сферы можно оценить отношение минимальных размеров $d_{\text{мин1}}$ и $d_{\text{мин2}}$ обнаруживаемых ТКО в зависимости от изменения проникающей способности БОЭА по следующей формуле.

$$\frac{d_{\text{мин1}}}{d_{\text{мин2}}} = 10^{\frac{m_2 - m_1}{5}} \quad (1)$$

С частности из таблицы 1 и формулы (1) следует, что минимальный размер эталонной ламбертовской сферы, обнаруживаемый БОЭА кубсата, в 8.3 раза превосходит минимальной размер, обнаруживаемый БОЭА с $D=600$ мм. Относительно большая погрешность $\Delta_{\text{укА}}$ обуславливает третий недостаток кубсата в сравнении с МКА. Требуемая погрешность угловых измерений $\sim 1''$ не достигается в задачах сопровождения ТКО, для которых необходимы относительно высокие угловые скорости перемещения КА и, соответственно, достоверное определение следов опорных звезд затруднено. Разберем этот тезис подробнее. Сначала рассмотрим качественный характер изображения ТКО в суммарном кадре. Положим, что вектор угловой скорости $\omega_{\text{ТКО}}$ линии визирования, направленной на ТКО, частично компенсируется вектором угловой скорости КА $\omega_{\text{КА}}$ так, что все следы ТКО полученной серии кадров находятся в пределах кадров. В идеале, когда погрешность вектора $\omega_{\text{КА}}$ отсутствует, а векторы $\omega_{\text{КА}}$ и $\omega_{\text{ТКО}}$ неизменные и коллинеарные, зарегистрированные следы ТКО образуют на суммарном кадре прямую, составленную из штрихов, что иллюстрирует рисунок 2а. Направление этой

Таблица 1 – Зависимость m от $\omega_{\text{ТКО}}$.

$\omega_{\text{ТКО}}$ °/с.	0	0,05	0,06	0,07	0,1	0,2	0,3	0,5	1,0
$m(D=130 \text{ мм})$	13,50	10,29	10,20	10,03	9,65	8,89	8,45	7,90	7,15
$m(D=200 \text{ мм})$	14,85	13,83	13,74	13,57	13,18	12,43	11,99	11,44	10,68
$m(D=600 \text{ мм})$	17,30	14,89	14,80	14,63	14,24	13,49	13,05	12,50	11,74

прямой совпадает с направлением движения изображения ТКО в кадре. Если погрешность вектора $\omega_{КА}$ не равна нулю, то в общем случае зарегистрированные следы ТКО могут представлять собой некоторую кривую, направление которой не совпадает с идеальным случаем, что иллюстрирует рисунок 2б. Причинами такого сложного характера следов ТКО могут быть: нестабильность пространственной ориентации и модуля вектора $\omega_{КА}$, наличие переменного вектора углового ускорения КА.



а) Идеальный случай б) Общий случай

Рисунок 2 - Качественный характер изображения ТКО в кадре

Количественно оценим неопределенность угловых измерений с борта кубсата. Используем для этого рисунок 3, на котором изображены: ω – проекция на плоскость кадра вектора угловой скорости ω линии визирования, направленной на ТКО, в случае, если плоскость кадра не разворачивается в инерциальном пространстве;

$\omega_{КА}$ – проекция вектора ω на плоскость кадра;
 $\omega_{ТКО}$ – проекция разности векторов $\omega - \omega_{КА}$ на плоскость кадра численно равна проекции угловой скорости линии визирования, направленной на ТКО, в случае поворота КА с угловой скоростью $\omega_{КА}$.

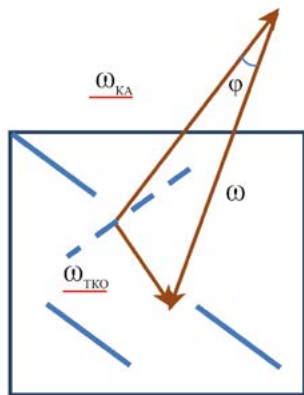


Рисунок 3 - Проекция векторов угловых скоростей на плоскость кадра и условные изображения следов изображений ТКО и звезд

Проекция ω и $\omega_{КА}$ преднамеренно изображены

пересекающими границы кадра, чтобы показать, что следы изображения ТКО остаются в пределах суммарного кадра, а следы изображений звезд пересекают границы кадра. Положим, что все векторы постоянны. Примем, что ω и $\omega_{КА}$ находятся в диапазоне $2.0 \div 3.0^\circ/\text{с}$, известна погрешность $\Delta\omega_{КА} = 0.01^\circ/\text{с}$. Положим также, что на кадре проявляются следы изображений звезд, которые на рисунке 3 изображены сплошными отрезками, перпендикулярными $\omega_{КА}$. На каждом кадре также проявятся следы изображения ТКО, которые на рисунке 3 изображены штрихами. Штриховая линия на суммарном кадре, перпендикулярна к $\omega_{ТКО}$. По результатам обработки серии кадров находится величина и направление $\omega_{ТКО}$. Зная направление движения изображений звезд, определяем перпендикулярное направление $\omega_{КА}$ и откладываем по нему известную величину $\omega_{КА}$. Из полученного треугольника по двум сторонам $\omega_{КА}$ и $\omega_{ТКО}$ и углу между ними определяем третью сторону ω , а также угол ϕ между $\omega_{КА}$ и ω . Для оценки примем, что половина углового поля БОЭА $\beta = 1^\circ$, число кадров в серии $N \sim 10 \div 20$, интервал между кадрами $T_{\text{и}} \sim 1$ с. Тогда

$$\omega_{ТКО} \leq \frac{\beta}{N T_{\text{и}}} = 0.05 \div 0.1^\circ/\text{с}$$

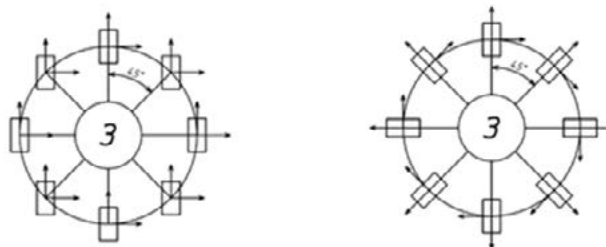
И соотношения $\omega_{КА}$ и $\omega_{ТКО}$ следует, что угол $\phi \sim 2 \div 3^\circ$ ω может быть найдена примерно с той же погрешностью $\sim 0.01^\circ/\text{с}$ что и $\omega_{КА}$. Пусть время экспонирования кадра $T_{\text{э}} \sim 10^{-4}$ с. Тогда неопределенность измерения углового положения ТКО относительно системы координат БОЭА составит ~ 14 угл.с. Для МКА при прочих одинаковых условиях погрешность $\Delta\omega_{КА} = 0.005^\circ/\text{с}$ (что в 20 раз лучше, относительно кубсата). Следовательно, неопределенность измерения углового положения ТКО относительно системы координат БОЭА составит ~ 0.7 угл.с, что обеспечивает выполнение заданного требования точности координатных измерений – не более 1 угл.с. Таким образом третий недостаток кубсата – ограничение его возможностей по сопровождению ТКО, расположенных в момент съемки вблизи кубсата, с требуемой точностью координатных измерений. Орбитальные построения МКА определим следующими характеристиками: тип и параметры орбиты, на которой разме-

щены МКА; число МКА, задействованных в орбитальной группировке; ориентация МКА. При выборе орбиты рассматривались альтернативные варианты: солнечно-синхронные орбиты (ССО); отдельно выделена ССО терминатора (т.е. ССО, расположенная в плоскости, близкой к плоскости терминатора); низкие орбиты, близкие к плоскости экватора; высокие и средние орбиты. Выбрана ССО терминатора с учетом следующих аргументов:

- а) находящийся на этой орбите МКА постоянно освещен Солнцем, что дает преимущество по минимизации ресурсов системы электроснабжения;
- б) обеспечена круглосуточная возможность мониторинга всей полусферы ОКП, ориентированной от Солнца, при номинальном положении МКА;
- в) потенциальные возможности этой орбиты по мониторингу геосинхронных и геостационарных орбит превосходят возможности других орбит.

Диапазон высот орбиты – компромисс между ограничением высоты, обусловленным требованием реализации лазерной связи для восьми МКА и ограничением, обусловленным резким ростом ионизирующих излучений космического пространства с увеличением высоты орбиты. Из рассматриваемого диапазона орбит от 750 до 850 км выбрана ССО терминатора высотой 850 км с наклонением 98.469° . Число МКА определяется из условия обеспечения непрерывной лазерной связи между МКА и должно быть минимальным. Принимаем высоту верхней границы атмосферы Земли ~ 200 км, по которой «скользит» луч лазерной связи, для орбиты высотой 850 км получаем, что число МКА должно быть не менее 8 штук. Сравним два варианта базовой ориентации МКА: постоянная ориентация одной из осей МКА на центр Земли (как принято при для КА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), далее – схема ДЗЗ); МКА в инерциальной системе координат (ИСК) совершает возвратно-поступательное движение, далее – схема ИСК. Иллюстрация различий вариантов базовой ориентации МКА представлена на рисунке 4. МКА условно изображены прямоугольниками. Центр Земли обозначен буквой З. Выбирается

непрерывное поддержание лазерной связи между МКА. Зоны взаимной видимости терминалов лазерной связи не прерываются даже при повороте МКА вокруг оси, касательной орбите, на угол до $\pm 90^\circ$ от номинального положения КА.



а) по схеме ИСК

б) по схеме ДЗЗ

Рисунок 4 – Базовая ориентация МКА

Сформулируем следующий ключевой аспект орбитального построения КС ТКО. Восемь МКА должны равномерно размещаться на круговой ССО терминатора высотой 850 км, наклонением 98.47° . В номинале МКА должны быть ориентированы на орбите по схеме ДЗЗ.

В работе [7] приведен пример, подтверждающий возможность создания МКА и бортовых ОЭК для КС ТКО, разработанных на основе научно-технического задела АО «Корпорация ВНИИЭМ» и АО «НПК «СПП», с использованием доступной элементной базы. На рисунках 5 и 6 представлен общий вид двух типов МКА.

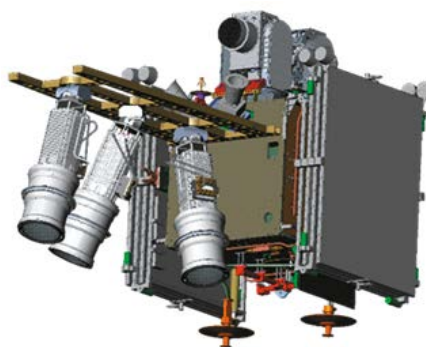


Рисунок 5 - Общий вид МКА, оснащенного ОЭК, в состав которого входят три БОЭА-200, устройство автономного перенацеливания и два ТЛС

Оптические оси ТЛС параллельны касательной к орбите. Перенацеливание полей зрения БОЭА-200 осуществляется за счет поворотов КА вокруг оси, касательной орбите, в диапазоне углов крена от -25° до $+90^\circ$, а также за счет

поворотов БОЭА-200 в устройстве автономного перенацеливания в диапазоне углов тангажа от -90° до $+90^\circ$.

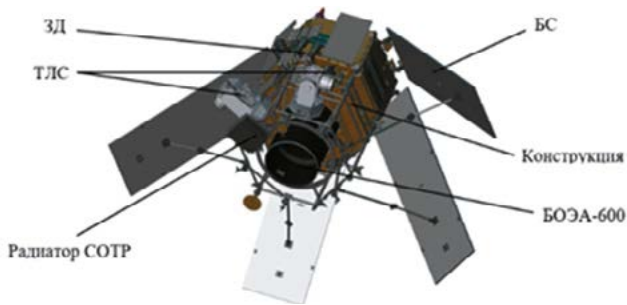


Рисунок 6 - Общий вид КА, оснащенного ОЭК, в состав которого входит БОЭА-600 и два ТЛС

На рисунке 6 введены следующие обозначения: ЗД – звездные датчики; БС – батареи солнечные; радиаторы СОТР – радиаторы системы терморегулирования.

Перенацеливание полей зрения БОЭА-600 осуществляется за счет поворотов МКА вокруг оси, касательной орбите, в диапазоне углов крена от -25° до $+90^\circ$. Оптические оси ТЛС параллельны касательной к орбите. При съемке БОЭА-200 и БОЭА-600 и среднеквадратичная погрешность поддержания заданной угловой скорости поворота МКА не более $0.0005^\circ/\text{с}$. Технические характеристики и схематические решения БОЭА-200 и БОЭА-600 приведены в работе [7]. В состав БОЭА входит блок вычислителя, реализующий астрометрическую коррекцию растровых кадров, при этом информационный поток от БОЭА сокращается ориентировочно на два порядка. Полученная ЦИ в виде массива номеров гипотетических космических объектов (ГКО) в кадре, их координат и размеров передается в ТЛС. Один из МКА находится в зоне приема наземного пункта приема информации и передает по высокоскоростной радиолнии ЦИ, полученную всеми БОЭА от всех МКА. Предложенные схемные решения КС ТКО в части лазерной связи и перенацеливания полей зрения БОЭА позволят достичь периодичности оперативной оценки элементов орбиты (ПООЭО) ТКО ориентировочно равной половине периода орбиты ТКО. Для ТКО на низких орбитах ПООЭО составит ~ 60 мин. Для высоких орбит ПООЭО составит ~ 12 час. Представленные результаты подтверждают следующий ключевой аспект создания КС ТКО. С учетом

научно-технического задела отечественных предприятий и организаций имеется возможность создания КС ТКО с требуемыми техническими характеристиками (по полноте контроля ОКП, точности координатной и некоординатной ЦИ, оперативности получения ЦИ, требуемой для расчета элементов орбиты любого заданного ТКО в пределах ОКП) на доступной элементной базе. КС ТКО предназначена для получения дополнительной уникальной целевой информации о ТКО, недоступной сети наземных оптико-электронных станций, с целью совместного повышения полноты, точности и оперативности мониторинга ТКО в ОКП. В состав КС ТО должны входить космический комплекс, включающий орбитальную группировку космических аппаратов (КА), наземный комплекс управления, ракетно-космический комплекс, и наземный специальный комплекс, предназначенный для получения и обработки целевой информации. Проведено сравнение ожидаемых тактико-технических характеристик КС ТКО для двух вариантов построения орбитальной группировки КА: 1) на базе малых КА; 2) на основе кубсатов. Преимуществом группировки МКА является возможность получения целевой информации в реальном масштабе времени, что достигается за счет введения в состав МКА терминалов лазерной связи. Предложен рациональный вариант орбитального построения восьми МКА на солнечно-синхронной орбите терминатора с ориентацией полей зрения бортовой оптико-электронной аппаратуры (БОЭА) по направлению от Солнца. БОЭА обеспечивает круглосуточный мониторинг ОКП с проникающей способностью до 18^m . КС ТКО может быть создана на основе имеющегося научно-технического задела отечественных предприятий и доступной элементной базы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вениаминов С.С., Червонов А.М. Космический мусор – угроза человечеству. М.: ИКИ РАН, 2012. 190 с.
2. Мониторинг техногенного засорения околоземного пространства и предупреждение об опасных ситуациях, создаваемых космическим мусором / под ред. Ю.Н. Макарова. Рязань: Изд-во РИНФО, 2015. 237 с.

3. SBSS. Bae systems: Global site. URL: <https://www.baesystems.com/en/product/sbss>
4. Escorial Olmos D., Aleman Roda F.E., Middleton K., Naudet J. Space-Based Space Surveillance Operational and Demonstration Missions. 2013. In: 16th European Conference on Space Debris. ESA. URL: https://conference.sdo.esoc.esa.int/proceedings/sdc6/paper/174/SDC6_paper174.pdf
5. Архипов С.А. Концептуальные аспекты построения космической системы мониторинга техногенных космических объектов в околоземном космическом пространстве // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Геоинформационные технологии и космический мониторинг. Выпуск 10. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2025, с. 45–53. DOI: 10.23885/2500-123X-2-10-45-53
6. ГОСТ Р 53802–2010. Системы и комплексы космические. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2019. 28 с.
7. Олейников И.И., Архипов С.А., Тунгушаев А.Т. Перспективная космическая система наблюдения космических объектов в околоземном космическом пространстве оптико-электронными средствами // Радиотехника. 2023. Т. 87. № 4. с. 16–20. DOI: 10.18127/j00338486-202303-03

УДК 681.518.3+004.896

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ОПТИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМАХ

Михаил Владимирович Гуйда¹ – канд. техн. наук

Владимир Францевич Боровский² – канд. техн. наук

Николай Владимирович Гуйда³

Юрий Георгиевич Сухой² – д-р техн. наук

Татьяна Викторовна Никольская²

¹АО «РКС», contact@spacecorp.ru

²АО «НПК «СПП», info@npk-spp.ru

³Госкорпорация «Роскосмос», info@roscosmos.ru

В статье проанализированы основные направления использования технологий искусственного интеллекта в оптических информационно-измерительных и управляющих системах. Исследованы вопросы применения искусственного интеллекта при анализе мест размещения телескопов, планировании проведения и обработки измерений, мониторинге неисправностей оптических информационно-измерительных и управляющих систем.

Ключевые слова: искусственный интеллект, оптические информационно-измерительные и управляющие системы, телескоп, оптические измерения

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES IN OPTICAL INFORMATION MEASUREMENT AND CONTROL SYSTEMS

Mikhail V. Guida¹ – Cand. Sc. (Technology)

Vladimir F. Borovsky² – Cand. Sc. (Technology)

Nikolai V. Guida³

Yury G. Sukhoy² – Dr. Sc. (Technology)

Tatiana V. Nikolskaya²

¹JSC «RSS», contact@spacecorp.ru

²JSC «RPC «PSI», info@npk-spp.ru

³State Space Corporation «Roscosmos», info@roscosmos.ru

The article analyzes the main directions of using artificial intelligence technologies in optical information-measuring and control systems. The issues of using artificial intelligence in the analysis of telescope locations, planning and processing measurements, and monitoring malfunctions

of optical information-measuring and control systems are investigated.

Key words: artificial intelligence, optical information-measuring and control systems, telescope, optical measurements

Технологии искусственного интеллекта (нейронных сетей) применяются во множестве областей науки и техники, помогая реализовать новые подходы к использованию уже созданных технически сложных объектов, например, таких, как оптические информационно измерительные и управляющие системы (ИИУС). Одной из перспективных задач использования нейронных сетей является обработка изображений, в том числе изображений космических объектов с использованием современных оптических ИИУС. В 2006 году появилась концепция глубокого обучения [1]. После 2010 года глубокое обучение продемонстрировало свои возможности, при этом глубокие нейронные сети оказались эффективными в таких областях, как обработка изображений, распознавание речи и обработка языковых форм. Более сложные модели глубокого обучения, такие как рекуррентные нейронные сети [2] и сверточные нейронные сети [3], получили дальнейшее развитие. Технологии искусственного интеллекта уже применялись в планировании наблюдений космического телескопа Хаббл (HST) [4] для диагностики неисправностей энергетических систем HST [5] и предварительной обработки данных для маркировки квазаров, звезд и галактик [6-8]. С развитием искусственного интеллекта его применение в оптических ИИУС расширилось, также охватив выбор лучших мест для станций, калибровку оптических систем телескопов и оптимизацию качества изображения. При рассмотрении возможностей использования технологий искусственного интеллекта в оптических ИИУС задачу можно разделить на две части: вопросы их создания и эксплуатации. При создании телескопа, важнейшим вопросом является выбор места его размещения. В процессе эксплуатации важными

вопросами являются планирование работы и обработка получаемых снимков. Выбор места размещения современной оптической ИИУС для получения снимков различных объектов космического пространства требует тщательного учета нескольких критически важных параметров наблюдения. К ним относятся количество ясных ночей, условия видимости в атмосфере, содержание водяного пара в атмосфере, яркость ночного неба, метеорологические параметры, искусственное световое загрязнение и рельеф местности. Наиболее важными из них являются атмосферные условия: количество ясных ночей в году, сухость воздуха, чистота и прозрачность атмосферы, ветровой режим. Целесообразно, чтобы количество ясных ночей в году было минимум 150-200. Для размещения телескопов обычно выбирают высокогорные пустыни (Чили, Гавайи) или Антарктиду, где воздух наименее насыщен водяным паром. Большую роль играет отсутствие пыли, аэрозолей, загрязнений. Постоянные сильные ветры могут мешать работе, в то же время умеренные ветра помогают выравнивать температуру купола телескопа с окружающей средой, снижая турбулентность. Важным параметром является высота телескопа над уровнем моря. Чем выше, тем тоньше и суше атмосфера, меньше поглощение и турбулентность. Большинство крупных телескопов стоят на высотах от 2000 до 5000 метров (Мауна-Кеа: 4200 м, Параналь: 2635 м, СПБГУ на Пике Терскол: 3100 м). Примерами хороших мест размещения являются: пустыня Атакама, Чили (VLT, ALMA, ELT), Гавайи,

Мауна-Кеа (Кеск, Subaru, TMT), Канарские острова, Испания (GTC), ЮАР, Сазерленд (SALT). Антарктида. В последние годы метеорологические спутники, технологии ГИС и предварительный анализ условий наблюдения с использованием всепогодных камер, охватывающие все небо, играют важную роль в оценке астрономических условий наблюдения на предполагаемых площадках для разворачивания телескопов [9]. С помощью технологий искусственного интеллекта можно быстро оценить статистические данные облачности. Традиционная идентификация облаков, основанная на правилах многодиапазонного порогового значения для классификации облачных зон, требует специального оборудования для обнаружения соответствующих диапазонов и может давать результаты низкой точности. Методы опорных векторов (SVM), анализа главных компонент (PCA) и байесовские методы позволяют классифицировать отдельные пиксели спутниковых изображений. Однако на эффективность этого метода влияет отсутствие пространственной информации. Для объединения информации об отдельных пикселях и пространственной информации может быть использован алгоритм сверточной нейронной сети (CNN), что позволяет добиться высокоточной идентификации облачности на спутниковых снимках [10]. Эта задача была решена [11,12] с использованием различных подходов: например, с использованием модели lightGBM или объединением сверточной нейронной сети и трансформера (рисунок 1).

Мониторинг и прогнозирование атмосферной

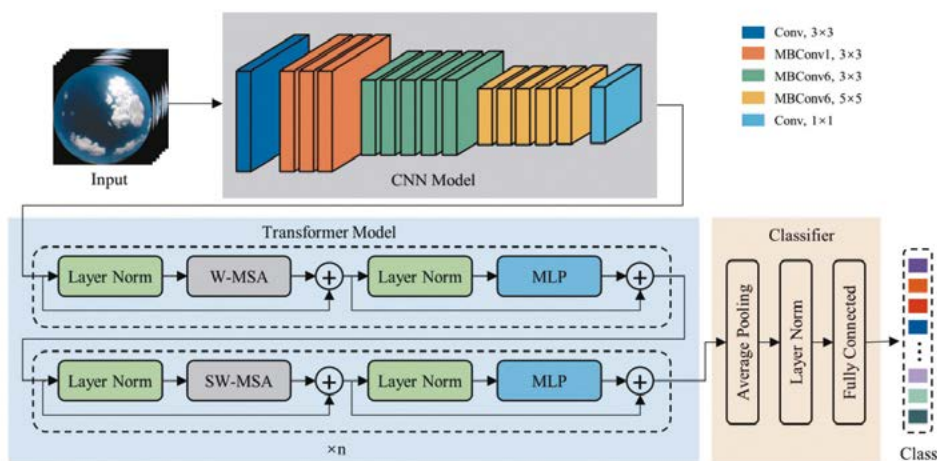


Рисунок 1 – Модель lightGBM и схема сверточной нейронной сети и трансформера [11, 12]

турбулентности также имеют важное значение для повышения эффективности наблюдений с помощью телескопов, так как турбулентность оказывает существенное влияние на качество изображений, получаемых оптическими телескопами. Методы искусственного интеллекта могут устанавливать взаимосвязи между атмосферными параметрами и астрономическими оптическими параметрами для данной станции. Современное состояние развития методов искусственного интеллекта позволяет оценивать состояние атмосферы при выборе места размещения оптической информационно-измерительной и управляющей системы. Важно использование искусственного интеллекта при планировании проведения измерений. Телескоп выполняет задачи наблюдения в соответствии с графиком наблюдений. Долгосрочный график подразумевает распределение времени наблюдений на несколько месяцев, выбор наиболее важных предложений по наблюдениям из множества предложений; затем наблюдения проводятся в соответствии с приоритетом каждого предложения, временем наблюдения, целями наблюдения и ограничениями самого телескопа. В то же время необходимо составлять краткосрочные планы и корректировать план наблюдений с учетом новых целей или переходных явлений. Планирование наблюдений требует расчета множества задач наблюдения для поиска наилучшего плана наблюдений. Ручное планирование недостаточно для долгосрочного планирования задач. Исследования в этой области ведутся с середины 1950-х годов, начиная от простых эвристик и заканчивая более сложными генетическими алгоритмами или нейронными сетями. Методы искусственного интеллекта широко используются в задачах планирования наблюдений. В работе [13] представлены традиционные методы планирования наблюдений, включая планирование очереди, планирование критического пути, оптимальное планирование и планирование распределения. В работе [14] всесторонне представлены методы планирования наблюдений, разработанные за последние 50 лет, в основном основанные на генетических алгоритмах, алгоритме оптимизации муравьиной колонии, многоцелевых эволюционных алгоритмах и других новых методах. В 1990-х годах космический телескоп

«Хаббл» использовал систему SPIKE на основе искусственной нейронной сети [15] для генерации планов наблюдений и расширил ее применение на телескопы VLT и Subaru. Эта нейронная сеть построена на основе дискретной нейронной сети Хопфеля [16] с добавлением защитной сети, предотвращающей попадание в локальные минимумы. Генетический алгоритм недоминированной сортировки (NSGA-II) использовался в проектах DSAN, RTS2 и EChO [17], а также при планировании работы 3.5-метрового телескопа Zeiss [18]. Он подходит для задач долгосрочного планирования и может использоваться в сочетании с методами, основанными на ограничениях. Экспоненциальный рост количества изображений, получаемых с телескопов, сделал необходимой автоматическую классификацию данных. В работе [19] использованы спектральные данные из третьего выпуска данных Слоуновского цифрового небесного обзора (Sloan Digital Sky Survey, SDSS) для обучения К-мерного дерева (KdTree), чтобы обеспечить надежную классификацию всех 143 миллионов неповторяющихся фотометрических объектов. В работе [20] применен SVM для автоматической классификации примерно 700 000 образцов галактик из SDSS Data Release 7. Подход к обнаружению и классификации изображений малоразмерных искусственных космических объектов на фоне звёздного неба на основе использования свёрточной нейронной сети типа YOLO рассмотрен в работе [21]. Исследованные версии свёрточных нейронных сетей показали высокую достоверность селекции объектов выбранных классов. Мониторинг неисправностей в реальном масштабе времени и диагностика неисправностей позволяют предотвратить потери времени наблюдений и обеспечить высокое качество изображений. Неисправности оборудования телескопов могут привести к значительным экономическим потерям. Традиционная диагностика неисправностей включает установку многочисленных датчиков для мониторинга параметров телескопа и установление пороговых значений на основе опыта эксплуатации. Когда эти параметры выходят за пороговые значения, система сигнализации выдает предупреждение определяет местоположение и вероятную причину неисправности. Применение техно-

логий искусственного интеллекта в диагностике неисправностей имеет долгую историю. С 1980-х годов системы диагностики неисправностей, основанные на экспертных знаниях, широко используются в таких областях, как аэрокосмическая промышленность, автомобильная диагностика неисправностей и информационно-управляющие системы. Например, в системе наведения и слежения космического телескопа «Хаббл» применялась система диагностики на основе знаний для диагностики неисправностей [22], а для диагностики неисправностей в энергетической системе того же телескопа использовалась экспертная система [23]. Система диагностики неисправностей, основанная на экспертных знаниях, обладает преимуществами сильной логики и интуитивно понятного представления знаний и до сих пор широко используется. В работе [24] использовано дерево знаний для реализации искусственного интеллекта в системе управления главной осью телескопа Antarctic Sky Survey Telescope AST3. В работе [25] рассмотрен метод быстрой локализации неисправностей в волоконном позиционере большого многоцелевого спектроскопа (Large Sky Area Multi-Object Fibre Spectroscopic Telescope, LAMOST) на основе рекуррентной нейронной сети LSTM (Long Short-Term Memory). Проблема диагностики неисправностей может рассматриваться как проблема классификации, в которой можно установить соответствие между измеряемыми датчиком значениями и неисправностями. В последние годы глубокое обучение способствовало развитию использования нейронных сетей для извлечения признаков неисправностей, неявных для оператора. Например, в работе [26] объединены самоорганизующаяся карта Кохонена (Self-Organizing Maps, SOM) и сверточная нейронная сеть (Convolutional Neural Network, CNN) для классификации форм изображений звезд на телескопических снимках, что позволило своевременно обнаруживать низкое качество изображений телескопа. в работе [27] использовали CNN для установления связи между определенным видом отказа и качеством изображения телескопа, что позволило провести первоначальную диагностику неисправности. В работе [28] предложена методология для мониторинга и диагностики

качества изображений астрономических телескопов в реальном времени, которая использует CNN и графы знаний. Нейронные сети также используются для прогнозирования неисправностей путем установления связи между параметрами до возникновения неисправности и вероятностью ее возникновения. Однако прогнозирование неисправностей в телескопах все еще находится на ранней стадии развития из-за недостатка обучающих данных, что связано с их небольшим количеством и уникальными техническими решениями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hinton, G.E.; Salakhutdinov, R.R. *Reducing the dimensionality of data with neural networks*. *Science* 2006, 313, 504–507.
2. Navada, A.; Ansari, A.N.; Patil, S.; Sonkamble, B.A. *Overview of use of decision tree algorithms in machine learning*. In *Proceedings of the 2011 IEEE Control and System Graduate Research Colloquium, Shah Alam, Malaysia, 27–28 June 2011*; pp. 37–42.
3. Van Der Maaten, L.; Postma, E.; Van den Herik, J. *Dimensionality reduction: A comparative*. *J. Mach. Learn. Res.* 2009, 10.
4. Johnston, M.D.; Adorf, H.M. *Scheduling with neural networks—The case of the Hubble Space Telescope*. *Comput. Oper. Res.* 1992, 19, 209–240.
5. Bykat, A. *NICBES-2, a nickel-cadmium battery expert system*. *Appl. Artif. Intell. Int. J.* 1990, 4, 133–141.
6. Li, L.; Zhang, Y.; Zhao, Y. *k-Nearest Neighbors for automated classification of celestial objects*. *Sci. China Ser. G Phys. Mech. Astron.* 2008, 51, 916–922.
7. Gao, D.; Zhang, Y.X.; Zhao, Y.H. *Support vector machines and kd-tree for separating quasars from large survey data bases*. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2008, 386, 1417–1425.
8. Owens, E.; Griffiths, R.; Ratnatunga, K. *Using oblique decision trees for the morphological classification of galaxies*. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 1996, 281, 153–157.
9. Aksaker, N.; Yerli, S.K.; Erdogan, M.; Kurt, Z.; Kaba, K.; Bayazit, M.; Yesilyaprak, C. *Global site*

- selection for astronomy. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2020, 493, 1204–1216
10. Francis, A.; Sidiropoulos, P.; Muller, J.P. CloudFCN: Accurate and robust cloud detection for satellite imagery with deep learning. *Remote Sens.* 2019, 11, 2312
11. Mommert, M. Cloud Identification from All-sky Camera Data with Machine Learning. *Astron. J.* 2020, 159, 178. [CrossRef]
12. Li, X.; Qiu, B.; Cao, G.; Wu, C.; Zhang, L. A Novel Method for Ground-Based Cloud Image Classification Using Transformer. *Remote Sens.* 2022, 14, 3978
13. Granzer, T. What makes an automated telescope robotic? *Astron. Nachrichten Astron. Notes* 2004, 325, 513–518. [CrossRef]
14. Colome, J.; Colomer, P.; Guàrdia, J.; Ribas, I.; Campreciós, J.; Coiffard, T.; Gesa, L.; Martínez, F.; Rodler, F. Research on schedulers for astronomical observatories. In *Proceedings of the Observatory Operations: Strategies, Processes, and Systems IV*, Amsterdam, The Netherlands, 4–6 July 2012; SPIE: Bellingham, WA, USA, 2012; Volume 8448, pp. 469–486.
15. Johnston, M.D.; Miller, G. Spike: Intelligent scheduling of hubble space telescope observations. *Intell. Sched.* 1994, 19, 3–5.
16. Adorf, H.M.; Johnston, M.D. A discrete stochastic neural network algorithm for constraint satisfaction problems. In *Proceedings of the 1990 IJCNN International Joint Conference on Neural Networks*, IEEE, San Diego, CA, USA, 17–21 June 1990; pp. 917–924.
17. Gar a-Piquer, A.; Ribas, I.; Colomé, J. Artificial intelligence for the EChO mission planning tool. *Exp. Astron.* 2015, 40, 671–694.
18. Garcia-Piquer, A.; Morales, J.; Ribas, I.; Colomé, J.; Guàrdia, J.; Perger, M.; Caballero, J.A.; Cortés-Contreras, M.; Jeffers, S.; Reiners, A.; et al. Efficient scheduling of astronomical observations—Application to the CARMENES radial-velocity survey. *Astron. Astrophys.* 2017, 604, A87.
19. Ball, N.M.; Brunner, R.J. Data mining and machine learning in astronomy. *Int. J. Mod. Phys. D* 2010, 19, 1049–1106.
20. Aguerri, J.; Bernardi, M.; Mei, S.; Almeida, J.S. Revisiting the Hubble sequence in the SDSS DR7 spectroscopic sample: a publicly available Bayesian automated classification. *Astron. Astrophys.* 2011, 525, A157.
21. Цыцулин А.К., Бобровский А.И., Морозов А.В., Павлов В.А., Галеева М.А. Применение свёрточных нейронных сетей для автоматической селекции малоразмерных искусственных космических объектов на оптических изображениях звёздного неба // *Оптический журнал*. 2019. Т. 86. № 10. С. 30–38.
22. Dunham, L.L.; Laffey, T.J.; Kao, S.M.; Schmidt, J.L.; Read, J.Y. Knowledge-based monitoring of the pointing control system on the Hubble space telescope. In *Proceedings of the NASA Marshall Space Flight Center, Third Conference on Artificial Intelligence for Space Applications, Part 1*, Huntsville, AL, USA, 2–3 November 1987.
23. Bykat, A. NICBES-2, a nickel-cadmium battery expert system. *Appl. Artif. Intell. Int. J.* 1990, 4, 133–141.
24. Giordano, C.; Rafalimanana, A.; Ziad, A. et al. Knowledge-based AI for AST3 telescope axis control. *Astron. Instrum.* 2023, 12, 45–52.
25. Wang, L.; Zhang, Q.; Li, H. LSTM-based fault diagnosis for LAMOST fiber positioner. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2022, 510, 112–120.
26. Teimoorinia, H.; Kavelaars, J.; Gwyn, S.; Durand, D.; Rolston, K.; Ouellette, A. Assessment of Astronomical Images Using Combined Machine-Learning Models. *Astron. J.* 2020, 159, 170.
27. Hu, T.Z.; Zhang, Y.; Cui, X.Q.; Zhang, Q.Y.; Li, Y.P.; Cao, Z.H.; Pan, X.S.; Fu, Y. Telescope performance real-time monitoring based on machine learning. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2021, 500, 388–396.
28. Hu, T.; Zhang, Y.; Yan, J.; Liu, O.; Wang, H.; Cui, X. Intelligent monitoring and diagnosis of telescope image quality. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2023, 525, 3541–3550

УДК 621.396.96+528.5

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ АВТОМАТИЧЕСКИХ КОМПАКТНЫХ КВАНТОВО-ОПТИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Татьяна Викторовна Никольская

Юрий Георгиевич Сухой – д-р техн. наук

АО «НПК «СПП», info@npk-spp.ru

В статье рассмотрены проблемы и перспективы создания компактных квантово-оптических станций для измерения параметров космических аппаратов. Рассмотрена возможность изготовления квантово-оптической станции с малогабаритным лазером и небольшим приемным телескопом, установленным на моторизованном штативе. Показана возможность создания автоматической компактной квантово-оптической станции массой около 150-200 кг.

Ключевые слова: квантово-оптическая станция, малогабаритный лазер, опорно-поворотное устройство, телескоп, моторизованный штатив.

PROBLEMS AND PROSPECTS OF CREATING DOMESTIC AUTOMATIC COMPACT QUANTUM-OPTICAL STATIONS

Tatiana V. Nikolskaya

Yury G. Sukhoy – Dr. Sc. (Technology)

JSC «RPC «PSI»

info@npk-spp.ru

The article discusses the problems and prospects of creating compact quantum-optical stations for measuring the parameters of satellite. The possibility of creating a quantum-optical station with a small-sized laser and a small receiving telescope mounted on a motorized tripod is considered. The article describes the possibility of creating an automatic compact quantum-optical station weighing about 150-200 kg.

Key words: quantum-optical station, small-sized laser, support and rotation device, telescope, motorized tripod.

Квантово-оптические станции (КОС) наблюдения за космическими аппаратами в основном измеряют дальность до космических аппаратов (КА) в целях контроля точности определения их орбит по радиотехническим измерениям,

а также для юстированных целей при работе по КА – астроориентирам. КОС обеспечивают высокую точность измерений, так как используют оптический диапазон, в котором ошибки распространения сигналов могут быть учтены с субсантиметровой точностью. При измерении дальности до КА с наземных КОС ультракороткие световые импульсы посылаются в направлении КА и принимается ответный сигнал, отражённый от специальных оптических отражателей (ретрорефлекторов), установленных на КА. В результате на КОС с высокой точностью измеряется время прохождения сигнала от КОС до КА и обратно, по которому вычисляется дальность до КА. В настоящее время в Российской Федерации применяются в основном станции КОС типа «Сажень» различных модификаций [1,4] и лазерная станция «Точка» [2]. КОС «Сажень-ТМ» [1] и лазерная станция «Точка» привлекаются в основном для измерений текущих навигационных параметров среднеорбитальных КА. Для измерений по низкоорбитальным КА эти КОС используются редко из-за отсутствия на многих низкоорбитальных КА ретрорефлекторных отражательных систем, высокой скоростью движения КА относительно КОС, а также в связи с отсутствием достаточно отработанных методик проведения квантово-оптических измерений в условиях малого количества привлекаемых КОС [3]. Одним из путей повышения точности определения орбит КА, в том числе низкоорбитальных, решить задачу поможет создание сети автоматических компактных КОС (АК КОС), позволяющих получать информативные выборки измеренных текущих навигационных параметров (ИТНП) КА за счёт оптимального планирования измерений сетью АК КОС. Для низкоорбитальных КА информативные выборки ИТНП могут быть получены на восходящих и нисходящих участках суточных витков орбит, как это делается при проведении радиолокационных измерений. Однако, ввиду отличия погодных условий в различных регионах Земли, в том числе в Российской Федерации, необходимо иметь сеть КОС, рас-

пределённых по обширной территории для их периодического использования во время отсутствия облачности с целью формирования временной сети КОС, позволяющей получать информативные выборки ИТНП. Создание такой сети из КОС типа «Сажень» и «Точка» затруднено из-за высокой стоимости, длительных сроков создания и ввода в эксплуатацию. Хотя некоторые модификации КОС «Сажень» имеют модульную структуру и относительно небольшие размеры, они являются по большей части стационарными или перевозимыми на специально оборудованных для этого транспортных средствах, а также требуют наличия подготовленных позиций с заглублёнными пилонами с поверхностью для жёсткого крепления КОС на время работы. На рисунке 1 показана малогабаритная модульная КОС (ММКОС) «Сажень-ТМ» с передающим и приёмным телескопом на заранее подготовленной позиции [4].



Рисунок 1 – ММКОС «Сажень-ТМ» с передающими приёмным телескопом на заранее подготовленной позиции



Рисунок 2 - Французская переносная лазерная станция (FTLRS)

Вместе с тем, в настоящее время за рубежом прослеживается тенденция создания передвижных малогабаритных автоматических КОС без крупногабаритных укрытий [5,6]. На рисунке 2 изо-

бражена французская малогабаритная переносная лазерная станция (FTLRS) [5], её масса составляет 300 кг, включая массу контейнеров.

Она размещается в восьми контейнерах, масса каждого из них не превышает 55 кг. Станция применима для температурных условий от -10°C до $+35^{\circ}\text{C}$ при влажности воздуха до 95%. Станция оснащена Nd:YAG лазером с энергией в импульсе 100 мДж с низким энергопотреблением, массой около 80 кг. Длительность импульса составляет 100 пс на длине волны 1064 нм, частота излучения – 10 Гц [6]. Отслеживание и измерение дальности до КА, оснащённых ретрорефлекторами, осуществляется до высоты 6000 км с использованием телескопической системы диаметром 13 см, установленной на моторизованном штативе, созданного на основе высокоточного геодезического моторизованного теодолита. Корпус телескопической системы выполнен из углеродного волокна, что обеспечивает его небольшую массу. Масса оптической части составляет 9 кг. Моторизованный штатив создан путём модернизации штатива теодолита KERN E2. Двигатели штатива позволяют осуществлять перемещение телескопической системы с максимальной угловой скоростью 20° в секунду, что обеспечивает слежение даже за низкоорбитальными КА. Крепление обеспечивает стабильную ориентацию системы во время эксплуатации в полевых условиях с общей погрешностью несколько угловых секунд, не зависящей от температуры и полевых условий эксплуатации. Точность FTLRS 2 см была подтверждена в 1997 году в реальных полевых условиях на острове Корсика. Испытания показали [7], что необходимо усовершенствование станции в части перехода с инфракрасной длины волны на зелёную и применения лавинного фотодиода с компенсацией дрейфа. В течение 1997-2001 годов возможности FTLRS были значительно расширены, что обеспечило точность около 1 см, необходимую для участия в новых проектах, таких как слежение за КА Jason-1 (высота орбиты – 1336 км) и КА Envisat (высота орбиты – 765 км). Новые характеристики FTLRS были подтверждены с использованием трёх независимых лазерных систем измерения дальности [8], ввиду чего FTLRS была применена также для отслежи-

вания КА LAGEOS-1 (высота орбиты – 5860 км) и LAGEOS-2 (высота орбиты – 5620 км). Станция FTLRS перемещалась в различные места (Париж, Корсика, Французская Полинезия, Тасмания) для поддержки различных миссий, например, слежение за КА Jason-2 и обеспечение проекта T2L2 по синхронизации времени [9]. Эксперимент T2L2 подтвердил возможность применения станции FTLRS для синхронизации удалённых часов на Земле и контроля спутниковых часов с точностью менее 50 пс. Развёртывание и настройка станции на новом месте осуществляется за время менее 72 часов. На рисунке 3 показано укрытие для этой станции [5], представляющее собой тент, для установки которого требуется не более 5 минут.



Рисунок 3 – Укрытие для французской переносной лазерной станции

В последние годы за рубежом были развёрнуты работы по разработке более современных малогабаритных перебазиремых КОС, например miniSLR [9]. Компактная система спутниковой лазерной станции (miniSLR) показана на рисунке 4.



Рисунок 4 - Модель системы miniSLR

Она создана специалистами немецкого аэрокосмического центра (DLR) в Штутгарте. Прототип испытан в 2021 году. Апертура телескопической системы составляет 20 см. В miniSLR используется лазер с энергией в импульсе 0.2 мДж, длительностью импульса около 400 пс и частотой 30 кГц, установленный непосредственно на телескопе [9,10]. Вся установка заключена в алюминиевую коробку размером 1.8 м × 1.2 м × 1.6 м и весит около 200 кг без дополнительного оборудования. Коробка для установки с ящиком для дополнительного оборудования и самой miniSLR показана на рисунке 5.

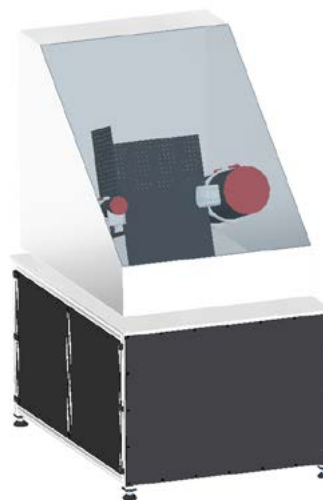


Рисунок 5 – Внешний вид коробки и ящика для дополнительного оборудования miniSLR

Герметичный купол с поворотом по азимуту снабжён стеклянным окном для входящего и выходящего светового потока. Согласно техническим характеристикам, система обладает большой долговременной стабильностью благодаря правильному регулированию температуры, более коротким кабелям и хорошо продуманной калибровке. Создание дешёвых АК КОС даёт возможность их многосерийного изготовления и оперативного перемещения на большие расстояния для формирования сети КОС нужной конфигурации в соответствии с особенностями применения группировок КА различного типа. Проведён анализ возможности создания АК КОС на основе использования малогабаритных опорно-поворотных устройств (ОПУ), например, типа ASA DDM [11], показанном на рисунке 6, с программным управлением и с закреплёнными на нём передающей оптической системой импульсного

малогабаритного лазера и небольшой приёмной оптической телескопической системой.



Рисунок 6 - Малогабаритное опорно-поворотное устройство ASA DDM

Опорно-поворотное устройство ASA DDM200 – профессиональная экваториальная установка с прямым приводом с абсолютными энкодерами (датчиками), программным обеспечением для независимого от платформы управления и креплениями, созданными с использованием технологий ЧПУ, с грузоподъемностью 200 кг на полярный клин, точностью наведения менее 8", точностью отслеживания – менее 0,25" в течение 5 минут, скоростью поворота 10 градусов в секунду и весом (без противовеса) – 56 кг. В ОПУ используются энкодеры с высоким разрешением до 0,004" на каждой оси и собственный контроллер прямого привода, а также система двигателей, которой не требуется трансмиссия. ОПУ с оптическими системами и систему наведения на базе малогабаритных моментных двигателей предлагается монтировать на подвижном блоке (ПБ) моторизованного штатива, показанном на рисунке 7, но усиленном для обеспечения удержания телескопической системы с требуемой массой.



Рисунок 7 – Общий вид моторизованного штатива Tripod X

Сейчас на рынке появились новые штативы, которые можно использовать на неровной поверхности, так как его датчики и двигатели способны самостоятельно поддерживать горизонтальную плоскость для точного наведения оптической системы. Например, в 2024 году компания Edelkrone представила моторизованный штатив Tripod X [12]. Особенности такого штатива заключаются в том, что на неровной поверхности штатив автоматически выравнивается благодаря встроенным датчикам, которые постоянно контролируют его положение, а высота штатива контролируется с помощью панели управления. ПБ в простейшем случае предлагается оснастить астродатчиками и другими устройствами, поддерживающими требуемую систему координат, например, горизонтальную с использованием двигателей штатива. Вычислительно-управляющий комплекс, аппаратуру регистрации импульсов, стандарт частоты, аппаратуру передачи данных и метеостанцию предлагается размещать отдельно, например, на малогабаритной передвижной платформе. При этом отдельные части АК КОС, требующие термостабилизации, могут размещаться в отдельном контейнере платформы. Исследования показали возможность применения для АК КОС малогабаритных фотоприёмных устройств с высокой квантовой эффективностью. Для КОС с лазерами 1.064 мкм в качестве фотоприёмника обычно используется кремниевый фотодиод, потому что на этой длине волны он имеет наиболее высокую спектральную чувствительность. Для длины световой волны 0.532 мкм нужно подбирать другие фотодиоды, например, сернисто-кадмиевые фоторезисторы или фоторезисторы на других соединениях элементов. Хорошую чувствительность на волне 0.532 мкм, близкую к пиковой, имеют фотоэлементы фирмы Hamamatsu Photonics, например, ФЭУ S11212, S7686, S8265, особенно S11212/S11299-121 CsI(Tl) - Сцинтилляционный кристалл йодида цезия, легированный таллием, а также S11212/S11299-321 (GOS ceramic (окисульфид гадолиния) – разновидность керамики с гексагональной структурой). Квантовая эффективность фоторезистора S11212-121 показана на рисунке 8 [13].

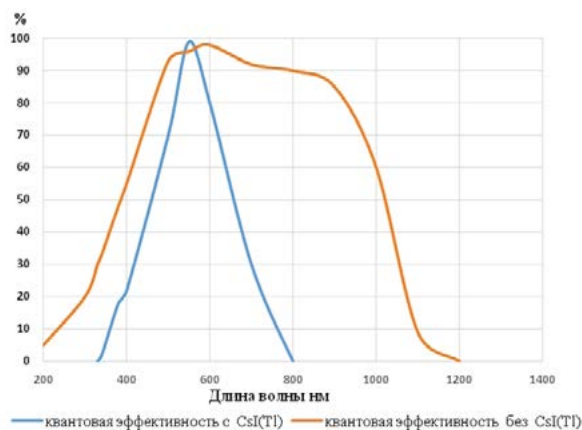


Рисунок 8 – Квантовая эффективность фоторезистора S11212-121

Следует отметить, что случайная погрешность часто используемого в отечественных КОС фотоприёмника Hamamatsu R10467-U40, имеющего квантовую эффективность порядка 40% и нестабильность времени пролёта, не превышающую 90 пс, составляет 8-10 пс, что соответствует 1.5 мм по дальности. Применение фоторезистора S11212/S11299-121 позволит существенно повысить чувствительность фотоприёмного устройства. Также проведены исследования зависимости минимальной энергии лазера в импульсе от высоты орбит КА для четырёх приемных апертур телескопов:

- лазерной станции «Точка» с диаметром приемной апертуры телескопа 36 см;
- квантово-оптической станции «Сажень ТМ» с диаметром приемной апертуры телескопа 24 см;
- квантово-оптической станции с диаметром приемной апертуры 15 см;
- квантово-оптической станции с диаметром приемной апертуры 10 см.

Расчёт энергии импульса лазера КОС с разными апертурами (диаметр входного объектива) приёмного телескопа осуществлялся по приближённым формулам в зависимости от высоты полета КА при расходимости лазерного пучка 20 угловых секунд, коэффициенте прозрачности атмосферы 0.3, квантовой эффективности фотоприёмного устройства 0.5, коэффициенте пропускания оптики 0.5, эквивалентной площади рассеяния отражательного элемента КА 100 млн. кв. м. Полученные в результате расчётов зависимости минимальной энергии лазера в импульсе от высоты

орбиты КА при использовании разных апертур приведены на рисунке 9.

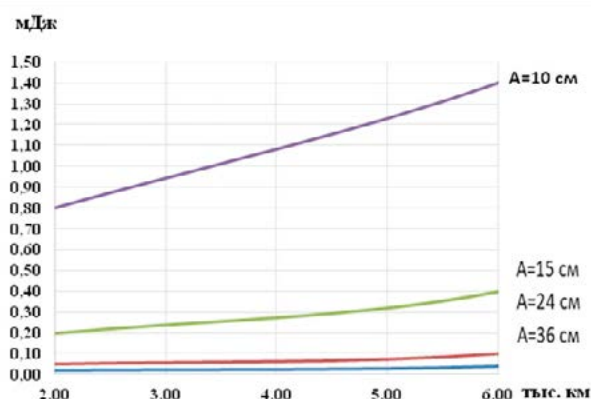


Рисунок 9 - Зависимость минимальной энергии лазера в импульсе от высоты орбиты КА

При проектировании АК КОС должен быть проведён расчёт энергии лазерного импульса с учётом экспериментальных данных, полученных от существующих КОС, и особенностей рассеивания лазерного луча, отражённого от ретрорефлекторных систем, в атмосфере Земли. Вместе с тем, зависимости, показанные на рисунке 9, позволяют сделать предварительный вывод, что для апертуры телескопа 15 см при работе по КА с высотой орбиты менее 6 тыс. км возможно создание АК КОС с энергией в импульсе около 0.4 мДж, а для КА с высотой полета менее 2 тыс. км при аналогичной апертуре требуется лазер с энергией в импульсе не более 0.2 мДж. Для апертуры телескопа 10 см при работе по КА с высотой орбиты менее 6 тыс. км возможно создание АК КОС с энергией в импульсе около 1.4 мДж, а для КА с высотой полета менее 2 тыс. км при аналогичной апертуре требуется лазер с энергией в импульсе не более 0.8 мДж. Таким образом, апертура приёмного телескопа АК КОС для низкоорбитальных КА может находиться в диапазоне от 10 до 15 см в зависимости от энергии лазера, излучаемой в импульсе. Для облегчения конструкции, размещаемой на штативе, возможно использование оптоволоконных лазеров, которые можно размещать в боксе с поддерживаемой температурой, а на штативе размещать только лазерный излучатель. В настоящее время существуют отечественные малогабаритные лазеры (таблица 1), которые можно использовать в качестве прототипа лазера для АК КОС.

Таблица 1 – Отечественные малогабаритные лазеры, которые можно использовать в качестве прототипа для АК КОС

λ , мкм	Активная среда	ЭИ, мДж	P пик, Вт	T имп.	F, кГц	Габариты, мм	Рпот, кВт	Фирма	Модель
1.035±10	Ti:Al ₂ O ₃	0,4-2	6-10	< 10пс	6/10	480x250x148	<1.5	Авеста-Проект	ТЕТА-6, ТЕТА-10
1.035±10	Ti:Al ₂ O ₃	до 1	20	< 10пс	6/10	480x250x148	<2	Авеста-Проект	ТЕТА-20
1.035±10	Ti:Al ₂ O ₃	>2	3	< 10пс	6/10	480x250x148	<1.5	Авеста-Проект	ТЕТА-3-НЕ
0.350-2.400	Волоконный	≤0,1	1-5	5 пс – 2 нс	1 кГц - 40 МГц	300x250x90	-	Солитон	Волокон. источник суперкон-тинуума.
1.030,0.515 0.343	Волоконный	0,1	100	10-40 пс	До 2 МГц	480x625x132	< 2	Ирэ-Полус	UPL-100-15-100

Из таблицы следует, что существуют достаточно компактные лазеры с небольшими габаритами и длительностью импульса меньше 40 пс. В части дополнительного оборудования целесообразно использовать таймер А033-ЕТ фирмы Eventech Ltd. Таймер обеспечивает высокую точность регистрации импульсов (<5пс) при скорости потока измерений до 30 Кбит/с. Режим работы таймера обеспечивает циклическое измерение событий, поступающих на отдельные входы регистратора. В качестве стандарта времени и частоты возможно использование малогабаритных пассивных водородных стандартов, например VCH-1017 АО «Время-Ч», обладающего суточной нестабильностью менее $5e^{-15}$ и массой 12 кг. Масса подобных перспективных стандартов может составлять 7-9 кг. Общая масса всех частей станции по предварительным оценкам составит от 150 до 200 кг, что обеспечит возможность перемещения АК КОС в небольших контейнерах.

По предварительным оценкам для АК КОС достижимы следующие составляющие погрешности измерений:

- случайная погрешность за счёт длительности излучения может составить не более 25 пс или около 4 мм по дальности;
- случайная погрешность фиксации интервалов времени при использовании таймера А033-ЕТ составит не более 10 пс или 1,5 мм по дальности;
- случайная погрешность, определяемая дис-

кретом отсчета времени составит не более 0.2 мм.

Суммарная максимальная случайная разовая погрешность измерений АК КОС может составить менее 5 мм, а усреднённых измерений – 1-2 мм. Установка АК КОС на твёрдых покрытиях с обеспечением устойчивости штатива может занимать не более 24-48 часов. В качестве укрытия от плохих метеоусловий рекомендуется использовать тент зонтичного типа или колпак из прозрачного материала. Создание отечественных АК КОС экономически выгодно благодаря низкой себестоимости и мобильности, что позволяет формировать сети слежения за без строительства стационарных позиций. Основными преимуществами конструкции АК КОС являются:

- дешевле в производстве;
- требуют меньше затрат на обслуживание;
- система может быть интегрирована и протестирована на заводе-изготовителе до того, как она будет доставлена на место эксплуатации, что снижает трудозатраты на установку и сокращает задержки в процессе ввода в эксплуатацию;
- не требуется проектирование, получение разрешений на строительство и проведение строительных работ, что значительно снижает затраты, трудозатраты и время, необходимые для установки;
- при необходимости можно легко переместить систему.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурмистров В. Б., Бурмистров Е. В., Гаязов И. С., Иванов Д. В., Ильин Г. Н., Ипатов А. В., Кацев Ю. В., Коваль В. В., Корнев А. Ф., Митряев В. А., Рахимов И. А., Смоленцев С. Г. Модернизация спутникового лазерного дальнометра «Сажень-ТМ» в обсерватории «Светлое» // Труды ИПА РАН. 2023. Вып. 66. С. 3–10.
2. Борисов Б.А., Донченко С.И., Жабин А.С., Мурашкин В.В., Пархоменко Н.Н., Рой Ю.А., Садовников М.А., Соколов А.Л., Тимов Е.В., Шаргородский В.Д. О создании радиолазерных комплексов «Точка» для решения задач космической геодезии и навигации // Фотоника. 2022. Т.16. № 5. С. 370-391.
3. Никольская Т.В. Определение контролируемых параметров малых космических аппаратов с использованием оптических сигналов. К.Э. Циолковский: проблемы индустриализации космоса и рационального использования земных ресурсов. Материалы 60-х Научных чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского. Часть I. Калуга: ИП Стрельцов И.А. (Изд-во «Эйдос»). 2025. ISBN 978-5-907928-67-1 (ч.1) Стр. 66-69.
4. Шаргородский В.Д. Лазерная дальнометрия. Задачи. Современное состояние. Перспективы. Презентация. <https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1770016966&tld=ru&lang=ru&name=Sharгородsky-laser-ranging-luas-2007.pdf>
5. F. Pierron, J. Nicolas, M. Kasser, J. Haase Status and new capabilities of the French Transportable Laser Ranging Station <http://michel.kasser.free.fr/FTLRS.pdf>
6. Matthew Wilkinson, Ulrich Schreiber, Ivan Procházka, Christopher Moore, John Degnan, Georg Kirchner, Zhang Zhongping, Peter Dunn, Victor Shargorodskiy, Mikhail Sadovnikov, Clément Courde, Hiroo Kunimori. The next generation of satellite laser ranging systems // Journal of Geodesy. 2018. <https://doi.org/10.1007/s00190-018-1196-1>
7. Nicolas, J., Pierron, F., Samain, E. et al. Centimeter Accuracy for the French Transportable Laser Ranging Station (FTLRS) through Sub-System Controls // Surveys in Geophysics 22, 449–464 (2001). <https://doi.org/10.1023/A:1015612032752>
8. Nicolas J., P. Bonnefond, P. Exertier, J. Laurain, F. Pierron (2002). Presentation of the 2002 Corsica FTLRS campaign for the Jason-1 CAL/VAL experiment. Proceedings of the 13th International Laser Ranging Workshop, Washington - USA, Oct 7-11.
9. D. Hampf, P. Wagner, E. Schafer, W. Riede. The miniSLR: a low-budget, high-performance satellite laser ranging ground station https://ilrs.gsfc.nasa.gov/lw21/docs/2018/papers/Session8_Hampf_Paper.pdf
10. Daniel Hampf, Paul Wagner, Ewan Schafer, Wolfgang Riede. Concept for a new minimal SLR system. German Aerospace Center, Stuttgart, Germany https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1770128701&tld=ru&lang=en&name=Session8_Hampf_Paper.pdf
11. Dimensions And Weight - Asa Electronics Ddm200 Direct Drive Mount Original User Manual. www.manualslib.com
12. Edelkrone Tripod X — первый в мире полностью моторизованный штатив <https://fotogora.ru/edelkrone-tripod-x-pervyyj-v-mire-polnostyu-motorizovannyj-shtati/?ysclid=mky0g9fysu881455138>
13. Hamamatsu. 16-element Si photodiode arrays. https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1770129237&tld=ru&lang=en&name=s11212_series_kmp-d1127e

УДК 004.42+ 621.396.96

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ СИМВОЛИЧЕСКОГО ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ЛУНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ДАЛЬНОМЕРОМ

Вадим Евгеньевич Румянцев

Александр Владимирович Яковлев

Филиал АО «НПК «СПП» в Санкт-Петербурге, info@npkspp.ru

В статье описаны способ, алгоритм и программы для системы управления лунным лазерным дальномером, позволяющие формулировать решаемые при комплексировании программ задачи на понятном пользователю и достаточно универсальном языке описания предметной области. Рассмотрен разработанный авторами универсальный расширяемый язык описания предметной области, позволяющий описывать семантику выполняемых задач на нескольких смысловых уровнях. Проведено сравнение метрик эффективности и сложности системы управления, использующей разработанный авторами способ управления путём денотационно-семантической продукции, с известными аналогами.

Ключевые слова: программное обеспечение, системы управления, символический искусственный интеллект

APPLICATION OF SYMBOLIC ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS IN THE CONTROL SYSTEM OF A LUNAR LASER LOCATOR

Vadim E. Rumyantsev

Aleksandr V. Yakovlev

JSC «RPC «PSI», St. Petersburg branch, info@npkspp.ru

The article describes a method, algorithm, and software for a lunar laser rangefinder control system that enable the description of tasks solved by program integration in a user-friendly and fairly universal domain description language. A universal, extensible domain description language developed by the authors, which allows for describing the semantics of tasks performed at multiple semantic levels, is discussed. The effectiveness and complexity metrics of the control system, which uses the authors' method of control through denotational-semantic production, are compared with known analogs.

Keywords: software, control systems, symbolic artificial intelligence

При комплексировании разнородных программ в единый распределённый программный комплекс первостепенное значение приобретает способ описания взаимодействия между этими программами, а именно последовательности и условий их вызова и способа обмена данными. Известно множество решений данной задачи в более или менее общих постановках на протяжении 60 лет развития системного программного обеспечения. В настоящей работе авторами предложен способ описания постановки задач управления квантово-оптическими средствами, в частности комплексом аппаратуры лунного лазерного дальномера, автоматического преобразования этого описания к исполняемому коду, а также осуществления контроля выполнения задач.

Впервые задача комплексирования программ для автоматического совместного выполнения в общем виде стала решаться в начале 1960-х годов. Наиболее известным примером решения того времени является язык управления заданиями JCL в IBM System/360 [1]. При комплексировании язык JCL позволял объединять шаги задания, то есть вызовы загрузочных модулей программ, в единый ветвящийся (но не циклический) вычислительный процесс, при этом проверяя коды возврата, формируемые программами, и ставя в зависимость от их значения выполнение дальнейших шагов (рисунок 1).

```
//MYBTEQJOB JOB (ACCT), 'BTEQ Job Example',
//          NOTIFY=&SYSUID
//*****
//* Step 1: Submit BTEQ Job
//*****
//STEP1    EXEC PGM=BTEQ
//STEPLIB DD DSN=YOUR.BTEQ.LOADLIB,DISP=SHR    // BTEQ Load Library
//SYSIN    DD DSN=YOUR.BTEQ.QUERY,DISP=SHR      // BTEQ Query File
//SYSPRINT DD SYSOUT=*
```

Рисунок 1 – Представление вычислительного процесса в виде операторов JCL

В дальнейшем этот подход был развит и обобщён в IBM в скриптовых языках EXEC, EXEC2 и языке высокого уровня REXX, а в Unix-со-

обществе – в скриптовых языках sh, csh, bash, zsh и т.д. и языках высокого уровня Perl, Python. В данном случае развитие шло по пути приближения языка управления заданиями к обычному языку программирования, что позволяло увеличить гибкость подхода, но требовало от пользователя, осуществляющего комплексирование, развитых программистских навыков. С другой стороны, многократно предпринимались попытки разработки средств комплексирования для конкретных предметных областей, ориентированных на конечного пользователя.

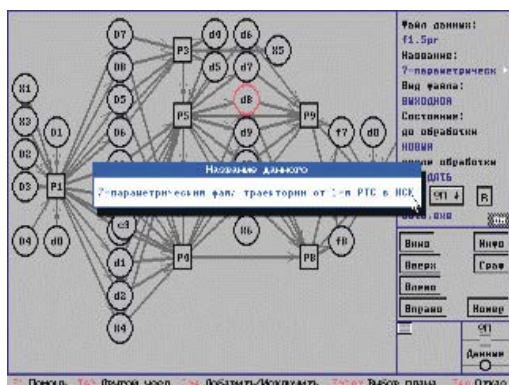


Рисунок 2 – Представление вычислительного процесса в виде графа

В рамках такого подхода авторы участвовали в разработке системного программного обе-

спечения обработки внешнетраекторной информации о пусках изделий с испытательных полигонов (под руководством А.Ф. Губкина) [2] и системы управления комплексом квантово-оптических средств (под руководством В.Е. Румянцева) [3]. При этом комплексирование программ описывалось наглядно графом предметной области (рисунок 2) или диаграммой Ганта (рисунок 3), а пользователь имел возможность редактировать такое описание в графическом редакторе.

Достоинством данного подхода является наглядность представления вычислительного процесса, достаточная для использования неквалифицированным в программировании пользователем, а недостатком – ограниченность возможностей представления данных с помощью таких структур, по сути мало выходящая за пределы возможностей языка JCL. Осмысление имеющихся подходов привело авторов к следующему наблюдению.

Рассмотрим синтаксис представления вычислительного процесса (неважно, текстовый или графический) как способ передачи его семантики. Язык JCL имеет сложный синтаксис, простую денотационную семантику и простую операционную семантику, поэтому он сложен в представлении вычислительного

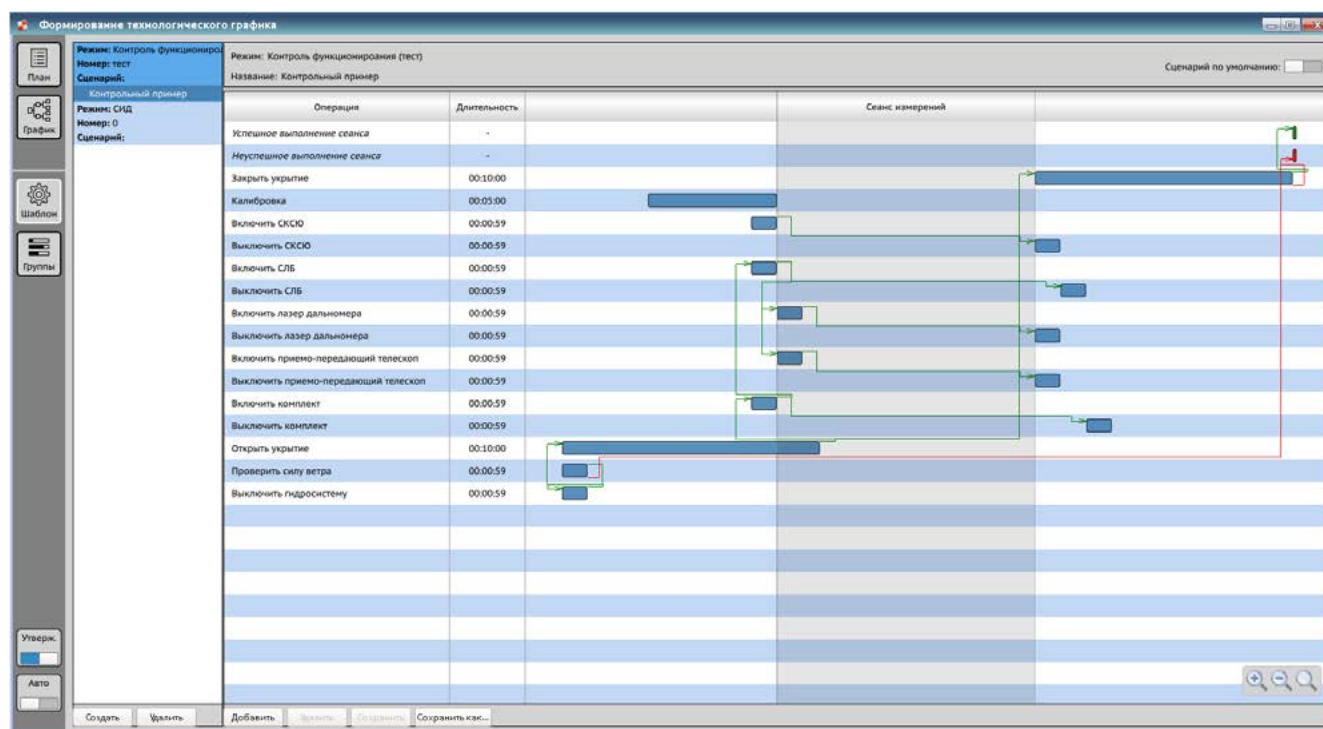


Рисунок 3 – Представление вычислительного процесса в виде диаграммы Ганта

процесса, прост в его концепции и недостаточен для описания сложных процессов. Скриптовые языки вроде Python сложны в представлении, сложны в концепции и достаточны для описания. Графы и диаграммы просты в представлении, просты в концепции и недостаточны для описания. При этом желательным для пользователя, комплексизирующего свои задачи, является максимальное упрощение синтаксиса и денотационной семантики описания (то есть языка и смысла представленного описания процесса) при обеспечении достаточно высокой для универсальности использования сложности операционной семантики (то есть смысла операций, выполняемых для реализации процесса). Другими словами, пользователь должен иметь возможность простого описания, чего он хочет, при необходимости автоматически порождающего сложную реализацию желаемых им вещей. Чтобы синтаксис описания также был простым, он должен, очевидно, представлять простую денотационную семантику, а не сложную операционную (причём представлять простым образом). Это авторы называют денотационно-семантическим подходом к решению задачи комплексирования, и для его реализации разработали рассмотренный ниже способ управления путём денотационно-семантической продукции и реализующие его алгоритм и программное обеспечение. Для реализации данного способа авторами был применён язык Scheme, традиционно используемый в реализации алгоритмов символического искусственного интеллекта. В качестве синтаксиса описания предметной области на данном этапе был выбран автоматически строящийся по определённым правилам текстовый предметно-ориентированный язык, близкий к естественному русскому языку. Язык построен как макрорасширение Scheme и синтаксически состоит из обычных S-выражений. Исходными данными для планировщика системы управления является выписка из оперативного плана задействования квантово-оптического средства, в соответствии с которой формируются привязанные к планируемым моментам времени Tнач и Tкон запросы на проведение сеансов измерения следующего вида (рисунок 4):

(сеанс *режим длительность*)

Рисунок 4 – Примерный вид запроса на проведение сеанса измерения

Синтаксис языка состоит из фиксированных лексических элементов (запросы на проведение сеанса в заданное время, признаки режима проведения сеанса, отметки смещений во времени относительно начала и конца сеанса, управляющие конструкции) и автоматически генерируемых, соответствующих сконфигурированным в системе операционным элементам (управляемым системам и их командам). Запросы на проведение сеансов интерпретируются в соответствии с описаниями шаблонов сеансов, которые могут иметь, например, следующий вид (рисунок 5):

```
(режим (11 21)
  (нач+ 0) (питание включить система-наведения)
  (нач+ 0) (наведение режим рабочий)
  (нач+ 0) (отображение показать "Сеанс в режиме 11 21")
  (нач+ 10) (измерение-углов работа-по-целеуказаниям)
  (нач+ 10) (если (? измерение-углов *статус 0) то
    (фотометрия-ик фотометрирование))
  (кон- 10) (питание выключить система-наведения)
  (кон- 0)
)
```

Рисунок 5 – Описание решаемой задачи (шаблон сеанса наблюдения)

На рисунке 5 чёрный текст соответствует фиксированным лексическим элементам, а синий – автоматически генерируемым по данным пользователя. Небольшое количество чёрных элементов в синтаксисе свидетельствует о генерации конечного синтаксиса под требования пользователя. Для построения формального соответствия между синтаксисом и денотационной семантикой была применена модель полной абстракции, известная по публикации [4] и опирающимся на неё работам, в том числе [5]. Отметим, что результаты [4] были получены для типизированного лямбда-исчисления в домене целых чисел. Авторы, используя язык Scheme, номинально работают в бестиповом лямбда-исчислении, однако формальную семантику рассматриваемых авторами задач можно рассматривать в семантическом домене конечных S-выражений, ограниченных объёмом памяти компьютера, а этот домен изоморфен домену конечного подмножества целых чисел. Поэтому выводы [4] и [5] применимы к нашей задаче при ограничении характера продукционного

```
: 2025-02-24 18:14:49 Выполнение команды (стн-ллд *статус) ()
: 2025-02-24 18:14:49 Получение команды стн-ллд : 31 0 099F45E1-CC03-4433-AD21-3131B5466E86 0 0
& 2025-02-24 18:14:49 Обращение к функции 31 службы стн-ллд , параметры: ()
: 2025-02-24 18:14:49 Отправка подтверждения СУ
: 2025-02-24 18:14:49 Отправка результата СУ: (1 1 "2025-02-24 10:05:41" 0 0 "")
& 2025-02-24 18:14:49 (ОТВЕТ (стн-ллд *статус) (1 1 "2025-02-24 10:05:41" 0 0 "")) (код 0))
& 2025-02-24 18:14:49 (ПОДТВЕРЖДЕНИЕ (стн-ллд *статус))
```

Рисунок 6 – Фрагмент журнала планировщика

вывода, а именно, в том случае, когда в процессе вывода не происходит порождения недопустимо длинных (т.е. выходящих за объём памяти) S-выражений. Но именно таковы все прагматически достижимые в реальной вычислительной среде ситуации. Разработанный авторами способ управления путём денотационно-семантической продукции состоит в применении многоэтапного продукционного символического преобразования описания результата, представляющего собой денотационную семантическую абстракцию верхнего уровня, в соответствующую ему денотационную семантическую абстракцию нижнего уровня, которая заключается в описании конкретных технологических команд, выдаваемых на управляемые системы, то есть имеющих однозначное представление в операционной семантике. В разработанной авторами программе запросы на проведение сеансов, то есть денотационные абстракции верхнего уровня, синтаксически представленные в виде списковых структур, подвергаются сначала эквивалентному семантическому преобразованию в средний уровень, а именно в шаблоны технологических команд, а затем следующему эквивалентному семантическому преобразованию в низкий уровень, то есть непосредственно в исполняемый код, содержащий выполняемые с привязкой ко времени вызовы функций, соответствующих конкретным параметризованным командам. А уже эти функции имеют конкретную операционную семантику передачи сетевых пакетов для управления отдельными системами квантово-оптического средства. Для выполнения семантических преобразований используется база продукционных правил в соответствии с принципами символического искусственного интеллекта. Можно сказать, что планировщик системы управления в данном случае представляет собой транслятор из декларативного предметно-ориентированного языка в команды языка Scheme, исполняемые в

реальном масштабе времени интерпретатором Scheme. Сам планировщик подвергнут предварительной компиляции в объектные файлы компилятором Scheme. На нижнем уровне все этапы генерации и прохождения команд протоколируются в журнале планировщика (рисунок 6).
Результаты выполнения операций контролируются при помощи разработанного авторами монитора технологического графика – программы на языке C++ с графическим интерфейсом, реализованным с помощью библиотеки Qt (рисунок 7).

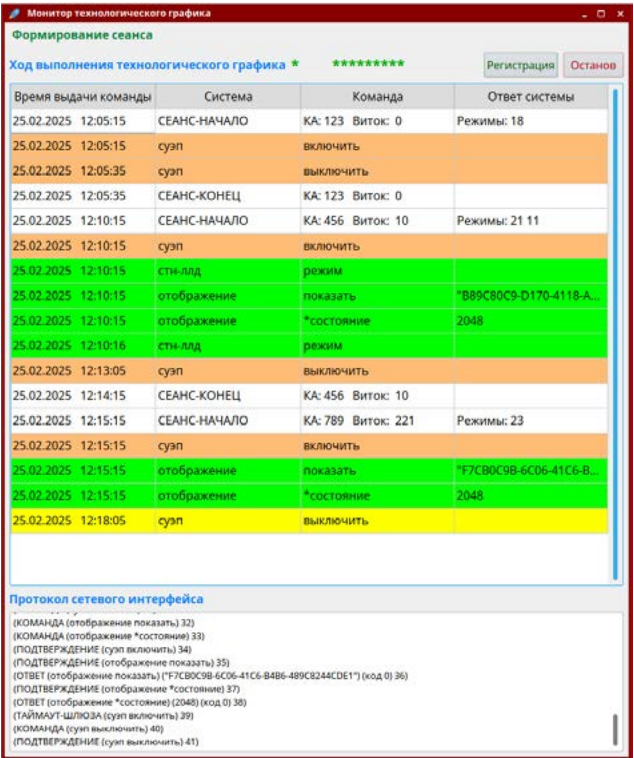


Рисунок 7 – Монитор технологического графика

Программный комплекс реализован в операционной системе Astra Linux. Авторами было проведено сравнение программного кода сервера системы управления на языке Scheme, реализующей способ денотационно-семантической продукции, с аналогичным программ-

ным кодом сервера системы управления предыдущего поколения, написанного на языке C++ в объектно-ориентированной парадигме. Было установлено, что оба сервера оказались фактически реализованы в 18 мегабайтах исходного кода каждый. Однако, в случае объектно-ориентированного кода 15 из этих 18 мегабайт были написаны программистами вручную в 1400 файлах на языке C++ (ещё 3 мегабайта было сгенерировано скриптами), в то время как в денотационно-семантическом коде 18 мегабайт представляют собой результат применения автоматической продукции из 60 файлов на языке Scheme и его предметно-ориентированном макрорасширении, общий объём которых составляет 250 килобайт. Таким образом, способ денотационно-семантической продукции позволил повысить эффективность разработки модулей системы управления в несколько десятков раз, если в качестве метрики использовать объём написанного вручную исходного кода. Правда, в отношении ядра системы денотационно-семантической продукции реальное увеличение производительности разработки невелико, поскольку функциональный код сложнее в написании, чем объектно-ориентированный, однако в отношении реализации самих сервисов управления, использующих в основном конструкции предметно-ориентированного языка, производительность разработки намного увеличивается. Поэтому по мере увеличения количества управляемых систем эффект от применения данного способа растёт. Использование способа управления путём денотационно-семантической продукции, реализованного в системе управления лунным лазерным дальномером, позволило из оперативного плана, подготовленного не имеющим программистской квалификации пользователем, и шаблонов проведения сеансов измерений, подготовленных пользователями, имеющими только самые общие навыки алгоритмизации, автоматически строить неограниченно сложные последовательности команд для управления технологическими операциями оборудования и выполнять эти команды в реальном масштабе времени в необходимой взаимосвязи между собой. При этом эффективность разработки модулей системы управления была значительно повышена. Реализованная система

управления была апробирована на базе Алтайского оптико-лазерного центра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джермейн К. Программирование на IBM/360. Пер. с англ. – 4-е изд. – М.: Мир, 1983.
2. Гладцын В.А., Румянцев В.Е. К вопросу организации распределенной вычислительной среды апостериорной обработки и анализа информации/Тез. докл. IV международной электронной научной конференции. «Современные проблемы информатизации». – Воронеж: Воронежский гос. пед. ун-т, 1999.
3. Беляев С.А., Румянцев В.Е. Опыт построения автоматизированных систем управления верхнего уровня для квантово-оптических систем / Прецизионные оптико-лазерные и информационно-измерительные системы: тез. докл. 3 н.-т. конференции молодых ученых и специалистов ОАО «НПК «СПП» / под ред. В.Д. Шаргородского – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. ISBN 978-5-383-00719-8.
4. Plotkin, G., LCF as a programming language, *Theoretical Computer Science* 5 (1977), 223-257.
5. Curien P.-L. (2007). Definability and Full Abstraction. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*. 172: 301–310. doi:10.1016/j.entcs.2007.02.011

РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ТЕЛЕСКОПА С ГЛАВНЫМ ЗЕРКАЛОМ СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Юрий Вадимович Бажанов – д-р техн. наук
Артем Матвеевич Степанцов

АО «НПК «СПП», yvbazhanov@mail.ru,
astepantsov00@mail.ru

В статье рассматривается подход к расчёту четырёхзеркального объектива телескопа, в котором главное зеркало имеет сферическую форму. В основе подхода лежит теория аберраций третьего порядка, позволяющая получить приближённую базовую схему. На основе этого решения выполняется сферичдальнейшая оптимизация с использованием компьютерного моделирования для достижения требуемого качества изображения. Рассмотрены как схема с промежуточным изображением, так и схема без него. Рассмотренная методика эффективна для предварительного синтеза и последующей коррекции сложных зеркальных систем.

Ключевые слова: сферическое главное зеркало, оптическая схема телескопа, аберрации 3-го порядка, геометрическая оптика, оптический расчет

COMPUTATION OF THE OPTICAL SYSTEM FOR A TELESCOPE WITH A SPHERICAL PRIMARU MIRROR

Yury V. Bazhanov – Dr. Sc. (Technology)
Artem M. Stepantsov

JSC «RPC «PSI», yvbazhanov@mail.ru,
astepantsov00@mail.ru

The article discusses an approach to calculating a four-mirror telescope lens, where the main mirror has a spherical shape. The approach is based on the theory of third-order aberrations, which allows for the derivation of an approximate base system. Based on this solution, further optimization is performed using computer simulations to achieve the desired image quality. Both a scheme with an intermediate image and a scheme without an intermediate image are considered. This methodology is effective for the preliminary synthesis and subsequent correction of complex mirror systems.

Key words: spherical primary mirror, optical system of the telescope, third order aberrations, geometrical optics, optical calculation

Рост числа искусственных объектов на околоземных орбитах, включающих в себя как космические аппараты, так и космический мусор (отработанные разгонные блоки, снятые с эксплуатации спутники и т. д.), создал критическую угрозу для безопасности и устойчивости космической деятельности. В связи с подобной проблемой, актуальной задачей будет являться разработка и развертывание глобальной сети специализированных оптико-электронных средств мониторинга космических объектов. Ключевыми требованиями к таким системам являются, с одной стороны, высокая апертура телескопа, необходимая для обнаружения космических объектов с блеском до 19-й – 20-й звездной величины, с другой стороны, относительно низкая стоимость производства, что является обязательным условием для развертывания сети систем. Зеркальные системы телескопов с асферическим главным зеркалом обеспечивают высокое качество изображения при минимизации числа оптических элементов, однако производство подобного главного зеркала сопряжено с высокой технологической сложностью и стоимостью изготовления. В связи с чем, перспективным направлением является применение составных главных сферических зеркал. Перспективность применения сегментированных сферических зеркал обусловлена двумя ключевыми факторами: технологичностью производства и снижением массы. Технология их изготовления сводится к производству множества идентичных сегментов, что проще производства цельного зеркала. Кроме того, совокупная масса этих сегментов оказывается меньше массы монолитного зеркала. Конфигурации апланатических систем с главным сферическим зеркалом и методы их расчета проанализированы в работах [1, 2], а также в различных отечественных и зарубежных публикациях. Одним из самых известных телескопов с главным сферическим зеркалом является телескоп Хобби-Эберли (диаметр

главного зеркала $D=9.2$ м; угловое поле $2\omega=6'$; относительное отверстие $D/f'=1:4.7$) [3]. В работе [4] описывается и анализируется схема телескопа с главным сферическим сегментированным зеркалом, диаметр которого 25 м. Фокусное расстояние телескопа 80 м, угловое поле $21'$. Компенсатор aberrаций сферического зеркала представляется тремя высокоасферическими зеркальными поверхностями. Два варианта оптических схем телескопов с главным сферическим зеркалом и зеркальным корректором полевых aberrаций приведены в работе [5]. Как отмечается в [6], системы из четырех зеркал обладают более рациональным положением изображения, а также обладают достаточным количеством степеней свободы для исправления aberrаций системы. Компен-

сация aberrаций крупногабаритного сферического зеркала с помощью асферического корректора является оптимальным вариантом решения задачи. Цель данной работы – синтез базовых оптических систем на основе теории aberrаций третьего порядка и дальнейшая их численная оптимизация в пакете прикладных программ Zemax. Для получения исходных схем, используется теория aberrаций третьего порядка, подробно расписанная Слюсаревым Г.Г. [7]. На рисунке 1 представлена обобщенная схема четырехзеркальной системы без промежуточного изображения, а на рисунке 2 схема с промежуточным изображением, зеркала обозначены по ходу лучей M1, M2, M3 и M4 соответственно.

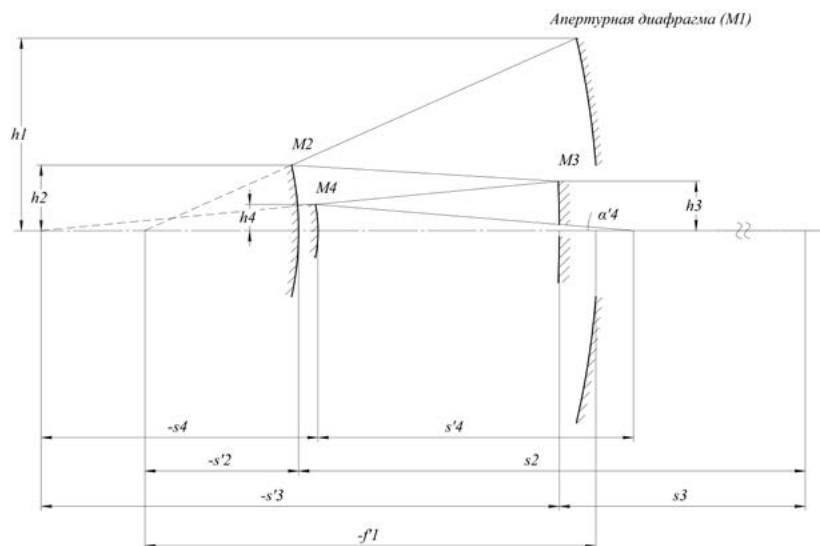


Рисунок 1 – 4-х зеркальный объектив (Вариант А)

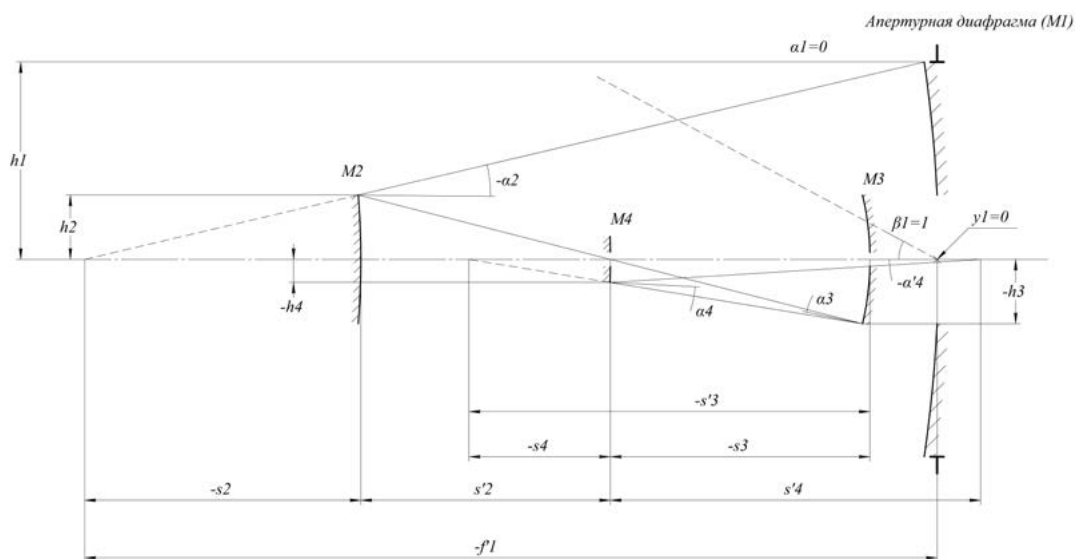


Рисунок 2 – 4-х зеркальный объектив с промежуточным изображением (Вариант Б)

Выражения для сумм и поперечных аберраций зеркальной системы, согласно [7] имеют следующий вид:

$$S_I = \sum h_k(P_k + B_k), \quad (1)$$

$$S_{II} = \sum y_k(P_k + B_k) - J \sum W_k, \quad (2)$$

$$S_{III} = \sum \frac{y_k^2}{h_k}(P_k + B_k) - 2J \sum \frac{y_k}{h_k} W_k + J^2 \sum \frac{1}{h_k} \Delta_k \frac{\alpha}{n}, \quad (3)$$

$$S_{IV} = \sum \frac{1}{h_k} P_k, \quad (4)$$

$$S_V = \sum \frac{y_k^3}{h_k^2}(P_k + B_k) - 3J \sum \frac{y_k^2}{h_k^2} W_k + J^2 \sum \frac{y_k}{h_k^2} \left(3\Delta_k \frac{\alpha}{n} + P_k \right) - J^3 \frac{1}{h_k^2} \Delta_k \frac{1}{n^2}, \quad (5)$$

где h_k – высота апертурного луча на k -й поверхности,

y_k – высота главного луча на k -й поверхности, α_k, α'_k – угол между оптической осью и апертурным лучом на k -й поверхности до отражения (преломления) и после отражения (преломления) соответственно,

n_k – показатель преломления среды,

Δ – разность значений одной и той же величины после отражения (преломления) и до отражения (преломления) на k -й поверхности.

Величина J представляет собой инвариант Лагранжа – Гельмгольца; если передний отрезок системы $s = -\infty$ (предмет располагается в бесконечности), то $J = n'f\alpha/\beta$, где f – переднее фокусное расстояние системы, α', β' – углы апертурного и главного лучей на выходе соответственно. Основные параметры представляют собой следующие выражения:

$$P_k = \left(\frac{\Delta_k \alpha}{\Delta_k \frac{1}{n}} \right)^2 \Delta_k \frac{\alpha}{n}, \quad (6)$$

$$W_k = \frac{\Delta_k \alpha}{\Delta_k \frac{1}{n}} \Delta_k \frac{\alpha}{n}, \quad (7)$$

$$P_k = \frac{\Delta_k(n\alpha)}{nn'}, \quad (8)$$

При наличии в системе асферических поверхностей, в вычислении к величине P добавляется член B , зависящий от деформации поверхности

$$B_k = \frac{h_k^3 k_k}{R_{0k}^3} \Delta_k n, \quad (9)$$

где $k_k = -e^2$ – коническая константа k -й поверхности, R_{0k} – радиус при вершине k -й поверхности.

Увеличения зеркал:

$$m_k = \frac{s'_k}{s_k} = \frac{\alpha_k}{\alpha'_k},$$

где s_k, s'_k – передний и задний отрезки k -го зеркала.

Экранирование зеркал описывается соотношением:

$$p_k = \frac{h_{k+1}}{h_k}$$

Будем рассматривать два случая: в системе нет промежуточного изображения (вариант А), в системе есть промежуточное изображение (вариант Б).

Для варианта А параметры вспомогательных лучей будут иметь следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= 0, & h_1 &= 1, & f'_1 &= 1 \\ \alpha' &= 1, & y_1 &= 0, & \beta &= 1 \end{aligned} \right\}$$

Для варианта Б параметры вспомогательных лучей будут отличаться в знаках последнего угла и фокусного расстояния:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= 0, & h_1 &= 1, & f'_1 &= -1 \\ \alpha' &= -1, & y_1 &= 0, & \beta &= 1 \end{aligned} \right\}$$

Система находится в воздухе, таким образом показатель преломления по ходу луча меняет свой знак после отражения ($n_1 = n'_2 = n_3 = n'_4 = n_5 = 1, n'_1 = n_2 = n'_3 = n_4 = -1$).

Дальнейшие формулы для каждого из вариантов будут отличаться в знаках, однако структура будет схожа, поэтому, при различиях в знаке, знак сверху будет относиться к варианту А, а знак снизу к варианту Б.

Исходя из параметров вспомогательных лучей, получим: $h_2 = p_1, h_3 = p_1 p_2, h_4 = p_1 p_2 p_3$.

Используя формулы параксиальной оптики, выразим параксиальные радиусы зеркал (R_{ok}) и осевые расстояния (d_k) через $p_1, p_2, p_3, m_2, m_3, m_4$.

$$R_{01} = \pm \frac{2}{m_2 m_3 m_4}, R_{02} = \pm \frac{2p_1}{(1+m_2)m_3 m_4}, R_{03} = \pm \frac{2p_1 p_2}{(1+m_3)m_4},$$

$$R_{04} = \pm \frac{2p_1 p_2 p_3}{1+m_4},$$

$$d_1 = \pm \frac{1-p_1}{m_2 m_3 m_4}, d_2 = \pm \frac{p_1(1-p_2)}{m_3 m_4}, d_3 = \pm \frac{p_1 p_2(1-p_3)}{m_4}, d_4 = \pm p_1 p_2 p_3.$$

С помощью формул углов и высот, найдем последовательно выражения для углов и высот 1-го и 2-го вспомогательных лучей:

$$\alpha_1 = 0; \alpha_2 = \pm m_2 m_3 m_4; \alpha_3 = \pm m_3 m_4; \alpha_4 = \pm m_4;$$

$$\alpha'_1 = m_2 m_3 m_4; \alpha'_2 = \pm m_3 m_4; \alpha'_3 = \pm m_4; \alpha'_4 = \pm 1;$$

$$y_1 = 0; y_2 = \pm \frac{p_1 - 1}{m_2 m_3 m_4}; y_3 = \pm \frac{p_1 - 1 - m_2 p_1(p_2 - 1)}{m_2 m_3 m_4};$$

$$y_4 = \pm \frac{(-1 + p_1 - m_2 p_1[-1 + p_2]) + m_2^2 m_3 p_2^2 p_3(-1 + p_4)}{m_2 m_3 m_4[(1 + m_2)(-1 + p_2) + m_2 p_2]} \times [(1 + m_2)(-1 + p_1) + m_2 p_1].$$

Подставив полученные выражения в уравнения (6 - 9), получим выражения для параметров Р, W, П и В:

$$P_1 = \mp \frac{m_2^3 m_3^3 m_4^3}{4}; P_2 = \pm \frac{m_3^3 m_4^3 (m_2 - 1)^2 (m_2 + 1)}{4};$$

$$P_3 = \mp \frac{m_4^3 (m_3 - 1)^2 (1 + m_3)}{4}; P_4 = \pm \frac{(m_4 - 1)^2 (m_4 + 1)}{4};$$

$$W_1 = \frac{(m_2 m_3 m_4)^2}{2}; W_2 = \frac{(m_3 m_4)^2 (1 - m_2^2)}{2};$$

$$W_3 = \frac{m_4^2 (1 - m_3^2)}{2}; W_4 = \frac{1 - m_4^2}{2};$$

$$\Pi_1 = \pm m_2 m_3 m_4; \Pi_2 = \mp (1 + m_2) m_3 m_4;$$

$$\Pi_3 = \pm (m_3 + 1) m_4; \Pi_4 = \mp (m_4 + 1);$$

$$B_1 = 0; B_2 = \pm \frac{k_2 m_3^3 m_4^3 (m_2 + 1)^3}{4};$$

$$B_3 = \mp \frac{k_3 m_4^3 (m_3 + 1)^3}{4}; B_4 = \pm \frac{k_4 (m_4 + 1)^3}{4}.$$

Подставляя полученные выражения в уравнения (1 - 5), принимая во внимание то, что главное зеркало должно сохранять сферическую форму ($k_1=0$), получаем уравнения для аберраций 3-го порядка зеркальной системы, выраженные через параметры $p_1, p_2, p_3, m_2, m_3, m_4$.

$$S_I = \pm \frac{1}{4} [-(m_2 m_3 m_4)^3 + (-1 + m_2)^2 (1 + m_2) (m_3 m_4)^3 p_1 - (-1 + m_3)^2 (1 + m_3) m_4^3 p_1 p_2 + (-1 + m_4)^2 (1 + m_4) p_1 p_2 p_3 + k_2 (1 + m_2)^3 (m_3 m_4)^3 p_2 - k_3 (1 + m_3)^3 m_4^3 p_1 p_2 + k_4 (1 + m_4)^3 p_1 p_2 p_3]; \quad (10)$$

$$S_{II} = \frac{1}{4} (2 + \frac{(1 + m_2)[(-1 + m_2)^2 + k_2(1 + m_2)^2] m_3^2 m_4^2 (-1 + p_1)}{m_2} + \frac{(1 + m_3)[(-1 + m_3)^2 + k_3(1 + m_3)^2] m_4^2 [1 + p_1(-1 + m_2[-1 + p_2])]}{m_2 m_3} + \frac{-[(-1 + p_1 + m_2[-1 + 2p_1])(1 + p_1[-1 + m_2(-1 + p_2)])] + m_2^2 m_3 p_1^2 p_2 (-1 + p_3)}{m_2 m_3 m_4 (-1 + p_1 + m_2[-1 + 2p_1])} \times (1 + m_4)[(-1 + m_4)^2 + k_4(1 + m_4)^2]); \quad (11)$$

$$S_{III} = \frac{1}{4} [\mp 4 m_2 m_3 m_4 \pm \frac{4(1 + m_2) m_3 m_4}{p_1} - \frac{4(-1 + m_2^2) m_3 m_4 (-1 + p_1)}{m_2 p_1} \mp \frac{4(1 + m_3) m_4}{p_1 p_2} \pm \frac{4(1 + m_4)}{p_1 p_2 p_3} \pm \frac{(1 + m_2)[(-1 + m_2)^2 + k_2(1 + m_2)^2] m_3 m_4 (-1 + p_1)^2}{m_2^2 p_1} \pm \frac{4(-1 + m_3^2) m_4 (1 + p_1[-1 + m_2(-1 + p_2)])}{m_2 m_3 p_1 p_2} - \frac{(1 + m_3)[(-1 + m_3)^2 + k_3(1 + m_3)^2] m_4 (1 + p_1[-1 + m_2(-1 + p_2)])^2}{m_2^2 m_3^2 p_1 p_2} + \frac{((-1 + p_1 + m_2[-1 + 2p_1])(1 + p_1[-1 + m_2(-1 + p_2)]) - m_2^2 m_3 p_1^2 p_2 [-1 + p_3])^2}{m_2^2 m_3^2 m_4^2 p_1 (-1 + p_1 + m_2[-1 + 2p_1])^2 p_2 p_3} \times (1 + m_4)[(-1 + m_4)^2 + k_4(1 + m_4)^2] - \frac{-[(-1 + p_1 + m_2(-1 + 2p_1)][1 + p_1(-1 + m_2[-1 + p_2])]) + m_2^2 m_3 p_1^2 p_2 (-1 + p_3)}{m_2 m_3 m_4 p_1 (-1 + p_1 + m_2[-1 + 2p_1]) p_2 p_3} \times 4(-1 + m_4^2)]; \quad (12)$$

$$S_{IV} = \mp \frac{1 - m_4 - (1 + m_3) m_4 p_3 + (1 + m_2) m_3 m_4 p_2 p_3 - m_2 m_3 m_4 p_1 p_2 p_3}{p_1 p_2 p_3}; \quad (13)$$

$$S_V = \frac{2(m_2 + 1)(p_1 - 1)}{m_2 p_1^2} + \frac{2(m_3 + 1)(m_2 p_1 (p_2 - 1) - p_1 + 1)}{m_2 m_3 p_1^2 p_2^2} + \frac{2(m_4 + 1)[m_2^2 m_3 p_1^2 p_2 (p_3 - 1) - (m_2 p_1 + (m_2 + 1)(p_1 - 1))(m_2 p_1 (p_2 - 1) - p_1 + 1)]}{m_2 m_3 m_4 p_1^2 p_2^2 p_3^2 (m_2 p_1 + (m_2 + 1)(p_1 - 1))} \pm \frac{3(1 - m_2^2)(p_1 - 1)^2}{2 m_2^2 p_1^2} \pm \frac{3(1 - m_3^2)(m_2 p_1 (p_2 - 1) - p_1 + 1)^2}{2 m_2^2 m_3^2 p_1^2 p_2^2}$$

$$\begin{aligned}
& \pm \frac{3(1-m_4^2)[m_2^2 m_3 p_1^2 p_2 (p_3 - 1) - (m_2 p_1 + (m_2 + 1)(p_1 - 1))(m_2 p_1 (p_2 - 1) - p_1 + 1)]^2}{2m_2^2 m_3^2 m_4^2 p_1^2 p_2^2 p_3^2 (m_2 p_1 + (m_2 + 1)(p_1 - 1))^2} \\
& + \frac{(m_2 + 1)(p_1 - 1)^3 [k_2 (m_2 + 1)^2 + (m_2 - 1)^2]}{4m_2^3 p_1^2} \\
& + \frac{(m_3 + 1)[k_3 (m_3 + 1)^2 + (m_3 - 1)^2](m_2 p_1 (p_2 - 1) - p_1 + 1)^3}{4m_2^3 m_3^3 p_1^2 p_2^2} \\
& + \frac{[m_2^2 m_3 p_1^2 p_2 (p_3 - 1) - (m_2 p_1 + (m_2 + 1)(p_1 - 1))(m_2 p_1 (p_2 - 1) - p_1 + 1)]^3}{4m_2^3 m_3^3 m_4^3 p_1^2 p_2^2 p_3^2 (m_2 p_1 + (m_2 + 1)(p_1 - 1))^3} \\
& \times (m_4 + 1)[k_4 (m_4 + 1)^2 + (m_4 - 1)^2]. \tag{14}
\end{aligned}$$

Получаем систему из 5-ти уравнений (10-14) и 9-ти неизвестных ($p_1, p_2, p_3, m_2, m_3, m_4, k_2, k_3, k_4$). Последующий этап расчета направлен на уменьшение количества неизвестных параметров, путем задания начального приближения оптической схемы, которое включает в себя предварительную оценку виньетирования (параметры p_1, p_2, p_3) и габаритных ограничений (параметры m_2, m_3, m_4). Затем, принимая $S_I = S_{II} = S_{III} = S_{IV} = S_V = 0$, решаем систему уравнений, получая значения для конических констант ($k_k = -e_k^2$), удовлетворяющее требованию минимизации аберраций третьего порядка. Полученная схема принимается за базовую, на основе которой проводится дальнейшее масштабирование системы и её оптимизация. В качестве исходных оптических параметров принимаем: фокусное расстояние системы $f' = 9000$ мм; угловое поле системы $2\omega = 0.42^\circ$;

относительное отверстие $D/f' = 1:6$; центральное экранирование $k_{\text{эк}} \leq 0.33$.

Оптимизация начальных схем была проведена в пакете прикладных программ Zemax. Основным критерием качества изображения был размер пятна рассеяния. После оптимизации были получены конфигурации с различными ключевыми аспектами, такими как габаритные характеристики, конструктивная сложность коррекционной системы, технологические параметры: схема 1 телескопа без промежуточного изображения, продольные габариты $L = 1160$ мм; схема 2 телескопа с промежуточным изображением, продольные габариты $L = 1500$ мм.

Оптические схемы, а также диаграммы пятен рассеяния представлены на рисунках 3 и 4.

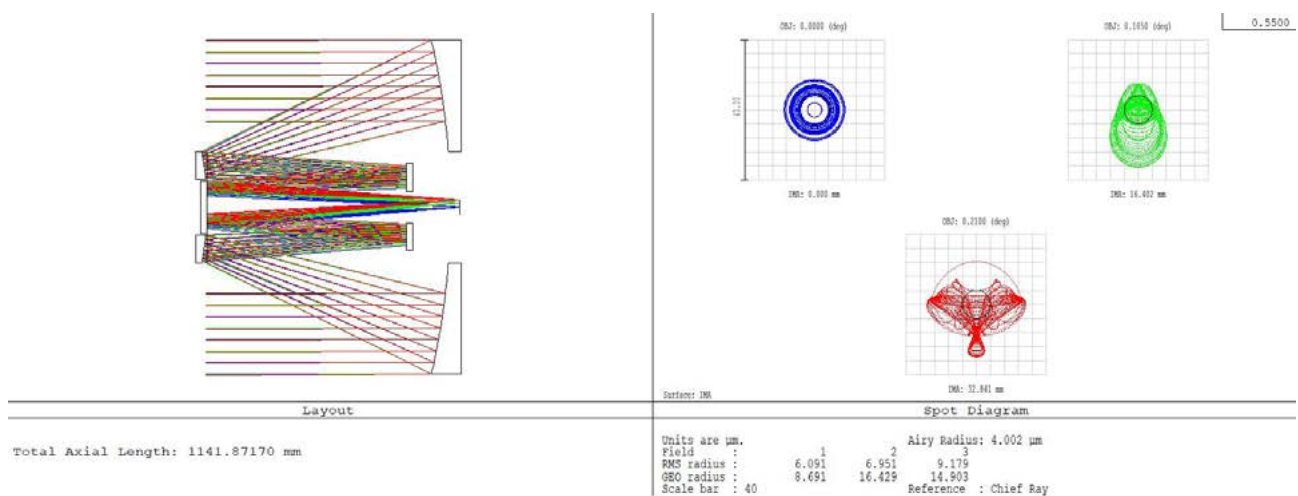


Рисунок 3 – Оптическая схема телескопа и его диаграммы пятен рассеяния (схема 1)

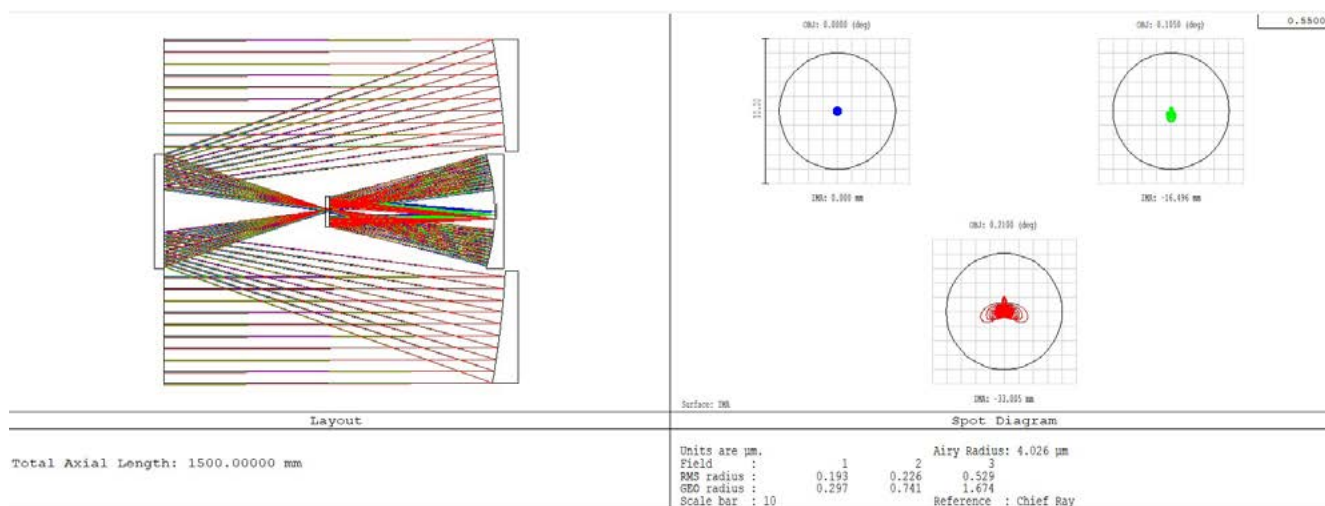


Рисунок 4 – Оптическая схема телескопа и его диаграммы пятен рассеяния (схема 2)

Метод, основанный на теории аберраций 3-х порядков, для получения исходной схемы с последующей её оптимизацией показывает положительные результаты и позволяет получать системы различных конфигураций. Полученные конфигурации демонстрируют различия по следующим ключевым аспектам: габаритные характеристики, конструктивная сложность коррекционной системы, технологические параметры. Полученный набор оптических решений позволяет найти компромисс между этими аспектами.

Результаты работы показывают возможность создания относительно недорогого телескопа для наблюдения космических объектов в видимой и инфракрасной области спектра, что позволяет в дальнейшем создать сеть подобных телескопов для мониторинга космического пространства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Daniil T. Puryayev and Alexander V. Goncharov «Aplanatic four-mirror system for optical telescopes with a spherical primary mirror», *Optical Engineering* 37(8), (1 August 1998). <https://doi.org/10.1117/1.602031>
2. Daniil T. Puryayev and Alexander V. Goncharov «Compact two-mirror schemes for telescopes with a fast spherical primary», *Optical Engineering* 39(6), (1 June 2000). <https://doi.org/10.1117/1.602546>
3. Robert K. Jungquist «Optical design of the Hobby-Eberly Telescope four-mirror spherical aberration corrector», *Proc. SPIE* 3779, Current

Developments in Optical Design and Optical Engineering VIII, (5 October 1999); <https://doi.org/10.1117/12.368191>

4. Mette Owner-Petersen «Optical design and performance analysis of a 25-m class telescope with a segmented spherical primary», *Proc. SPIE* 2871, *Optical Telescopes of Today and Tomorrow*, (21 March 1997); <https://doi.org/10.1117/12.269087>

5. Дружин В.В., Пуряев Д.Т. Оптическая система апланатического телескопа с главным сферическим зеркалом // *Оптический журнал*. 2024. Т. 91. № 4. С. 60–72. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-04-60-72>

6. Wilson, R. N. *Reflecting Telescope Optics I: Basic Design Theory and its Historical Development* / R. N. Wilson. — 2nd ed. — Berlin, Helderberg : Springer, 2004. — 570 p.

7. Слюсарев, Г. Г. *Методы расчета оптических систем* / Г. Г. Слюсарев. — 2-е изд. — Ленинград : Машиностроение, 1969. — 672 с.

УДК 681.78

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ДВУХОСНОГО ОПОРНО-ПОВОРОТНОГО УСТРОЙСТВА С ПРЕЦИЗИОННЫМ КОНТУРОМ НАВЕДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПЬЕЗОПРИВОДА

*Рафил Мухтарович Алеев¹ – д-р техн. наук
Вячеслав Владимирович Мурашкин² – канд. техн. наук*

Максим Александрович Чижиков¹

АО «НПК «СПП»,

¹osp-kazan@npg-spp.ru, ²mvv@npg-spp.ru

В статье представлена разработка двухконтурной системы автоматического управления опорно-поворотным устройством с прецизионным контуром управления на основе пьезопривода, позволяющей проводить моделирование режимов автоматического наведения и сопровождения движущихся объектов. Математическая модель динамики двухосевого опорно-поворотного устройства представлена в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений Лагранжа второго рода в обобщённых координатах, описывающих состояние механической системы в каждый момент времени. Усилия приводов опорно-поворотного устройства представлены в виде обобщённых сил.

Ключевые слова: *опорно-поворотное устройство, математическая модель, оптико-электронная система на подвижном основании, система автоматического управления, объект интереса.*

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A DYNAMIC MATHEMATICAL MODEL OF THE OF A TWO-AXIS POSITIONING MOUNT WITH A PRECISION GUIDANCE LOOP BASED ON A PIEZOELECTRIC DRIVE

Rafil M. Aleev¹ - Dr. Sc. (Technology)

Viacheslav V. Murashkin² - Cand. Sc.

(Technology)

Maksim A. Chizhikov¹

JSC «RPC «PSI»,

¹osp-kazan@npg-spp.ru, ²mvv@npg-spp.ru

The article presents the development of a two-loop automatic control system for a positioning mount with a precision control loop based on a piezo drive, which enables modeling of automatic

pointing and tracking modes for moving objects. The mathematical model of the dynamics of the two-axis positioning mount is represented as a system of nonlinear differential Lagrange equations of the second kind in generalized coordinates, describing the state of the mechanical system at each point in time. The efforts of the positioning mount's drives are represented as generalized forces.

Key words: *positioning mount, mathematical model, optical-electronic system on a movable base, automatic control system, object of interest.*

В связи с развитием космической лазерной системы связи возникла необходимость рационального выбора элементной базы двухосного ОПУ с прецизионным контуром управления на основе пьезопривода для задач взаимного слежения за подвижными объектами интереса с требуемыми динамическими характеристиками. Синтез системы автоматического управления ОПУ с прецизионным контуром управления на основе пьезопривода, моделирование режимов наведения и слежения за подвижным объектом интереса. Для массово-габаритных и оптических характеристик конкретного телескопа, с помощью математической модели определяются требования к конструкции ОПУ, элементной базе и рабочим областям частот грубого и прецизионного контуров системы управления. Угловое разрешение, достигаемое в современных бортовых и наземных оптико-электронных комплексах на уровне единиц угловых секунд, предъявляет серьёзные требования к системам наведения и управления линией визирования. Как правило, для таких систем недостаточно одного контура и поэтому включают дополнительные – прецизионные контуры управления. Цель работы – синтез двухконтурной системы автоматического управления ОПУ с прецизионным контуром управления на основе пьезопривода, моделирование режимов наведения и слежения за подвижным объектом интереса. Для решения поставленной задачи разработана и исследо-

вана математическая модель (ММ) динамики двухосного ОПУ, с прецизионным контуром наведения на основе зеркала с пьезоприводом в режимах автоматического наведения и сопровождения осью визирования телескопа, устанавливаемого в ОПУ. ММ динамики двухосного ОПУ представляется в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений Лагранжа 2-ого рода в обобщенных координатах, описывающих состояние механической системы в каждый момент времени, усилия приводов ОПУ при этом представляются обобщенными силами. Механическая модель системы, представляется в виде взаимодействующих четырех твердых тел движущихся относительно инерциальной системы координат $o_0x_0y_0z_0$ (рисунок 1), связанной с Землей [5]. Ось o_0y_0 направлена по вертикали. Оси $c_1x_1y_1z_1$ – подвижная система координат, связанная с несущим телом 1. Точка c_1 – центр масс носителя, ось c_1x_1 – его продольная строительная ось. Положение осей $c_1x_1y_1z_1$ относительно осей $o_0x_0y_0z_0$ определяется радиус-вектором $r_{c1}(t) = (X_1(t), Y_1(t), Z_1(t))^T$ и углами $\varphi_1(t)$ – крен, $\psi_1(t)$ – курс, $\theta_1(t)$ – тангаж, которые в данной задаче являются заданными функциями времени (рисунок 1), вследствие малого влияния ОПУ на носитель.

Матрица перехода от осей координат $o_0x_0y_0z_0$ к осям $c_1x_1y_1z_1$ определяется следующим образом:

$$\mathbf{a}_{01} = \mathbf{a}_{\varphi 1} \mathbf{a}_{\theta 1} \mathbf{a}_{\psi 1},$$

$$\mathbf{a}_{\varphi 1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_1 & \sin \varphi_1 \\ 0 & -\sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{a}_{\theta 1} = \begin{pmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 & 0 \\ -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{a}_{\psi 1} = \begin{pmatrix} \cos \psi_1 & 0 & -\sin \psi_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \psi_1 & 0 & \cos \psi_1 \end{pmatrix}.$$

Система координат $o_2x_2y_2z_2$ связана с телом 2 (курсовая рамка ОПУ). Точка o_2 – лежит на его оси вращения и определяется постоянным в системе координат $c_1x_1y_1z_1$ вектором $r_{o2} = (x_{o2}, y_{o2}, z_{o2})^T$, а оси o_2x_2, o_2y_2, o_2z_2 направлены вдоль его осей симметрии. Угловое положение тела 2 по отношению к телу 1 определяется переменным углом ψ_2 (рисунок 1).

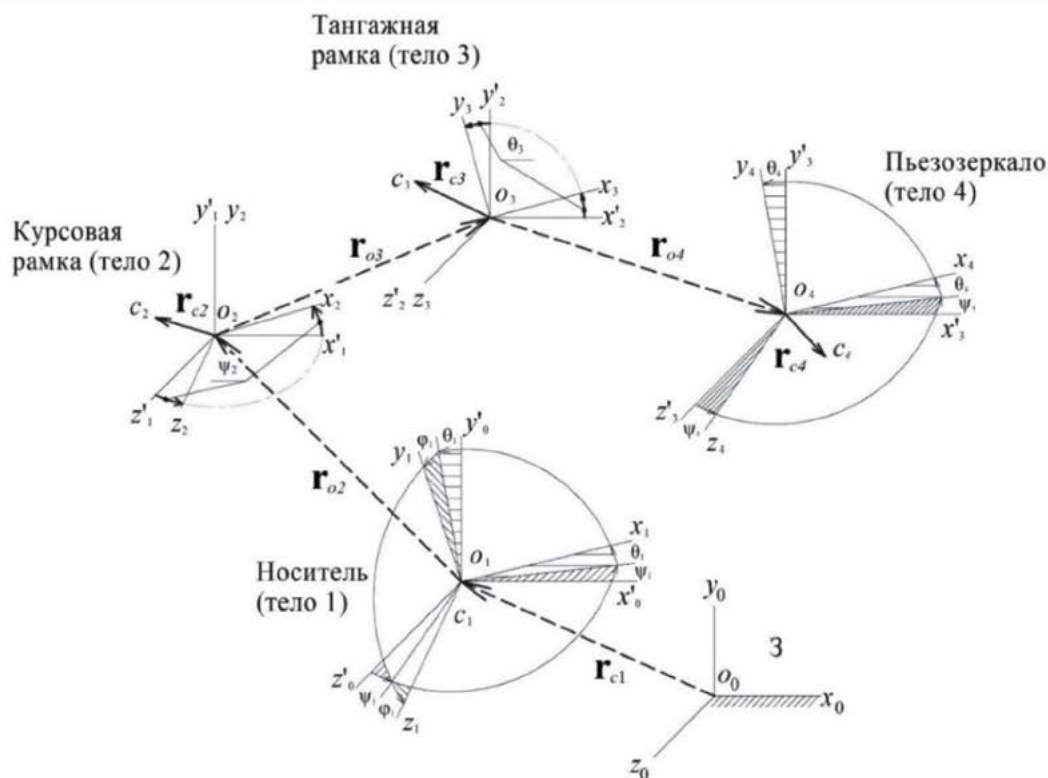


Рисунок 1 — Системы координат механической модели ОПУ

Постоянный в осях $o_2x_2y_2z_2$ вектор $r_{c2}=(x_{c2}, y_{c2}, z_{c2})^T$ определяет положение центра масс тела 2. Матрица перехода от осей $o_1x_1y_1z_1$ к осям $o_2x_2y_2z_2$ запишется следующим образом:

$$a_{12} = \begin{pmatrix} \cos \psi_2 & 0 & -\sin \psi_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \psi_2 & 0 & \cos \psi_2 \end{pmatrix}.$$

Система координат $o_3x_3y_3z_3$ связана с телом 3 (тангажная рамка ОПУ). Точка o_3 — лежит на его оси вращения и определяется постоянным в системе координат $o_2x_2y_2z_2$ вектором $r_{o3}=(x_{o3}, y_{o3}, z_{o3})^T$, а оси o_3x_3, o_3y_3, o_3z_3 направлены вдоль его осей симметрии. Угловое положение тела 3 по отношению к телу 2 определяется переменным углом ψ_2 (рисунок 1).

Постоянный в осях $o_3x_3y_3z_3$ вектор $r_{c3}=(x_{c3}, y_{c3}, z_{c3})^T$ определяет положение центра масс тела 3. Матрица перехода от осей $o_2x_2y_2z_2$ к осям $o_3x_3y_3z_3$ запишется в виде:

$$a_{23} = \begin{pmatrix} \cos \theta_3 & \sin \theta_3 & 0 \\ -\sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Система координат $o_4x_4y_4z_4$ связана с телом 4 (пьезозеркало). Точка o_4 — лежит на его оси вращения и определяется постоянным по отношению к осям $o_3x_3y_3z_3$ вектором $r_{o4}=(x_{o4}, y_{o4}, z_{o4})^T$, а оси o_4x_4, o_4y_4, o_4z_4 направлены вдоль его осей симметрии. Угловое положение тела 4 по отношению к телу 3 определяется переменными углами θ_4 и ψ_4 (рисунок 1).

Постоянный в осях $o_4x_4y_4z_4$ вектор $r_{c4}=(x_{c4}, y_{c4}, z_{c4})^T$ определяет положение центра масс тела 4. Матрица перехода от осей $o_3x_3y_3z_3$ к осям $o_4x_4y_4z_4$ с учетом угла в 45° между нормалью пьезозеркала и вертикальной осью o_3y_3 запишется следующим образом:

$$a_{34} = \begin{pmatrix} \cos(\pi/4) & \sin(\pi/4) & 0 \\ -\sin(\pi/4) & \cos(\pi/4) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & \sin \theta_4 & -\sin \psi_4 \\ \sin \theta_4 & 1 & 0 \\ \sin \psi_4 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Математическую модель системы, имеющей 4 степени свободы, представим в виде дифференциальных уравнений Лагранжа второго рода [3] в обобщенных координатах: $q=(\psi_2, \theta_3, \psi_4, \theta_4)^T$.

Уравнения Лагранжа имеют вид:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i - \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_i}, (i=1 \div 4), \quad (1)$$

где

T — кинетическая энергия системы, равная сумме кинетических энергий взаимодействующих тел;

Π и Φ — соответственно потенциальная энергия и диссипативная функция Релея;

Q_i — обобщенные силы, представляющие собой моменты, развиваемые управляющими двигателями, приложенные к соответствующим рамкам и моменты трения в подшипниках осей вращения рамок.

Согласно [1] кинетические энергии тел ($2 \div 4$) могут быть представлены рекуррентными формулами вида:

$$T_j = 1/2 m_j \cdot \mathbf{V}_{oj}^T \cdot \mathbf{V}_{oj} + m_j \cdot \mathbf{\Omega}_j^T \cdot \mathbf{R}_{oj} \cdot \mathbf{a}_{j-1,j} \cdot \mathbf{V}_{oj} + 1/2 \mathbf{\Omega}_j^T \cdot \mathbf{J}_j \cdot \mathbf{\Omega}_j, (j=2 \div 4), \quad (2)$$

где m_j — масса j -ого тела;

$\mathbf{V}_{oj} = \mathbf{a}_{j-2,j-1} \cdot \mathbf{V}_{oj-1} + \mathbf{R}_{oj} \cdot \mathbf{\Omega}_{j-1}$ — абсолютная скорость точки o_j ;

$\mathbf{V}_{c1} = (\dot{X}_1, \dot{Y}_1, \dot{Z}_1)$ — абсолютная скорость центра масс тела 1;

$\mathbf{\Omega}_1$ — абсолютная угловая скорость тела 1 в проекциях на связанные с ним оси:

$$\mathbf{\Omega}_1 = \begin{pmatrix} \dot{\phi}_1 + \dot{\psi}_1 \sin \theta_1 \\ \dot{\theta}_1 \sin \phi_1 + \dot{\psi}_1 \cos \phi_1 \cos \theta_1 \\ \dot{\theta}_1 \cos \phi_1 - \dot{\psi}_1 \sin \phi_1 \cos \theta_1 \end{pmatrix};$$

$\mathbf{\Omega}_j = \omega_j + \mathbf{a}_{j-1,j} \cdot \mathbf{\Omega}_{j-1}$ — проекция абсолютной угловой скорости j -ого тела ($j=2 \div 4$) на оси, связанные с ним;

ω_j — угловая скорость j -ого тела ($j=2 \div 4$) относительно тела $j-1$;

$\mathbf{J}_j$ — тензор инерции j -ого тела относительно точки o_j в осях $o_jx_jy_jz_j$;

$\mathbf{R}_{oj}$ и $\mathbf{R}_{cj}$ — матрицы соответствующих координат точек o_j и центров масс тел;

$\mathbf{a}_{j-1,j}$ — матрица перехода от осей координат $o_{j-1}x_{j-1}y_{j-1}z_{j-1}$ к осям $o_jx_jy_jz_j$.

$$\mathbf{J}_j = \begin{pmatrix} J_{xx_j} & -J_{xy_j} & -J_{xz_j} \\ -J_{xy_j} & J_{yy_j} & -J_{yz_j} \\ -J_{xz_j} & -J_{yz_j} & J_{zz_j} \end{pmatrix}; \mathbf{R}_{oj} = \begin{pmatrix} 0 & -z_{oj} & y_{oj} \\ z_{oj} & 0 & -x_{oj} \\ -y_{oj} & x_{oj} & 0 \end{pmatrix}; \mathbf{R}_{cj} = \begin{pmatrix} 0 & -z_{cj} & y_{cj} \\ z_{cj} & 0 & -x_{cj} \\ -y_{cj} & x_{cj} & 0 \end{pmatrix}.$$

Пьезоп привод обеспечивает разворот по двум взаимно ортогональным осям, состоит из корпуса и подвижной платформы, упруго закрепленной на нем, с четырьмя пьезоэлектрическими актюаторами между ними по два актюатора на ось, работающими в режиме тяни-толкай. На рисунке 2 показана механическая модель пьезопривода по одной из осей.

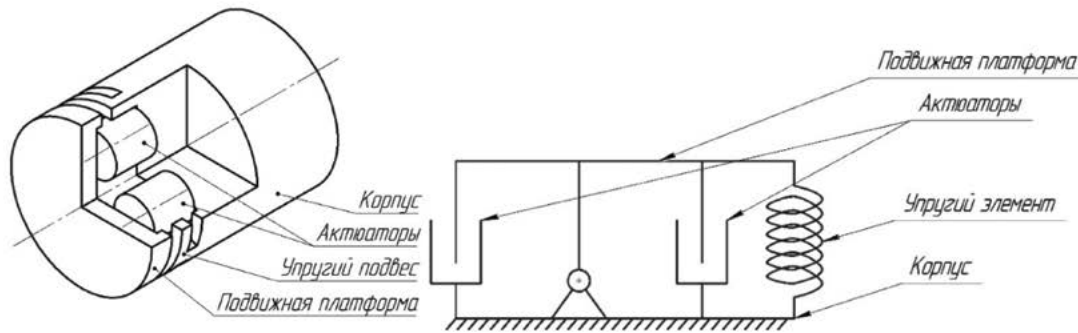


Рисунок 2 — Устройство пьезопривода и его механическая модель

Потенциальную энергию ОПУ представим в виде потенциальной энергии сил упругости подвеса пьезопривода, считая, при этом, её равной нулю в положении статического равновесия. Тогда потенциальная энергия и функция Релея, зависящая от скоростей деформаций упругого подвеса, запишутся в виде:

$$\Pi = 1/2 K_y (\psi_3^2 + \theta_4^2), \quad (3)$$

$$\Phi = 1/2 K_\phi (\dot{\psi}_3^2 + \dot{\theta}_4^2), \quad (4)$$

где K_y , K_ϕ — коэффициенты упругости и демпфирования подвеса пьезопривода.

Производя необходимые математические преобразования над кинетической энергией (2), потенциальной энергией (3) и функцией Релея (4) предписанные уравнениями (1), получим уравнения движения механической части системы:

$$\mathbf{A}(\mathbf{q}) \cdot \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{A}_0(\mathbf{q}_0, \mathbf{q}) \cdot \dot{\mathbf{q}}_0 + \mathbf{N}(\mathbf{q}_0, \mathbf{q}) \cdot \mathbf{n} + \mathbf{B} \cdot \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{C} \cdot \mathbf{q} = \mathbf{F}(\mathbf{q}_0, \mathbf{q}) + \mathbf{M} \quad (5)$$

где $\mathbf{q}_0$ — вектор координат движения носителя; $\mathbf{n}$ — вектор, составленный из первых производных обобщенных координат и координат движения носителя;

$\mathbf{A}(\mathbf{q})$, $\mathbf{A}_0(\mathbf{q}_0, \mathbf{q})$, $\mathbf{N}(\mathbf{q}_0, \mathbf{q})$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{C}$ — матрицы коэффициентов;

$\mathbf{F}(\mathbf{q}_0, \mathbf{q})$ — вектор-момент, обусловленный действием силы тяжести;

$\mathbf{M}$ — вектор-момент управляющих двигателей, моментов трения, приложенных к соответствующим рамкам ОПУ.

Момент привода описывается уравнениями двигателя постоянного тока [4]:

$$\begin{cases} u = R \cdot i + L \cdot di/dt + k_e \cdot \omega \\ M = k_m \cdot i \end{cases},$$

где L и R — индуктивность и сопротивление якорной цепи;

i — ток якоря;

k_e и k_m — коэффициенты пропорциональности между угловой скоростью вращения и обратной э. д. с., между током якоря и вращающим моментом соответственно.

Синтез системы автоматического управления, как и ранее [5] проводится для частного случая движения механической системы по одному из каналов. Такую систему можно получить из уравнения (1) при следующих предположениях: $\varphi_1=0$, $\psi_1=0$, $z_{o2}=0$, $\psi_2=0$, $\psi_4=0$, $\mathbf{q}_0=(X_1(t), Y_1(t), \theta_1(t))^T$, получаем дифференциальное уравнение движения ОПУ, имеющего две степени свободы в обобщенных координатах $\mathbf{q}'=(\theta_3, \theta_4)^T$:

упруго-вязкими силами между тангажной рамкой и зеркалом;

M_f – момент возмущения.

Высшая частота работы системы управления ограничена датчиком рассогласования. Низшая частота ограничена необходимой скоростью протекания переходных процессов и установившейся ошибкой системы.

Система управления внешними рамками строится по общепринятому для прецизионных систем принципу подчиненного регулирования. Внутренний контур управления по скорости при этом настраивается на модульный оптимум (астатизм первого порядка), внешний контур управления по углу на симметричный оптимум (астатизм второго порядка), обеспечивающий нулевую ошибку по скорости. Задача системы управления грубым контуром, как и в [5] сводится к минимизации амплитуды отклонений от состояния равновесия прецизионного контура – пьезопривода.

В дальнейшем для записи дифференциальных уравнений и передаточных функций, для удобства частотного анализа системы автоматического управления, будет использована символьная запись с оператором дифференцирования $p=d/dt$, который соответствует комплексной переменной $s+j\omega$ в преобразовании Лапласа.

Передаточная функция контура, настроенного на симметричный оптимум, с помощью регулятора приводится к виду [4]:

$$W(p) = \frac{K(\tau \cdot p + 1)}{(T \cdot p + 1)p^2}, \quad K = 1/(8T^2), \quad \tau = 4 \cdot T, \quad \omega_c = K \cdot \tau, \quad (7)$$

где K – коэффициент добротности по ускорению;

T и τ – постоянные времени;

ω_c – частота среза контура.

Передаточная функция контура управления, настроенного на модульный оптимум, приводится к виду [4]:

$$W(p) = \frac{K}{(T \cdot p + 1)p}, \quad K = 1/2T, \quad \omega_c = K. \quad (8)$$

Система управления пьезозеркалом обеспечивает слежение за изображением объекта интереса по сигналу с датчика рассогласования и состоит из одного контура, настроенного на

модульный оптимум. Передаточную функцию отдельного пьезопривода можно представить в виде [2]:

$$W_n(p) = \frac{1}{T_e \cdot p + 1} \frac{Ko/Ky}{\left(T_m^2 \cdot p^2 + \frac{Ky}{K\delta} \cdot p + 1\right)},$$

где Ko – коэффициент обратного пьезоэффекта; Ky , $K\delta$ – коэффициенты упругости и демпфирования пьезопривода;

T_e – постоянная времени электрической цепи пьезопривода;

T_m – механическая постоянная времени пьезопривода.

Таблица 1 – Параметры контуров

Контур	K	T	τ	ω_c
Пьезопривода	Kп	Tп	–	ω_p
По скорости привода рамки	K1	T1	–	ω_1
По углу привода рамки	K2	–	τ_2	ω_2

Тогда параметры контуров можно связать следующими выражениями:

$$\begin{aligned} K_n &= \omega_n, & K_1 &= 4\omega_2, & K_2 &= (\omega_n/50)^2/2 \\ T_n &= 1/(8K_n), & T_1 &= 1/(4K_1), & \tau_2 &= \sqrt{2/K_2} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\omega_1 = K_1, \quad \omega_2 = K_2 \cdot \tau_2$$

Некоторые параметры регуляторов отличаются от приведенных в (7, 8) для повышения запасов устойчивости системы. Тогда передаточные функции регуляторов запишутся следующим образом:

$$W_n(p) = \frac{K_n/(Ko/Ky)(T_e \cdot p + 1)}{(T_n \cdot p + 1) \cdot p},$$

$$W_1(p) = \frac{K_1 \cdot k_m \cdot (T_m \cdot p + 1)}{(T_1 \cdot p + 1) \cdot p},$$

$$W_2(p) = \frac{K_2 \cdot (\tau_2 \cdot p + 1)}{p}, \quad (10)$$

где T_m – механическая постоянная времени грубого контура.

На рисунке 4 в логарифмическом масштабе приведены амплитудные и фазовые частотные характеристики разомкнутой системы управления (рисунок 2) по сигналу α к положению линии визирования ($\theta_3 + 1/4\theta_4$), коэффициент обратной связи по ошибке наведения $K_d = 100$, $x_d = 0.007$ мм, $m_d = 0.035$ кг.

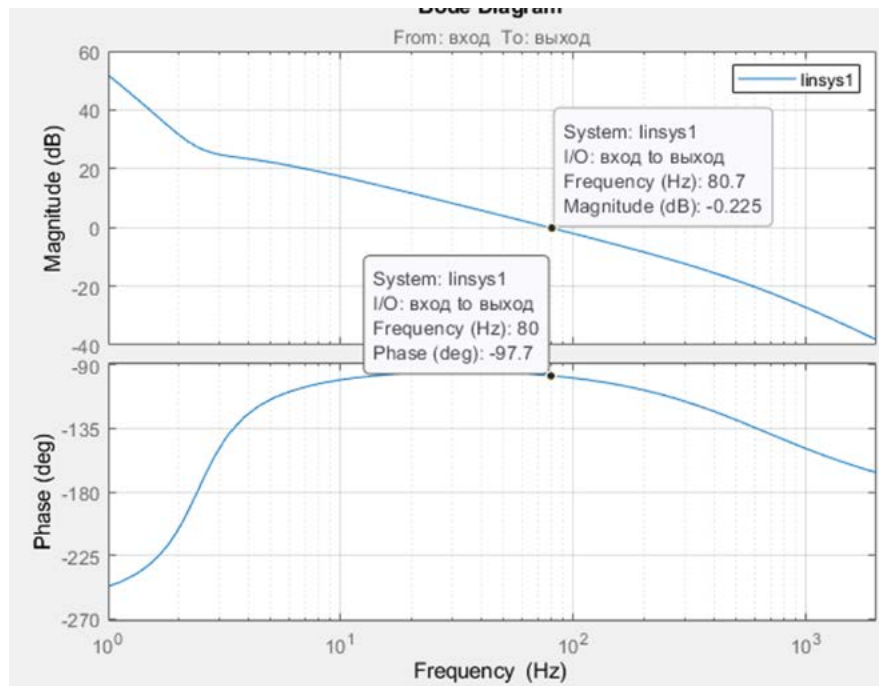


Рисунок 4 – Логарифмические амплитудно-частотная и логарифмическая фазочастотная характеристики разомкнутой системы управления

Настройка контуров по каналу курса происходит аналогично вышеизложенной, за исключением того, что коэффициент K_3 , связывающий отклонение оптической оси с углом поворота пьезопривода по курсу равен $1/(8\cos(\pi/4))$.

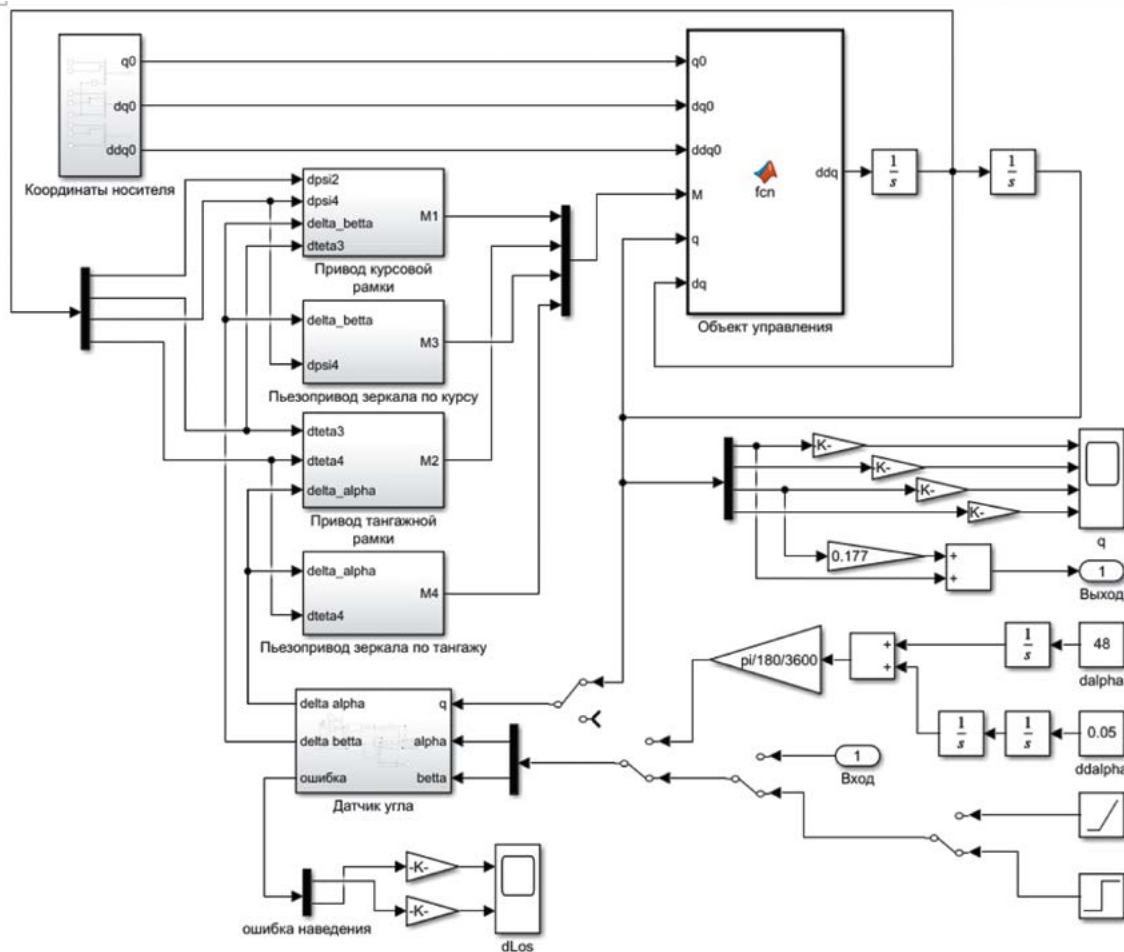


Рисунок 5 — Схема моделирования ОПУ в Matlab

На рисунке 6 приведены результаты моделирования пространственной модели ОПУ установленного неподвижно на Земле в режиме слежения за небесным телом при следующих параметрах движения объекта интереса:

$$X_1(t) = 6,37 \cdot 10^6 \sin(72,9 \cdot 10^{-6} t), \text{ м}; \quad Y_1(t) = 6,37 \cdot 10^6 \cos(72,9 \cdot 10^{-6} t), \text{ м}; \quad Z_1(t) = 0, \text{ м};$$

$$\varphi_1(0) = 0, \text{ рад}, \quad \dot{\varphi}_1(t) = 0, \text{ рад/с}; \quad \psi_1(0) = 0, \text{ рад}, \quad \dot{\psi}_1(t) = 0, \text{ рад/с}; \quad \theta_1(0) = 0, \text{ рад},$$

$$\dot{\theta}_1(t) = 72,9 \cdot 10^{-6}, \text{ рад/с}; \quad \alpha(t) = \beta(t) = \int 0,8' dt + \iint 0,05'' dt dt.$$

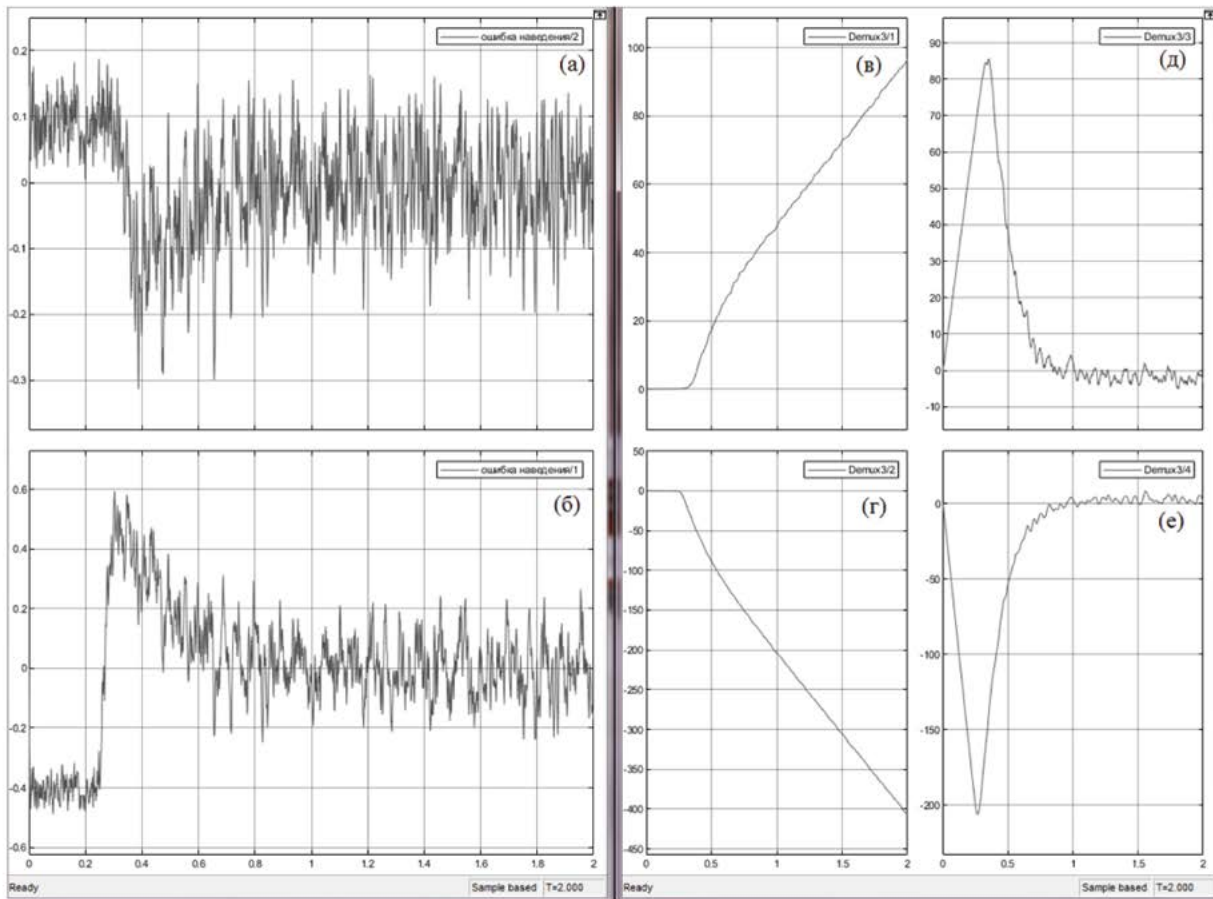


Рисунок 6 — Результат моделирования режима слежения, $\omega_n = 80 \text{ Гц}$, (а) – ошибка наведения по углу ψ , (б) – 2 ошибка наведения по углу θ , (в) – ψ_2 , (г) – θ_3 , (д) – ψ_4 , (е) – θ_4

По результатам моделирования видно, что система управления обеспечивает слежение за объектом интереса и стабилизацию линии визирования с погрешностью, не более 0.5 угловых секунд без ухода пьезопривода в насыщение. Разработана математическая модель движения ОПУ, позволяющая моделировать работу систем управления при любом заданном взаимном перемещении носителя ОПУ и объекта интереса. Предложенная схема построения системы управления 2-х осным ОПУ позволяет добиться погрешности наведения линии визирования телескопа не более заданной.

Для массово-габаритных и оптических характеристик конкретного телескопа, с помощью математической модели определяются требования к конструкции ОПУ, элементной базе и рабочим областям частот грубого и прецизионного контуров системы управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абакумов Г. Е., Бородин В. М. Вычисление коэффициентов линейных уравнений движения системы твердых и гибких тел на ЭВМ // Межвузовский сборник. Устойчивость и управление; Издательство Казанского авиа-

ционного института. 1985. с 60-65.

2. Бобцов А.А., Бойков В.И., Быстров С.В., Григорьев В.В. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений. – СПб ГУ ИТМО, 2011. - 131 с.

3. Тарг С. М. Краткий курс теоретической механики: Учеб. для втузов. - 10-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш. шк., 1986. - 416 с., ил.

4. Р.М. Алеев, В.М. Бородин, И.О. Спиридонов, М.А. Чижиков. Разработка и исследование математической модели динамики 4-осной стабилизированной платформы с полезной оптико-электронной нагрузкой // Проблемы машиностроения и автоматизации 2017. № 1. С. 57.

УДК 681.783.3

**РАЗРАБОТКА ОБЪЕКТИВА ДЛЯ ДИАПАЗОНА ВОЛН ОТ 550 нм ДО 850 нм
С ПРИМЕНЕНИЕМ УЗКОПОЛОСНЫХ ФИЛЬТРОВ**

*Алексей Юрьевич Новиков¹,
Максим Александрович Чижиков¹
Роман Константинович Лозов²*

*АО «НПК «СПП», ¹osp-kazan@nprk-spp.ru,
²info@nprk-spp.ru*

В статье представлена оптическая система для получения оптических дифракционных изображений в диапазоне от 550 нм до 850 нм с применением узкополосных фильтров для длин волн 780 нм и 830 нм. Проведена разработка конструктива оптической системы для изготовления опытного образца. Объектив состоит из материалов отечественного производства без применения асферических поверхностей.

Ключевые слова: видимый диапазон, инфракрасный диапазон, матричное фотоприемное устройство, малые космические аппараты, системы наведения, лазерные линии связи.

**DEVELOPMENT OF A LENS FOR
THE WAVELENGTH RANGE FROM 550 nm
TO 850 nm USING NARROW-BAND FILTERS**

*Aleksei Yu. Novikov¹
Maksim A. Chizhikov¹
Roman K. Lozov²*

*JC «RPC «PSI», ¹osp-kazan@nprk-spp.ru,
²info@nprk-spp.ru*

The article presents an optical system for obtaining optical diffraction images in the range from 550 nm to 850 nm using narrow-band filters for wavelengths of 780 nm and 830 nm. The design of the optical system for manufacturing a prototype has been developed. The lens consists of domestically produced materials without the use of aspherical surfaces.

Key words: visible range, infrared range, matrix photodetector, thermophysical processes, small spacecraft, guidance systems, communication lines.

Развитие систем космической связи ставит задачи взаимного наведения и поддержания линий связи между малыми космическими

аппаратами и наземными терминалами лазерной связи. Для практического решения подобных задач необходимы оптические системы способные обеспечить ориентирование по звездному небу и наведение по узкополосным маякам бортовых терминалов на малых космических аппаратах. В связи с реализацией проектов по обеспечению оптических линий связи с малыми космическими аппаратами возникла необходимость разработки объектива ориентирования и наведения наземной станции, работающего в широком спектральном диапазоне от 550 нм до 850 нм.

В данной статье представлена оптическая система для получения оптических дифракционных изображений в диапазоне от 550 нм до 850 нм и с применением узкополосных фильтров для длин волн 780 нм и 830 нм. Проведена разработка конструктива оптической системы для изготовления опытного образца. Объектив рассчитан на спектральный диапазон от 550 до 850 нм под матричный фотоприемник с числом элементов 2048×2048, с размером фоточувствительного элемента 11×11 мкм, линейным размером изображения 22.5×22.5 мм. Состоит из трех компонентов с общим количеством линз 5 шт. Первый и второй компонент неподвижны, третий – перемещаемый вдоль оптической оси. Длина объектива 230 мм. Перемещение подвижного компонента обеспечивает фокусировку для компенсации перепадов атмосферного давления, фокусировку для изменения рабочего спектрального диапазона от 550 до 850 нм, 780 нм, 830 нм. Объектив состоит из материалов отечественного производства без применения асферики. Это линзы марок СТК8, ТФ5, ТК21, Ф1. Материалы корпуса (преимущественно сплавы на основе алюминия и титана) и конструкция объектива подобраны таким образом, что качество изображения сохраняется при перепаде температур в диапазоне от минус 40 °С до плюс 40 °С.

Основные параметры приведены в таблице 1. На рисунке 1 – приведена кривизна поля и дисторсия, на рисунке 2 – график поперечных

аббераций, на рисунке 3 – диаграмма абберационных кружков, на рисунке 4 – расположение компонентов на схеме, на рисунке 5 – изображение объектива в конструктиве.

Таблица 1 – Технические параметры оптической системы

Параметр	Значение
Фокусное расстояние, мм	257.4
Диаметр входного зрачка, мм	60
Относительное отверстие	1:4.3
Угловое поле зрения, °	5
Линейное поле зрения, мм	22.5×22.5
Спектральный диапазон, нм	от 550 до 850
Рабочие длины волн, нм	780; 830 от 550 до 850
Полная длина системы, мм	230
Общая масса линз, кг	0.38
Дисторсия, %	0.12
Положение апертурной диафрагмы, пов.	9
Количество линз	5
Количество линз асферик	Нет
Диапазон перемещений подвижного компонента, мм	2

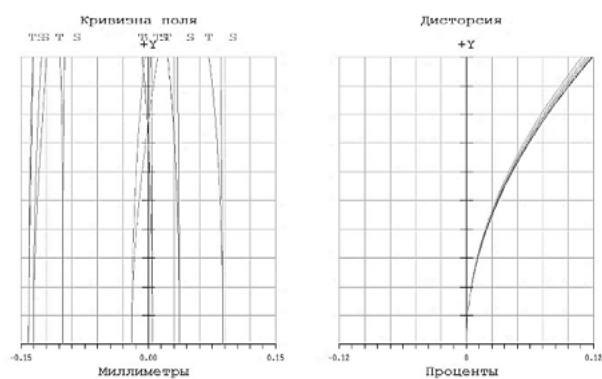


Рисунок 1 – Кривизна поля и дисторсия

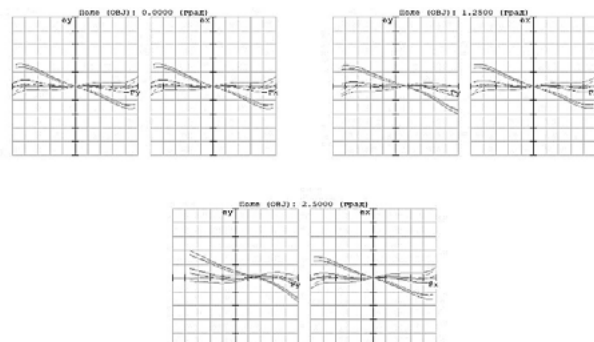


Рисунок 2 – График поперечных aberrаций

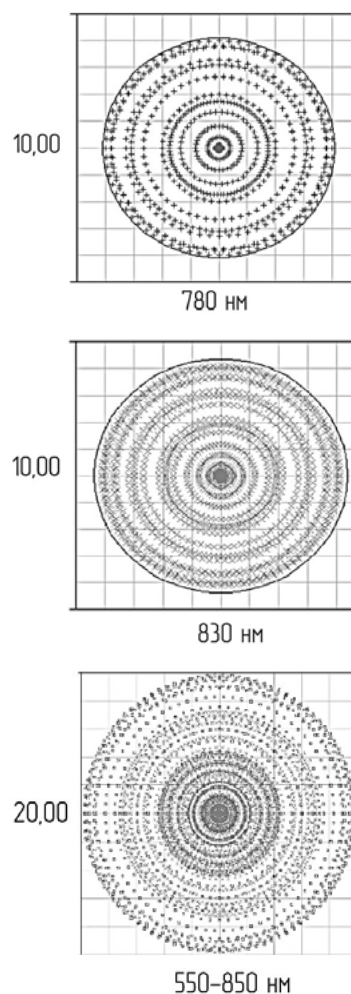


Рисунок 3 – Диаграмма абберационных кружков

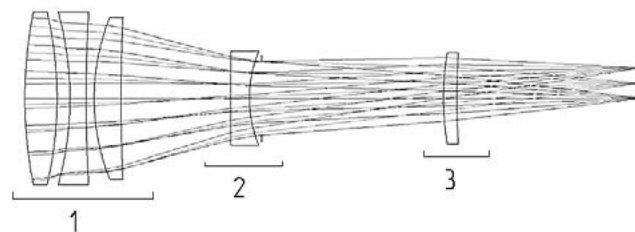


Рисунок 4 – Схема оптическая



Рисунок 5 – Конструктив объектива

Произведен расчет оптической системы термостатированного технологического объектива, имеющего дифракционное качество в диапазоне от 550 нм до 850 нм для матричного фотоприёмного устройства с числом элементов 2048×2048, с размером фоточувствительного элемента 11×11 мкм, линейным размером

изображения 22.5×22.5 мм.

Для данной оптической системы разработана конструкторская документация, изготовлен опытный образец, проведены работы в составе наземной части комплекса лазерной связи, подтверждающие технические характеристики расчетной модели оптической системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Zemax, Optical design program. User`s guide. Руководство пользователя пакетом программ Zemax. Перевод с английского. А.Э. Наджип. 2000. - 479 стр.*
2. *Проектирование оптико-электронных приборов: [Учебник для техникумов / А. С. Елизаренко, Ю. Б. Парвулюсов, В. П. Солдатов, Ю. Г. Якушенков]; под ред. Ю. Г. Якушенкова. - Москва: Машиностроение, 1981. - 263 с.*
3. *Основы конструирования оптических приборов [Учеб. пособие для опт. спец. вузов] / В. В. Кулагин. — Ленинград: Машиностроение, Ленингр. отд., 1982. - 312 с.*
4. *Справочник конструктора оптико-механических приборов М.Я. Кругер, В.А. Панов, В.В. Кулагин, Г.В. Погарев, Я.М. Кругер, А.М. Левинзон / Издательство «Машиностроение» Ленинград 1968. 760 стр.*

УДК 535.317.2

ПЕРЕДАЧА КВАНТОВЫХ СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АТМОСФЕРНОЙ ТРАССЫ. ВАРИАНТ ПОСТРОЕНИЯ ЛИНЗОВОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ.

*Рафил Мухтарович Алеев¹ – д-р техн. наук
Владимир Николаевич Григорьев²
Алексей Владимирович Леонтьев¹
Максим Александрович Чижиков¹
Алексей Юрьевич Новиков¹*

*АО «НПК «СПП», ¹osp-kazan@npg-spp.ru,
²info@npg-spp.ru*

В последние годы наблюдается активное развитие квантовых коммуникаций, сопровождающееся достижением ряда выдающихся результатов. Современные исследования в данной области в значительной степени сосредоточены на инженерных аспектах, направленных на повышение дальности и скорости передачи квантовой информации. Однако, несмотря на значительные успехи, существует ряд фундаментальных проблем, препятствующих дальнейшему прогрессу. Одной из ключевых проблем является расхождение между идеализированными теоретическими моделями и реальными экспериментальными схемами. Это расхождение обусловлено множеством факторов, включая несовершенство оборудования, потери сигнала и другие технические ограничения. Для преодоления этих трудностей требуется проведение более сложных и детализированных расчетов, учитывающих все аспекты функционирования квантовых систем.

Ключевые слова: *инфракрасный диапазон, волоконная оптика, атмосферная вставка, системы наведения, квантовые линии связи, квантовая оптика, лазерные линии связи.*

TRANSMISSION OF QUANTUM SIGNALS USING ATMOSPHERIC PATH. OPTION FOR CONSTRUCTING A LENS OPTICAL SYSTEM

*Rafil M. Aleev¹ – Dr. Sc. (Technology)
Vladimir N. Grigoriev²
Aleksey V. Leontiev¹
Maksim A. Chizhikov¹
Aleksey Yu. Novikov¹*

*JSC «RPC «PSI», ¹osp-kazan@npg-spp.ru,
²info@npg-spp.ru*

In recent years, quantum communications have been actively developing, accompanied by a number of outstanding results. Modern research in this area is largely focused on engineering aspects aimed at increasing the range and speed of quantum information transmission. However, despite significant success, there are a number of fundamental problems that hinder further progress. One of the key problems is the discrepancy between idealized theoretical models and real experimental schemes. This discrepancy is due to many factors, including equipment imperfections, signal losses, and other technical limitations. To overcome these difficulties, more complex and detailed calculations are required that take into account all aspects of the functioning of quantum systems.

Key words: *IR range, fiber optics, atmospheric insertion, guidance systems, quantum communication lines, quantum optics, laser communication lines.*

Особое внимание в исследованиях уделяется проблеме передачи квантового сигнала в свободном пространстве, что представляет собой сложную техническую задачу. В отличие от волоконно-оптических линий связи, использование которых значительно упрощает процесс передачи, передача квантового сигнала без оптических волокон требует разработки новых методов и технологий. Таким образом, развитие квантовых коммуникаций продолжает сталкиваться с рядом вызовов, требующих глубоких теоретических и экспериментальных исследований. Однако, благодаря усилиям научного сообщества, прогресс в данной области продолжает ускоряться, открывая новые возможности для применения квантовых технологий в различных сферах. В рамках данного исследования предлагается разработка и анализ оптической системы, предназначенной для передачи сигналов в двух аналогичных по составу компонентов и при этом независимых каналах: канале данных и канале наведения, функционирующих на различных длинах волн в диапазоне от 750 нм до 1590 нм.

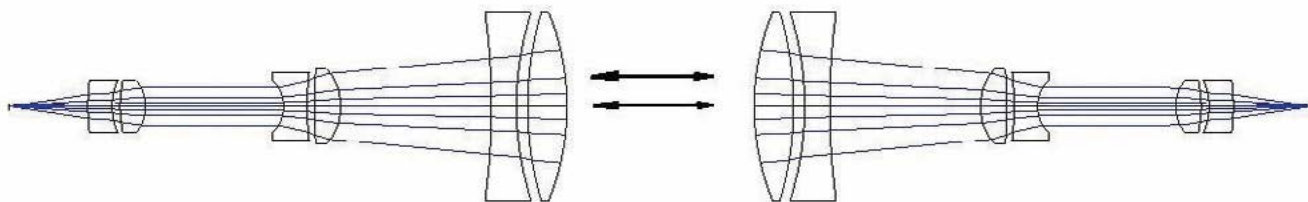


Рисунок 1 — Атмосферный канал квантовой связи

Особое внимание уделяется передаче сигналов на расстояние до 50 метров через атмосферную вставку канала квантовой связи (рисунок 1), при этом минимизируя оптические потери без преобразований. Нижняя граница эффективности передачи сигнала между передающим и приемным блоками должна составлять не менее 10%. Для достижения поставленной цели необходимо разработать оптическую систему, обеспечивающую формирование узконаправленного пучка на рабочей длине волны, с последующей максимально точной фокусировкой излучения передатчика на торце одномодового волокна приемного канала типа SMF-28. Важно отметить, что излучение, исходящее с торца одномодового волокна, представляет собой гауссов пучок, с центром перетяжки, совпадающим с торцом волокна. С учетом требований к эффективности передачи сигналов, необходимо осуществить ахроматизацию оптических систем как в передающем, так и в приемном блоках, для обеспечения равномерной передачи в спектральных диапазонах 750-850 нм, 1300 нм, 1550 нм и 1590 нм. Это позволит минимизировать влияние дисперсионных эффектов на качество передаваемых сигналов и обеспечить стабильную работу системы в различных условиях эксплуатации.

Произведен расчет оптической системы технологического объектива, имеющего ахроматизацию в диапазоне от 750 нм до 1590 нм. На рисунке 2 представлена диаграмма пятна рассеяния (размер 10 мкм) с параметрами GEO – радиус круга с центром в опорной точке и RMS – среднеквадратическая величина радиального пятна рассеяния равными 4.85 мкм и 3.48 мкм соответственно.

На рисунке 3 представлен график зависимости плотности излучения (ось Y) на торце приемного волокна от величины отклонения

координаты пятна рассеяния от центра пятна рассеяния (ось X). Расчетная эффективность для оптической системы с коэффициентом пропускания оптики равной единицы: эффективность передающей системы – 0.97, эффективность приёмника – 0.70; совместная эффективность – 0.679 (-1.61 dB).

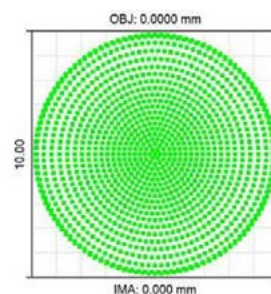


Рисунок 2 — Диаграмма пятна рассеяния

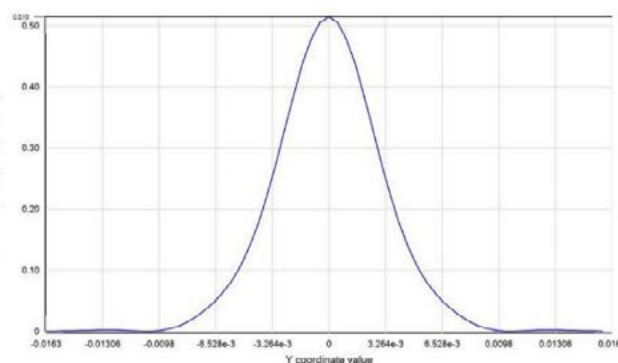


Рисунок 3 — Эффективность передачи данных через атмосферную вставку

Для данной оптической системы разработана конструкторская документация, изготовлен макетный образец, проведены работы в лабораторных условиях, подтверждающие технические характеристики расчетной модели оптической системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.В. Глейм, «Оптико-электронная система квантовой передачи информации на боко-

вых частотах модулированного излучения с компенсацией неконтролируемого изменения поляризации и оптической синхронизацией», Автореферат, 2015.

2. Б. Милинкис, В. Петров, «Атмосферная лазерная связь», ИНФОРМОСТ-Радиоэлектроника и Телекоммуникации № 5 (18), 2001.

3. Zemax, Optical design program. User`s guide. Руководство пользователя пакетом программ Zemax. Перевод с английского. А.Э. Наджип. 2000. - 479 стр.

4. Проектирование оптико-электронных приборов: [Учебник для техникумов // А. С. Елизаренко, Ю. Б. Парвулюсов, В. П. Солдатов, Ю. Г. Якушенков]; под ред. Ю. Г. Якушенкова. - Москва: Машиностроение, 1981. - 263 с.

5. Основы конструирования оптических приборов [Учеб. пособие для опт. спец. вузов] / В. В. Кулагин. — Ленинград: Машиностроение, Ленингр. отд., 1982. - 312 с.

6. Справочник конструктора оптико-механических приборов М.Я. Кругер, В.А. Панов, В.В. Кулагин, Г.В. Погарев, Я.М. Кругер, А.М. Левинзон // Издательство «Машиностроение» Ленинград 1968. 760 стр.

ОПТИМИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ГЛАВНОГО ТЕЛЕСКОПА ИНФРАКРАСНОГО РАДИОМЕТРА

Игорь Александрович Боголюбов

Владимир Николаевич Мокшанов

Юрий Вадимович Бажанов – д-р техн. наук.

АО «НПК «СПП», otdel110@nprk-spp.ru

Наземный инфракрасный радиопеленгатор должен обеспечивать высокое пространственное разрешение в широком поле обзора. Это компромиссная задача, которая ранее решалась путем добавления в схему радиометра сканирующих систем. Актуальным является вопрос увеличения поля радиометра при сохранении пространственного разрешения и при пониженных требованиях к сканирующей системе или вовсе ее отсутствии. В таком случае поле ограничивает оптическая система главного телескопа, следовательно, вопрос о пределах поля главного телескопа инфракрасного радиометра является актуальным.

Ключевые слова: Радиометр, оптические характеристики, угловое поле, инфракрасная техника.

THE MAIN TELESCOPE OPTICAL SYSTEM OF THE INFRARED RADIOMETER OPTIMIZATION

Igor A. Bogolyubov

Vladimir N. Mokshanov

Yury V. Bazhanov - Dr. Sc. (Technology)

JSC «RPC «PSI», otdel110@nprk-spp.ru

A ground-based infrared radio direction finder should provide high spatial resolution in a wide field of view. This is a compromise task that was previously solved by adding scanning systems to the radiometer circuit. The issue of increasing the radiometer field is relevant, while maintaining spatial resolution and with reduced requirements for the scanning system or even its absence. In this case, the field is limited by the optical system of the main telescope, therefore the question of the field limits of the main telescope of the infrared radiometer is relevant.

Key words: radiometer, optical characteristics, field, infrared technology.

Инфракрасный радиометр работающий в режиме пеленгатора должен обладать значительным полем обзора для решения задачи по обнаружению и дальнейшему сопровождению подвижного объекта наблюдения (ОН), положение которого в пространстве заранее неизвестно или известно с невысокой точностью. Мгновенное поле такого радиометра должно быть минимальным для максимизации отношения сигнал/шум, повышения вероятности обнаружения ОН, проведения сигнальных измерений ОН. Указанные требования противоречат друг другу и ведут к компромиссному решению при выборе схемы главного телескопа радиометра-пеленгатора. Главной особенностью приема сигнала в тепловом LWIR (long wave infrared) диапазоне является необходимость выделения очень низкого сигнала на очень высоком фоне, поэтому в главном телескопе инфракрасного (ИК) радиометра, кроме прочего, принимаются меры для уменьшения углового размера элемента приемника, что ведет к уменьшению фона, приходящего на элемент, и увеличению диаметра входного зрачка для увеличения полезного сигнала. Для того чтобы получить значимое превышение полезного сигнала над фоном применяются многоэлементные фотоприемные устройства (МФПУ) с очень высоким динамическим диапазоном [1]. Ранее этому условию соответствовали приёмники на основе фоторезисторов. Например, в работе [2] указывается, что приёмник на основе германия, легированного ртутью, и охлаждаемый жидким гелием до криогенных температур 20К лучше всего подходит для регистрации ОН в тепловом диапазоне. Для получения контрастного теплового изображения, на котором может быть выделен полезный сигнал от ОН, необходимо выполнять операцию вычитания фона [3]. Эта операция выполняется автоматически, если в телескопе обеспечено сканирование монтировкой, а в электронном тракте исключается постоянная составляющая. По такому принципу построен главный телескоп [4, с. 287], имеющий поле зрения LWIR канала 1°. Досто-

инство системы заключается в том, что сканирование монтировкой телескопа может обеспечить значительное поле обзора при малом мгновенном угловом поле элемента разрешения, однако при зависимом времени накопления от частоты сканирования. Недостатком такой системы является низкая частота кадров (на уровне единиц герц), а также необходимость использования сложных систем сканирования, схем синхронизации и обеспечения внешними криогенными системами. Развитие рынка ИК-техники стимулировало появление коммерчески доступных, высококачественных матричных охлаждаемых МФПУ с низкой неоднородностью чувствительности. Благодаря этому матричными МФПУ стали оснащаться ИК телескопы наземного базирования. В России примером является телескоп астрономического класса АЗТ-33ИК диаметром 1.6 м и полем ИК канала 0.1° , особенностью которого является конструкция LWIR канала с охлаждаемым МФПУ и полностью охлаждаемой оптикой [5], при этом в телескопе предусмотрена возможность качания вторичного зеркала в целях модуляции сигнального потока. Как указывается в [6] это сделано для того, чтобы при вычитании фона учитывать его непостоянство, что имеет место при работе в реальных условиях. В работах [5,7] приводятся результаты наблюдения LWIR каналом космических объектов в различных условиях работы телескопа, из которых следует, что динамический учет фона, значительно повышает качество изображения слабоконтрастного ОН.

В настоящей работе мы рассматриваем специализированный ИК радиометр наземного базирования и рассматриваем возможность повышения поля главного телескопа для того, чтобы избежать недостатков, связанных с необходимостью использования сканирования монтировкой или вторичным зеркалом и при этом сохранить преимущество в виде малого углового размера элемента. Матричные МФПУ LWIR диапазона работают с охлаждаемой диафрагмой, оптически сопряженной со входным зрачком телескопа, что сразу же ограничивает оптические характеристики главного телескопа соотношением

$$\omega D = \frac{y' D'}{\Delta} = \text{const}, \quad (1)$$

где:

ω – угловое поле;

D – диаметр входного зрачка главного телескопа;

y' – диагональ чувствительной площадки приемника излучения;

D' – диаметр холодной диафрагмы приёмника излучения;

Δ – расстояние между холодной диафрагмой и чувствительной площадкой,

откуда следует, что единственной возможностью повысить угловое поле ω при заданном МФПУ и при выбранном диаметре входного зрачка D является деление поля на части между несколькими такими МФПУ [8]. Для того, чтобы иметь возможность распределить угловое поле по нескольким МФПУ, главный телескоп должен быть рассчитан из условия обеспечения полного выбранного поля. Считается, что в оптическом диапазоне телескопы метрового класса являются широкоугольными, когда их угловое поле достигает 3° . Примером такого телескопа является АЗТ-33ВМ, работающий в видимом и ближнем ИК-диапазоне [9]. Для нас же представляет интерес рассмотреть вопрос о пределах повышения углового поля главного телескопа в тепловом LWIR диапазоне. В дальнейших рассуждениях мы исходим из того, что в качестве корректоров поля применяются германиевые линзы с высоким показателем преломления, возможностью получения асферических поверхностей с микрорельефом, получаемых технологией алмазного микроточения [10], что характерно для современного технологического уровня ИК-техники. На рисунке 2 представлен двухзеркальный телескоп типа Кассегрена с линзовым корректором. Принципы расчета оптической схемы такого класса телескопов хорошо известны [11]. Для нас же представляет интерес рассчитать главный телескоп LWIR диапазона на максимальное поле. При расчёте телескопа воспользуемся следующими ограничениями:

- в качестве корректоров поля используем линзы из германия;
- линзовый корректор располагаем внутри главного зеркала;
- линзовый корректор должен обеспечивать телецентрический ход лучей при обеспеченном качестве изображения;

- коэффициент экранирования телескопа не должен превышать 0.3.

Определим максимальное допустимое поле телескопа из условия равенства диаметра отверстия в главном зеркале размеру получаемого изображения

$$2\omega_{\max} = k_{\varepsilon} D f' \rho, \quad (2)$$

где:

$\omega_{\max}$ – максимальное поле телескопа;

k_{ε} – коэффициент экранирования телескопа;

$D f'$ – относительное отверстие телескопа;

$\rho = 57.2958^\circ/\text{рад}$ – коэффициент перевода из радиан в градусы,

что для величин экранирования 0.3 и относительного отверстия 1:4 даёт величину максимального углового поля $2\omega_{\max} = 4^\circ$.

Проведём расчёт оптической системы телескопа в тонких компонентах для получения конструктивных ограничений на величину фокусного расстояния и положения корректора. Расчёт выполним, исходя из начальных данных и ограничений по таблице 1.

Таблица 1 – Ограничения на расчёт входного телескопа

Диаметр входного зрачка	$D=1100$
Коэффициент экранирования	k_{ε}
Вынос изображения	δ
Относительное отверстие главного зеркала	$D f'_1 = 1:1$

Двухзеркальную систему строим по классической схеме Ричи-Кретьена. Определяем второй угол α_2 , расстояние между зеркалами d , а также радиусы зеркал и квадраты эксцентриситетов r_i , e_i в соответствии с системой (3):

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= \frac{1-k_{\varepsilon}}{d} & d &= \delta - k_{\varepsilon} \\ r_1 &= \frac{2}{\alpha_2} & e_1^2 &= 1 + \frac{2k_{\varepsilon}}{d\alpha_2^3} \\ r_2 &= \frac{2k_{\varepsilon}}{1+\alpha_2} & e_2^2 &= \left(\frac{1-\alpha_2}{1+\alpha_2} \right)^2 + \frac{2}{d(1+\alpha_2)^3} \end{aligned} \quad (3)$$

Поскольку относительное отверстие главного зеркала задано, то диафрагменное число K геометрического относительного отверстия

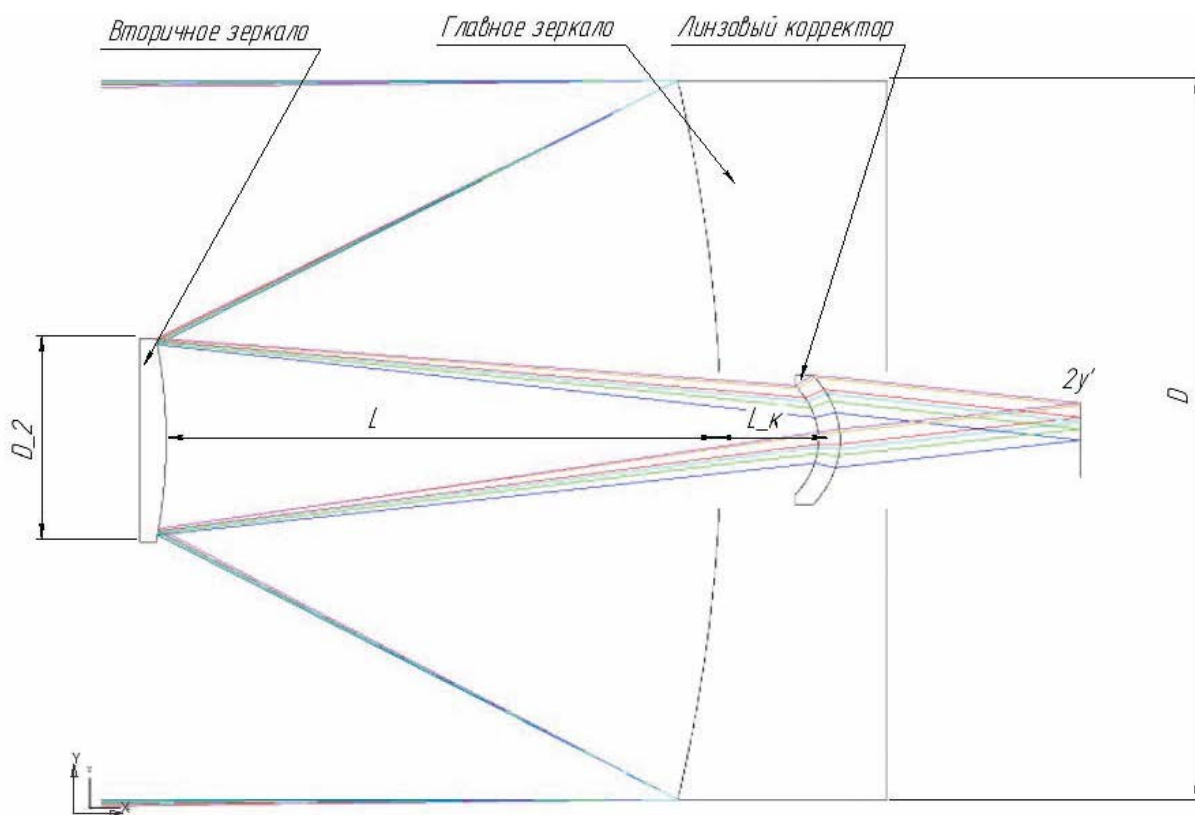


Рисунок 1 – Оптическая схема главного телескопа

всего телескопа определяется как:

$$K = \frac{f'}{D} = -\alpha_2 \quad (4)$$

С учетом (4) ограничение на максимальное поле (2) будет выглядеть

$$2\omega_{\max} = \frac{-k_3}{\alpha_2}. \quad (5)$$

Положение зрачка z'_p относительно поверхности изображения определяется по формуле

$$z'_p = \frac{-k_3}{1+d}. \quad (6)$$

Линзовый корректор, обеспечивающий телецентрический ход главных лучей и коррекцию aberrаций, для простоты вывода формул располагаем в отверстии главного зеркала, поэтому его фокусное расстояние $f'_{\text{лк}}$ определяется по формуле

$$f'_{\text{лк}} = -(z'_p + \delta) = \frac{k_3}{d+1} - \delta. \quad (7)$$

Наличие линзового корректора с положительной оптической силой приводит к изменению диафрагменного числа

$$K' = K \cdot \frac{-(\delta+1)d}{k_3}. \quad (8)$$

Таким образом, на основании формул (3-5, 7, 8) рассчитываем главный телескоп по исходным данным таблицы 1 с определёнными оптическими характеристиками и анализируем их зависимость от коэффициента экранирования и выноса изображения. Табличный расчёт произведён для величин экранирования k_3 0.1; 0.2; 0.3 и пяти значений выноса изображения δ , близкого к нулевой величине, который указан также в миллиметрах δ' .

Таблица 2 - Характеристики главного телескопа при экранировании $k_3 = 0.1$

№	δ	$2\omega_{\max}$ град.	$1:K$	$1:K'$	$f'_{\text{лк}}$, мм	δ' , мм
1	-0.2	1.9	1:3	1:7.2	1131.4	-1584.0
2	-0.1	1.3	1:4.5	1:8.1	1113.8	-891.0
3	-0.05	0.9	1:6	1:8.6	1106.5	-407.3
4	0.0	0.6	1:9	1:9	1100.0	0
5	0.05	0.3	1:18	1:9.5	1094.2	519.8

Таблица 3 – Характеристики главного телескопа при экранировании $k_3 = 0.2$

№	δ	$2\omega_{\max}$ град.	$1:K$	$1:K'$	$f'_{\text{лк}}$, мм	δ' , мм
1	-0.2	5.7	1:2	1:3.2	1173.3	-704.0
2	-0.1	4.3	1:2.7	1:3.6	1131.4	-396.0
3	-0.05	3.6	1:3.2	1:3.8	1114.7	-209.0
4	0.0	2.9	1:4	1:4	1100.0	0
5	0.05	2.149	5.333	4.2	1087.059	231

Таблица 4 – Характеристики главного телескопа при экранировании $k_3 = 0.3$

№	δ	$2\omega_{\max}$ град.	$1:K$	$1:K'$	$f'_{\text{лк}}$, мм	δ' , мм
1	-0.1	9.8	1:1.8	1:2.1	1155.0	-231.0
2	0.0	7.4	1:2.3	1:2.3	1100.0	0
3	0.1	4.9	1:3.5	1:2.6	1058.7	282.3
4	0.15	3.7	1:4.7	1:2.7	1041.8	442.8
5	0.2	2.5	1:7	1:2.8	1026.7	616.0

На основании результатов численных расчетов по таблицам 2–4 можно сделать следующие выводы:

- оптическая сила линзового корректора практически постоянна для всех случаев расчёта, хотя её влияние на результирующее диафрагменное число изменяется в широких пределах;
- вынос плоскости изображения после линзового корректора может быть, как положительным, так и отрицательным и тоже регулируется в широких пределах;
- для того чтобы обеспечить малый коэффициент экранирования при значительном поле, необходимо работать с отрицательным выносом изображения, т.е. работать со мнимым промежуточным изображением;
- широкое поле обеспечивается при высоком коэффициенте экранирования и при положительном выносе изображения, что позволяет установить в плоскости действительного промежуточного изображения систему деления поля.

На рисунке 2 приведены примеры схем главного телескопа с оптическими характеристиками № 3 таблицы 2 и № 3 таблицы 4.

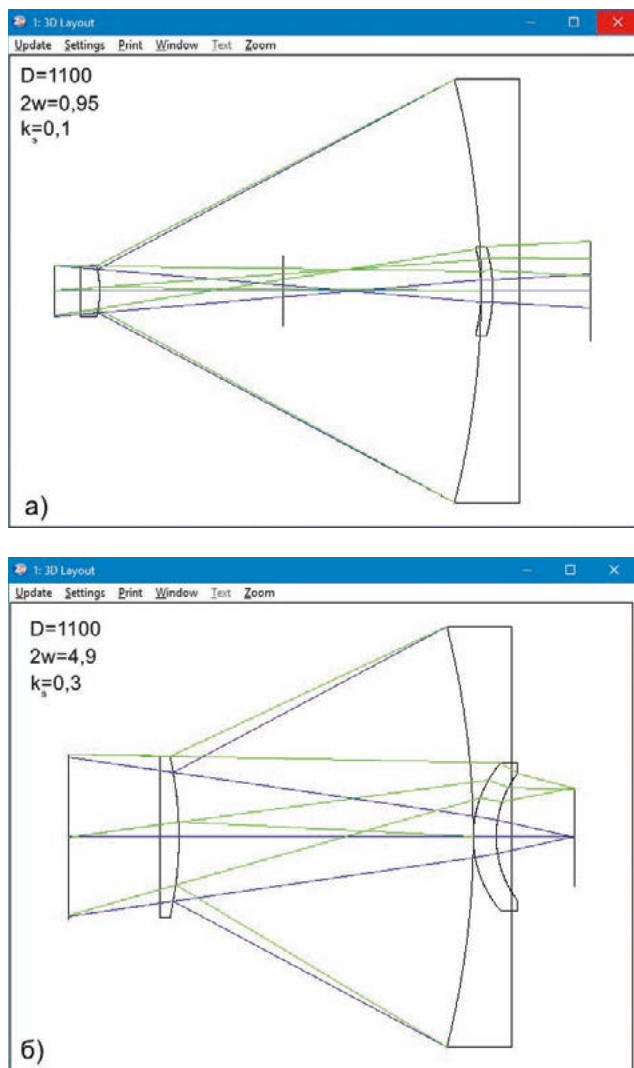


Рисунок 2 — Примеры оптических схем главного телескопа с предельным угловым полем при разных положениях изображения:

- а) Схема с характеристиками № 3 таблицы 2,
б) Схема с характеристиками № 3 таблицы 4.

В настоящем исследовании установлена связь между максимальным полем главного телескопа, его конструктивными параметрами и оптическими характеристиками. В результате расчёта получено, что для обеспечения низкого коэффициента экранирования и приемлемой конструкции главного телескопа необходимо работать с мнимым промежуточным изображением. Получено, что при допустимости повышения экранирования до 0,3 угловое поле главного телескопа может быть увеличено до 4° – 8° .

Результаты настоящего исследования могут быть положены в основу при создании оптической системы наземного многоканального

многофункционального комплекса наземного базирования для сигнальных и траекторных измерений, так как величина полного поля такого радиометра является одной из основных значимых характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Формозов, Б. Н. К вопросу о НЕР матричных ИК-приемников на основе соединений кадмий-ртуть-теллур, полученных молекулярно-лучевой эпитаксией / Б. Н. Формозов // Информация и космос. – 2007. – № 1. – С. 67-68. – EDN KXAJYN.
2. Современное состояние инфракрасных систем наблюдения за космическими объектами с земли / Е. А. Гришин, В. Л. Миловидов, В. Д. Шаргородский // Приборы и техника эксперимента. – 1999. – № 1. – С. 3-17.
3. Выделение сигнала из фоновой помехи в сканирующем ИК фотометре / В. Л. Миловидов // Приборы и техника эксперимента. – 1998. – № 3. – С. 91-93.
4. Солк, С. В. Разработка и исследование технологических методов изготовления, контроля и юстировки оптических элементов и устройств инфракрасных приборов : дис. на соискание уч. степени д-ра техн. наук: 05.11.14 / Солк Сергей Вольдемарович. – СПб. – 2014. – 287 с.
5. Разработка и применение ИК-камеры для регистрации тепловых портретов космических аппаратов / В. И. Тергоев, М. В. Еселевич, Е. В. Клунко, И. В. Коробцев, П. Г. Папушев // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. – 2011. – № 6 (39). – С. 165-169.
6. Широкодиапазонный астрономический телескоп / С. Ф. Камус, В. И. Тергоев, П. Г. Папушев, С. А. Дружинин, Ю. С. Караваев, Ю. М. Палачёв, С. А. Денисенко, Н. А. Липин // Оптический журнал. – 2002. – Т. 69, № 9. – С. 84-87.
7. Наблюдения ТКГ «Прогресс» на оптическом телескопе АЗТ-33ИК / Е. В. Клунко, М. В. Еселевич, В. И. Тергоев // Солнечно-земная физика – 2016. – Т. 2, № 3. – С. 17-23.
8. Optical design of a multiscale imager in 8 to 12 μm spectral band using monocentric lens /

Manish Uniyal, Ranabir Mandal, Pramod Kumar Sharma // Optical Engineering 105104-1 October 2023 Vol. 62(10).

9. *Светосильный широкоугольный телескоп АЗТ-33ВМ / С. А. Денисенко, С. Ф. Камус, Ю. Д. Пименов, В. И. Тергоев, П. Г. Папушев // Оптический журнал. – 2009. – Т. 76, № 10. – С. 48-51.*

10. *Солк, С. В. Обеспечение показателей качества инфракрасных оптико-механических систем [Текст] / С. В. Солк. – СПб.: Политехника-сервис, 2014. – 141, [1] с. : ил., табл.; 21 см.; ISBN 978-5-906555-39-7.*

11. *Запрягаева Л. А. Расчет и проектирование оптических систем / Л. А. Запрягаева, И. С. Свешникова. – Москва: ООО "Издательская группа "Логос", 2000. – 584 с. – ISBN 5-88439-143-9.*

ДЕФОРМАЦИИ ОПОРНЫХ ПОДШИПНИКОВ В КОНСТРУКЦИИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

Дмитрий Никанорович Орлов¹

Алексей Юрьевич Новиков¹

Алексей Андреевич Сретенский²

Владимир Васильевич Сычев²

Антон Евгеньевич Фоломин²

*АО «НПК «СПП», ¹osp-kazan@npk-spp.ru,
²info@npk-spp.ru*

В статье представлено обоснование существенного влияния упругих деформаций опорных подшипников на общую жесткость конструкции на примере расчетов жесткостных параметров высокоточного узла сканирования.

Ключевые слова: *модальный анализ, напряженно-деформированное состояние, упругие деформации, подшипники, собственные колебания конструкции.*

DEFORMATIONS OF SUPPORT BEARINGS IN THE DESIGN OF OPTICAL ELECTRONIC SYSTEMS

Dmitry N. Orlov¹

Aleksey Yu. Novikov¹

Aleksey A. Sretenski²

Vladimir V. Sychev²

Anton E. Folomin²

*JSC «RPC «PSI», ¹osp-kazan@npk-spp.ru,
²info@npk-spp.ru*

The article presents a rationale for the significant influence of elastic deformations of support bearings on the overall rigidity of the structure using the example of calculating the rigidity parameters of a high-precision scanning unit.

Key words: *modal analysis, stress-strain state, elastic deformations, bearings, natural vibrations of structure.*

К конструкции современных оптико-электронных систем (ОЭС) предъявляются высокие жесткостные требования в части стабильности в процессе эксплуатации взаимного положения оптических элементов и формы рабочих поверхностей самих оптических элементов. При этом, жесткостные требования для конструкций высокоточных оптико-электронных

систем предъявляются на уровне угловых секунд. Учет упругих деформаций опорных подшипников повышает точность расчетов жесткости конструкции высокоточных ОЭС (приближенные расчеты, выполненные без учета упругих деформаций опорных подшипников, дают завышенные значения жесткостных параметров и низших частот собственных колебаний конструкции высокоточного узла сканирования). В рамках выполнения расчетов жесткости и прочности конструкции ОЭС рассчитываются:

деформации (прогибы) оптических элементов, характеризующих искажения их рабочих поверхностей;

угловые перемещения рабочих поверхностей оптических элементов, как жестко целых;

линейные перемещения компонент датчиков угла поворота подвижных оптических элементов.

Модальный анализ выполняется с целью определения низших частот собственных колебаний конструкции ОЭС (в соответствии с 4.12 ГОСТ РВ 20.39.304-98 не рекомендуется допускать наличия механического резонанса конструктивных элементов аппаратуры и её блоков в диапазоне до 40 Гц). Жесткость сложных составных конструкций ОЭС, определяется жесткостью всех несущих элементов, включая жесткости узлов сопряжения и опорных подшипников. Наличие зазоров в узлах сопряжения и люфтов в опорных подшипниках может привести к появлению перемещений оптических элементов, кратно превосходящих соответствующие перемещения за счет упругих деформаций элементов всей конструкции. Для устранения этого, в конструкции ОЭС предусматривается предварительная силовая затяжка всех узлов сопряжения составных деталей и опорных подшипников. При этом, целью предварительной силовой затяжки является также достижение наибольшей жесткости, конструктивно возможной для конкретного узла сопряжения или подшипни-

ка. В итоге, все узлы сопряжения составных деталей и опорных подшипников испытывают дополнительную нагрузку предварительными усилиями затяжки, сравнимую по уровню с эксплуатационными нагрузками. Изложенное выше указывает на необходимость учета упругих деформаций узлов сопряжения и опорных подшипников в расчетах жесткости конструкции ОЭС. Это подтверждается и результатами расчетов жесткости конструкций узла сканирования (УС). Выполненные расчеты УС показали следующее:

- влияние упругих деформаций узлов сопряжения на общую жесткость конструкции, в достаточной мере, минимизируются при затяжке узлов сопряжения с усилиями на уровне их допустимых значений (определяются условиями прочности для каждого конкретного узла сопряжения);
- углы поворота сканирующего зеркала за счет упругих деформаций опорных подшипников сравнимы с соответствующими углами поворота зеркала за счет деформаций всех остальных несущих элементов конструкции.

Влияние упругих деформаций опорных подшипников на жесткость конструкции ОЭС рассматривается далее на примере расчетов конструкции высокоточного УС блока оптико-механического.

Внешний вид конструкции узла сканирования изображен на рисунке 1.

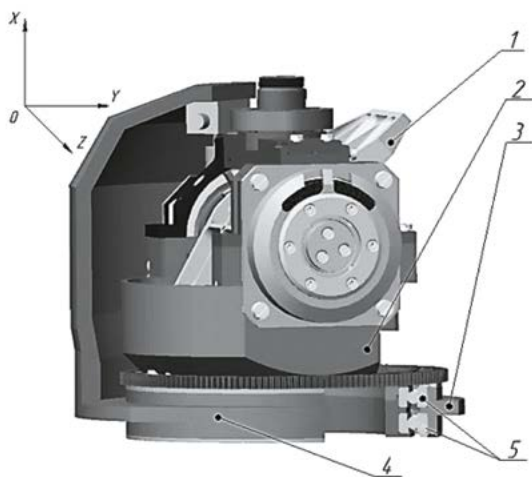


Рисунок 1 – Внешний вид узла сканирования

На рисунке 1 введены следующие обозначения: 1 – узел зеркала, 2 – сборка азимутальная, 3 – корпус неподвижный, 4 – отверстие под винт крепления УС к несущей плите БОМ,

5 – блок подшипников из двух радиально-односторонне упорных подшипников, XYZ – азимутально-угломестно ориентированная декартова система координат конструкции УС (ось X совпадает с азимутальной осью конструкции УС, а ось Z с угломестной). Универсальным методом анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) сложных конструкций является метод конечных элементов. Анализ НДС и модальный анализ конструкции УС выполнены с помощью программы ANSYS, основанной на методе конечных элементов. НДС конструкции УС носит нелинейный характер, обусловленный наличием большого количества нелинейных контактов упругого сопряжения шариков качения (всего шестьдесят шариков в блоке подшипников) с соответствующими кольцами подшипников. С целью сокращения размерности КЭМ, нелинейный анализ НДС конструкции УС выполнялся в два этапа. Нелинейный анализ НДС под-конструкции блока подшипников выполнен отдельно на первом этапе. На втором этапе выполнен анализ НДС конструкции УС с заменой под-конструкции блока подшипников конечными элементами Bushing Joint в системе ANSYS с соответствующими нелинейными характеристиками жесткости, вычисленными на первом этапе анализа. К этому этапу относится расчёт следующих параметров: осевой жесткости в направлении оси OX, радиальной жесткости в направлении оси OY (OZ), угловой жесткости относительно оси OY (OZ). Здесь OX, OY и OZ – оси системы координат под-конструкции блока подшипников. Ось OX совпадает с осью вращения подшипников.

В результате анализа НДС с помощью программы ANSYS в каждом случае нагружения вычислены значения линейных перемещений во всех узлах конечно-элементной модели конструкции. По полученным результатам анализа рассчитаны следующие жесткостные параметры конструкции УС:

- нормальные прогибы рабочей поверхности сканирующего зеркала (СЗ);
- угловые перемещения рабочей поверхности СЗ, как жестко целой (далее углы поворота СЗ);
- линейные перемещения компонент датчиков углов поворота СЗ.

Линейные перемещения компонент датчиков угла вычисляются для определения углов поворота СЗ, считываемых датчиками углов поворота. В рамках модального анализа определены первые шесть низших частот собственных колебаний конструкции УС. Предметом исследования данной статьи является влияние упругих деформаций блока подшипников на углы поворота СЗ и на величины частот собственных колебаний конструкции УС. В таблице 1 приведены результаты расчетов углов поворота СЗ для варианта конструкции УС с предварительным осевым натягом подшипников 50 мкм.

Таблица 1 – Углы поворота СЗ, $\Delta x = 50$ мкм

Нагружение	$\Theta Y \times 10^5$, рад	$\Theta Z \times 10^5$, рад
$a_y = 6.0g$	0.1	-47.9
$a_z = 6.0g$	52.5	-0.9

В таблице указаны результаты для двух максимальных нагружений конструкции УС в направлении координатных осей Y и Z, где: Δx – величина предварительного осевого натяга двух радиально-односторонне упорных подшипников конструкции УС; a_y , a_z – линейные ускорения в направлении координатных осей Y и Z, соответственно; ΘY и ΘZ – углы поворота СЗ относительно координатных осей Y и Z, соответственно; Y и Z – оси системы координат УС. Углы поворота ΘX относительно оси вращения подшипников не рассмотрены, так как они не зависят от жесткостных характеристик блока подшипников. Выполнены тестовые расчеты жесткости конструкции УС без учета деформаций блока подшипников. Для этого в исходных данных (программы ANSYS) жесткостные характеристики блока подшипников заданы на порядок выше его реальных жесткостных характеристик. Результаты сведены в таблицу 2. В ней использованы те же значения ΘY , ΘZ , но без учета упругих деформаций блока подшипников.

Таблица 2 – Углы поворота СЗ без учета деформаций подшипников

Нагружение	$\Theta Y \times 10^5$, рад	$\Theta Z \times 10^5$, рад
$a_y = 6.0g$	0.1	-12.8
$a_z = 6.0g$	17.5	-0.8

Углы поворота СЗ за счет упругих деформаций блока подшипников составят:

$\Delta \Theta Y = \Theta Y - \underline{\Theta Y}$ – относительно координатной оси Y, $\Delta \Theta Z = \Theta Z - \underline{\Theta Z}$ – относительно координатной оси Z. Доли упругих деформаций блока подшипников в углах поворота СЗ (за счет упругих деформаций всей конструкции УС) будут равны: $\Delta \Theta Y / \Theta Y$ – относительно координатной оси Y, $\Delta \Theta Z / \Theta Z$ – относительно координатной оси Z. На основании изложенного выше, определены условные коэффициенты влияния упругих деформаций блока подшипников на углы поворота СЗ, как:

$k_y = 100 \cdot \Delta \Theta Y / \Theta Y$ – относительно координатной оси Y, в процентах;

$k_z = 100 \cdot \Delta \Theta Z / \Theta Z$ – относительно координатной оси Z, в процентах.

Вычислены условные коэффициенты влияния упругих деформаций блока подшипников. Полученные результаты сведены в сравнительную таблицу 3.

Таблица 3 – Сравнительная таблица результатов расчета

$\Delta \Theta Y \times 10^5$, рад	$\Theta Y \times 10^5$, рад	k_y , %	$\Delta \Theta Z \times 10^5$, рад	$\Theta Z \times 10^5$, рад	k_z , %
35	52.5	66.7	-35.1	-47.9	73.3

Из приведенных в таблице 3 результатов расчета следует, что расчетные величины углов поворота СЗ конструкции УС определяются в основном упругими деформациями блока подшипников. При этом, максимальный коэффициент влияния деформаций блока подшипников на угол поворота СЗ составляет

$$k_{max} = k_z = 73,3 \%. \quad (1)$$

В результате модального анализа с помощью программы ANSYS определены значения частот и формы собственных колебаний конструкции УС. Вычислены первые шесть низших частот собственных колебаний конструкции УС. Распечатка результатов модального анализа конструкции УС приведена на рисунке 3. Соответствующая распечатка результатов модального анализа конструкции УС без учета деформаций блока подшипников приведена на рисунке 4.

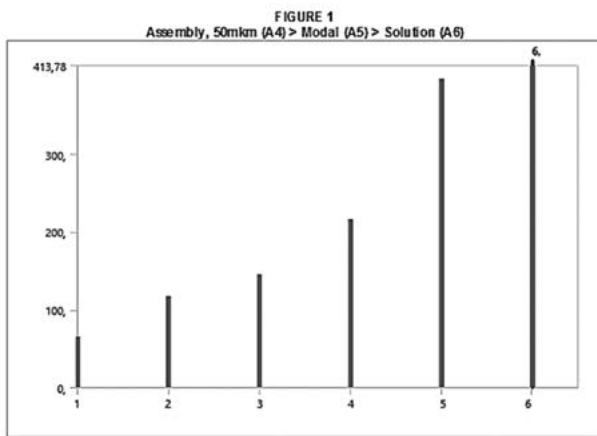


TABLE 38
Assembly, 50mm (A4) > Modal (A5) > Solution (A6)

Mode	Frequency [Hz]
1.	65,007
2.	116,98
3.	144,78
4.	215,65
5.	395,77
6.	413,78

Рисунок 3 — Результат модального анализа конструкции УС. Преднатяг 50 мкм

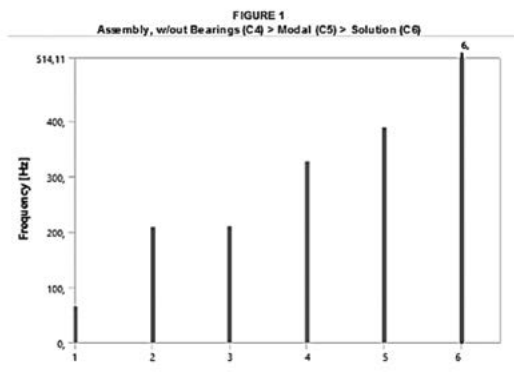


TABLE 38
Assembly, w/out Bearings (C4) > Modal (C5) > Solution (C6)

Mode	Frequency [Hz]
1.	65,316
2.	209,5
3.	209,93
4.	328,64
5.	388,69
6.	514,11

Рисунок 4 — Результат модального анализа конструкции УС без учета упругих деформаций блока подшипников

Приведенные результаты модального анализа показывают, что низшие частоты собственных колебаний конструкции УС с учетом деформаций блока подшипников примерно полутора раза ниже соответствующих частот колебаний при абсолютно жестком подшипнике. Высокие жесткостные требования налагают определенные требования к предварительной затяжке узлов сопряжения несущих элементов и опорных подшипников конструкции оптико-электронных систем. Предварительная затяжка, предназначенная для устранения зазоров и люфтов, существенно влияет на

жесткость узлов сопряжения и опорных подшипников. Наибольшая, конструктивно возможная, жесткость узлов сопряжения и опорных подшипников, обеспечивается предварительной затяжкой наибольшими допустимыми усилиями, определяемыми из условия прочности для каждого конкретного узла. При этом, нагрузки от действия усилий предварительной затяжки достигают уровня эксплуатационных нагрузок на конструкцию оптико-электронных систем. Вследствие этого узлы сопряжения составных силовых элементов и опорные подшипники конструкции будут испытывать дополнительные нагрузки на уровне эксплуатационных нагрузок. Изложенное выше указывает на необходимость учета упругих деформаций узлов сопряжения и опорных подшипников в расчетах жесткости конструкции оптико-электронных систем. На примере расчетов жесткости конструкции узла сканирования определены углы поворота сканирующего зеркала за счет упругих деформаций блока подшипников отдельно и всей конструкции узла сканирования в целом. Полученные результаты расчетов (таблица 3) показали, что расчетные величины углов поворота сканирующего зеркала конструкции узла сканирования определяются в основном упругими деформациями блока подшипников. При этом, максимальный условный коэффициент влияния деформаций блока подшипников на угол поворота сканирующего зеркала превышает 70 %. Наряду с этим, упругие деформации опорных подшипников значительно снижают значения низших частот колебаний конструкции узла сканирования, за исключением первой низшей частоты крутильных колебаний узла сканирования относительно оси вращения подшипников. Таким образом,

в расчетах жесткости конструкции современных высокоточных оптико-электронных систем требуются полноценные расчеты жесткости узлов сопряжения несущих элементов и опорных подшипников в составе всей конструкции оптико-электронных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник конструктора оптико-механических приборов. Под редакцией В.А. Панова, Ленинград, «Машиностроение». 1980 г.

2. *Справочник конструктора точного приборостроения. Под редакцией Ф.Л. Литвина. Москва, Машиностроение, 1964 г.*
3. *Нелинейный расчет жесткости конструкции узла сканирования. Алеев Р.М., Орлов Д.Н., Аминов А.Ф., АО НПК СПП, ОСП г. Казань, 2024 г.*
4. *Первый этап доработки конструкции узла сканирования. Алеев Р.М., Новиков А.Ю., Орлов Д.Н., Мифтахов Р.М., Кузьмин Р.О., АО «НПК «СПП», ОСП г. Казань, 2025 г.*
5. *Хог Э., Арора Я. Прикладное оптимальное проектирование: Механические системы и конструкции. Перевод с англ. М., Мир, 1983 г.*
6. *НТО «Расчеты прочности и жесткости несущего корпуса ОЭС». Алеев Р.М., Орлов Д.Н., Малеваный П.П., Отдел оптико-электронных систем, ОАО Камов, г. Казань, 2013 г.*
7. *Головацкий А.А., Гладышев Г.Н. Создание преднатяга в радиально-упорных подшипниках электродвигателя-маховика».*
8. *Модернизация конструкции оптического тракта ОПП оптико-электронной станции. Алеев Р.М., Орлов Д.Н., Малеваный П.П., Егорова В.В., НТО ЗАО «НПФ «ОПТООЙЛ», г. Казань, 2006 г.*
9. *Structural Analysis Guide. Release 2023 R1 Documentation for ANSYS.*
10. *Design Modeler. Release 2023 R1 Documentation for ANSYS Workbench.*
11. *Engineering Data. Release 2023 R1 Documentation for ANSYS Workbench.*

УДК 621.396.962:681.7.066

МЕТОД РАЗДЕЛЕНИЯ ФУНКЦИЙ УГЛОВЫХ МЕР И НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ**Валерий Аркадьевич Мейтин** – канд. техн. наук**АО «НПК «СПП»**, info@npk-spp.ru

В статье на основе анализа погрешностей крупногабаритных оптико-электронных приборов на многоосных монтировках показана возможность создания высокоточных инструментов для траекторных измерений и контроля космического пространства с устраненным принципиальным ограничением повышения их инструментальной точности, если при разработке использовать метод разделения функций угловых мер и несущих конструкций.

Ключевые слова: разделение функций угловых мер и несущих конструкций, крупногабаритная оптико-электронная система, телескоп на многоосной монтировке, угломерный инструмент, математическая модель, направление визирования.

METHOD OF SEPARATION OF FUNCTIONS OF ANGULAR MEASURES AND SUPPORTING STRUCTURES**Valerii A. Meytin** - Cand. Sc. (Technology)**JSC «RPC «PSI»**, info@npk-spp.ru

Based on an error analysis of large-scale optoelectronic instruments on multi-axis mounts, this article demonstrates the possibility of creating high-precision instruments for trajectory measurements and space monitoring, eliminating the fundamental limitation on increasing their instrumental accuracy, if the method of separating functions for angular measures and supporting structures is used during development

Key words: separation of functions of angular measures and supporting structures, large-scale optoelectronic system, telescope on a multi-axis mount, goniometric instrument, mathematical model, direction of sight.

Введение.

Актуальность применения метода разделения функций угловых мер и несущих конструкций связана с возможностью устранения прин-

ципального ограничения повышения инструментальной точности крупногабаритных оптико-электронных систем или телескопов на многоосных монтировках, используемых для траекторных измерений или контроля космического пространства. Такое применение необходимо, когда от крупногабаритного прибора требуется получать с помощью измерительных средств самого инструмента угловые координаты, направления его визирной оси или направления визирования на объект в системе координат места установки инструмента с погрешностями порядка 1". В процессе работы крупногабаритных оптико-электронных систем и телескопов на многоосных монтировках [1,2] из-за больших масс частей их конструкций и наличия силовых передач возникают неустраняемые случайные деформации и биения осей, в результате чего геометрия инструментов становится недетерминированной. В условиях применения абсолютного метода измерений эти неустраняемые случайные деформации и биения осей оказываются принципиальным ограничением для существенного повышения инструментальной точности [3-5]. Такая же проблема возникает при создании средств угловых измерений для высокоточных определений взаимных угловых положений разнесенных в пространстве систем координат или направлений при наличии деформирующихся, нестабильных механических связей между ними. Принципиальное ограничение существенного повышения точности традиционных угломерных приборов с подвижной визирной осью определяется тем, что в каждом из них конструкция одновременно выполняет две противоречивые функции [6,8]. С одной стороны, она выполняет силовую функцию несущей конструкции, то есть удерживает собственную массу, обеспечивает силовые передачи и из-за этого изменяется, деформируется случайным образом, то есть несущая конструкция имеет недетерминированную геометрию. С другой стороны, при построении математической модели направления визирования осевая система и конструкция являются материальными носителями фиксируемых

(детерминированных) параметров, углов или систем координат, необходимых при вычислении измеряемых угломерным прибором углов или направлений. В этом смысле конструкция выполняет функцию угловой меры, поэтому для обеспечения точности она не должна деформироваться или нарушать геометрию неоднозначным, случайным образом, то есть несущая конструкция в процессе работы должна иметь детерминированную геометрию. Для возможности дальнейшего повышения точности угломерного прибора, устранения его принципиального ограничения, предлагается разделить эти функции [6-8]. За осевой системой и механикой целесообразно оставить функцию носителя массы и силовых передач (функцию несущей конструкции), а функцию угловой меры передать ненагруженным носителям систем координат и углов. Для этого были найдены технические решения средств угловых измерений с преимущественным применением зеркально-призменных устройств коллинеарного переноса лучей (УКПЛ) [9-11], эквивалентных по своему оптическому действию зеркальному ромбу или уголкового отражателю, позволяющие реализовывать указанный метод разделения функций и снимать принципиальное ограничение существенного повышения точности. Известные работы, направленные на повышение точности рассматриваемых типов угломерных приборов [12,13] строились на измерении и учете (компенсации или устранении) лишь части нарушений геометрии конструкции угломерного прибора, поэтому полностью не решали данную проблему. В цепи передач направления визирования от визирного устройства до системы координат, связанной с основанием угломерного прибора, оставались части конструкции с совмещенными противоречивыми функциями. В настоящей работе на основе математического описания телескопа, используемого в качестве крупногабаритного угломерного инструмента, показано наличие у него принципиального ограничения повышения инструментальной точности и даны формулы для ее оценки. Также для инструмента с примененным методом разделения функций угловых мер и несущих конструкций показано отсутствие принципиального ограничения повышения инструментальной точности и даны

формулы для оценки точности.

Анализ погрешностей угломерного инструмента на альт-азимутальной монтировке.

Анализ погрешностей рассмотрим на примере определения углового положения визирной оси и направления визирования входного устройства (визирной трубы) с объективом и матричным светочувствительным приемником в его фокальной плоскости для оптико-электронного угломерного инструмента на альт-азимутальной монтировке в системе координат места его установки (рисунок 1).

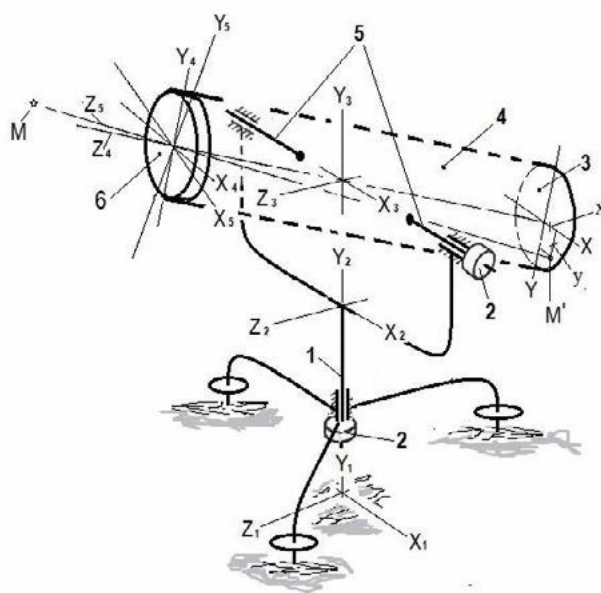


Рисунок 1 - Принципиальная схема угломерного инструмента

На рисунке 1 введены следующие обозначения: 1 и 5 — первая и вторая оси монтировки, 2 — датчик угла поворота оси, 3 — матричный светочувствительный приемник, 4 — входное устройство (труба), 6 — объектив; остальные обозначения указаны в тексте статьи.

С местом установки инструмента свяжем систему координат (СК) X_1, Y_1, Z_1 . Допустим, ось Y_1 совпадает с отвесной линией и направлена в зенит, ось Z_1 направлена горизонтально в каком-либо известном направлении, например, на север; ось X_1 направлена так, чтобы получить правую СК. С первой (вертикальной) осью вращения инструмента 1 свяжем СК X_2, Y_2, Z_2 так, чтобы ось Y_2 совпадала с первой осью вращения. Со второй (горизонтальной) осью вращения 5 свяжем СК X_3, Y_3, Z_3 так, чтобы ось X_3 совпадала со второй осью вращения. С входным устройством (трубой) 4 свяжем

систему координат $X_4Y_4Z_4$ так, чтобы ось Z_4 совпадает с визирной осью трубы, а плоскости X_4Z_4 и Y_4Z_4 были параллельны измерительным направлениям матричного светочувствительного приемника 3, X и Y (рисунок 1). Визирной осью будем называть прямую линию, проходящую через центр приемника 3 и заднюю узловую точку объектива 6. Считаем, что в идеальном инструменте оси Y_2 и X_3 совпадают с геометрическими осями, вокруг которых поворачиваются алидада и труба. При этом считаем, что в исходном идеальном положении идеального инструмента, когда нет погрешностей, оси координат $X_1Y_1Z_1$, $X_2Y_2Z_2$, $X_3Y_3Z_3$, $X_4Y_4Z_4$ соответственно параллельны друг другу. Представим теперь реальный инструмент, у которого в процессе работы из-за погрешностей изготовления и установки частей конструкции, деформаций, погрешностей преобразователей углов (датчиков углов) и поворота осей могут иметь место следующие отклонения от исходного идеального положения, рисунок 2. Ось Y_2 (I – первая ось) отклонена от отвесной линии на угол m в плоскости Y_1Z_1 и на угол v от плоскости X_2Y_2 (рисунок 2 а). Ось X_3 (II – вторая ось) повернута вокруг первой оси Y_2 на угол B (от исходного положения, когда она параллельна оси X_2) и на угол l от плоскости X_2Z_2 (рисунок 2 б). Визирная ось, ось Z_4 , повернута от исходного положения, когда она параллельна оси Z_3 , на угол E вокруг второй оси X_3 и на угол k (коллимационная ошибка) от плоскости Y_3Z_3 (рисунок 2 в).

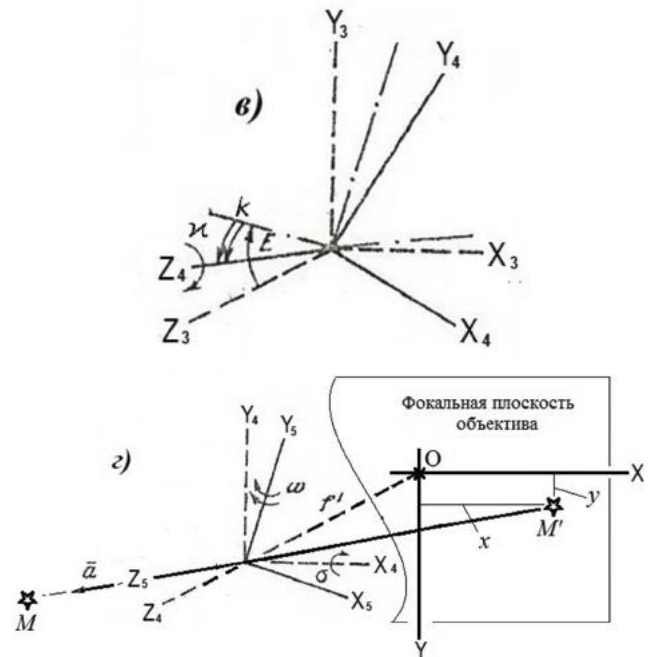
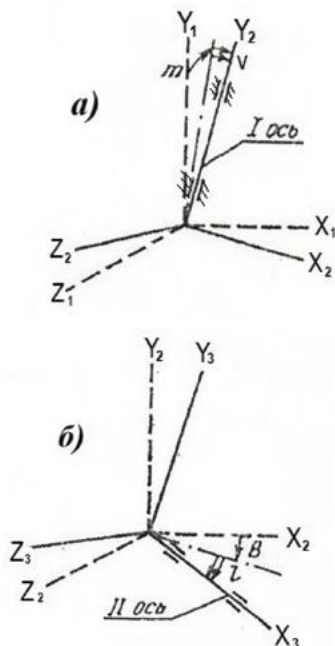


Рисунок 2 – Системы координат инструмента

Плоскости Z_4X_4 и Z_4Y_4 , которые параллельны измерительным направлениям матричного приемника, могут быть вместе с матричным приемником развернуты на угол κ от предыдущего положения вокруг визирной оси Z_4 (рисунок 2 в). Кроме того, направление на визируемый объект M или звезду, т.е. визирное направление, может не совпадать с направлением визирной оси инструмента. При этом изображение M' в фокальной плоскости объектива будет иметь координаты x и y , не равные нулю. В связи с этим введем лучевую СК $X_5Y_5Z_5$, ось Z_5 которой проходит через центр изображения объекта M' на приемнике и заднюю узловую точку объектива (рисунок 2 г). В исходном идеальном положении ось Z_5 совпадает с визирной осью Z_4 , т.е. при $x=y=0$ СК $X_5Y_5Z_5$ совпадает с СК $X_4Y_4Z_4$. В общем случае СК $X_5Y_5Z_5$ может быть получена последовательными разворотами от исходного положения на угол η вокруг оси X_4 и на угол ω вокруг оси Y_5 . В соответствии с рисунком 2 г можно записать следующие формулы

$$\begin{aligned} \sin \eta &= y(f'^2 + y^2)^{-1/2}, \\ \cos \eta &= f'(f'^2 + y^2)^{-1/2}, \\ \sin \omega &= x(f'^2 + x^2 + y^2)^{-1/2}, \\ \cos \omega &= (f'^2 + y^2)^{1/2}(f'^2 + x^2 + y^2)^{-1/2}, \end{aligned} \quad (1)$$

где f' – фокусное расстояние объектива трубы.

Углы B и E можно представить, как

$$B = \beta + l_1 + c_1 + v_1 + h, \quad E = \varepsilon + l_2 + c_2 + v_2 + q, \quad (2)$$

где β и ε – отсчеты, снимаемые с датчиков углов поворота первой и второй оси; l_1 и l_2 – угловые величины поправок, дополняющих соответствующие отсчеты β и ε до истинных углов поворотов роторов датчиков относительно их статоров; c_1 – величина угла привязки датчика первой оси к исходному положению, «место нуля» первого датчика; c_2 – величина угла привязки датчика второй оси к исходному положению, «место нуля» второго датчика; v_1 – угол скручивания первой оси, т.е. деформация конструкции от части, связывающей ротор датчика первой оси до линии опор под цапфы второй оси; v_2 – угол скручивания второй оси, т.е. деформация конструкции от части, связывающей ротор датчика второй оси до трубы; h – величина углового биения второй оси (горизонтальной оси) в плоскости, перпендикулярной к первой оси (в горизонтальной плоскости); q – гнутие трубы, угловые уводы визирной оси в плоскости, перпендикулярной к второй оси. Тогда для единичного вектора a_1 направления визирования на объект в СК $X_1Y_1Z_1$, для реального инструмента, можно записать:

$$A_1 = S_m S_v S_B S_l S_E S_k S_\kappa S_\sigma S_\omega A_5 = S_l S_2 S_3 S_4 A_5, \quad (3)$$

где A_1 – одностробцовая матрица из координат единичного вектора a_1 ; A_5 – одностробцовая матрица из координат единичного вектора $a_5 = (0, 0, 1)$ направления визирования в СК $X_5Y_5Z_5$; $S_\sigma S_\omega = S_4$ – матрица перехода из СК $X_5Y_5Z_5$ в СК $X_4Y_4Z_4$; $S_E S_k S_\kappa = S_3$ – матрица перехода из СК $X_4Y_4Z_4$ в СК $X_3Y_3Z_3$; $S_B S_l = S_2$ – матрица перехода из СК $X_3Y_3Z_3$ в СК $X_2Y_2Z_2$; $S_m S_v = S_l$ – матрица перехода из СК $X_2Y_2Z_2$ в СК $X_1Y_1Z_1$.

Выражение (3) можно использовать для точного определения направления визирования при условии, что все угловые параметры и линейные координаты точно известны. Горизонтальные и вертикальные углы для направления визирования, соответственно Γ и H , можно определять с помощью выражений

$\Gamma = \arcsin [a_z (a_x^2 + a_y^2)^{-1/2}]$, $H = \arcsin a_y$,
где a_x , a_y , a_z – направляющие косинусы или координаты единичного вектора a_1 в СК $X_1Y_1Z_1$.

При юстировке и исследованиях инструмента выявляют систематические значения параметров, т. е. m_0 , v_0 , l_{10} , c_{10} , v_{10} , h_0 , l_{20} , c_{20} , v_{20} , q_0 , k_0 , κ_0 , f_0 . В процессе работы инструмента истинные значения отклонений, параметров будут отличаться от систематических значений из-за неучтенных деформаций инструмента, гнутый трубы, биений осей опорно-поворотного устройства в подшипниках. Кроме того, сами систематические значения определяют с погрешностями измерительных средств. Все эти отличия, т. е. значения Δm , Δv , Δl_1 , Δc_1 , Δv_1 , Δh , Δl_2 , Δc_2 , Δv_2 , Δq , Δk , $\Delta \kappa$, Δf будут представлять погрешности определения или знания данных параметров. Линейные координаты x и y изображения определяются матричным приемником также с погрешностями Δx и Δy . Поэтому при определении направления визирования по формуле (3) в действительности учитываются только систематические значения параметров и фиксированные значения координат x_0 и y_0 , снимаемые с приемника. Тогда для единичного вектора a_{01} расчетного направления визирования на объект M будем иметь

$$A_{01} = S_{m0} S_{v0} S_{B0} S_{l0} S_{E0} S_{k0} S_{\kappa0} S_{\sigma0} S_{\omega0} A_{05}, \quad (4)$$

причем здесь A_{01} – одностробцовая матрица из координат a_{01} , при этом

$$m = m_0 + \Delta m,$$

$$v = v_0 + \Delta v,$$

$$B = B_0 + \Delta B,$$

$$B_0 = \beta + l_{10} + c_{10} + v_{10} + h,$$

$$\Delta B = \Delta l_1 + \Delta c_1 + \Delta v_1 + \Delta h$$

$$l = l_0 + \Delta l,$$

$$E = E_0 + \Delta E,$$

$$E_0 = \varepsilon + l_{20} + c_{20} + v_{20} + q_0,$$

$$\Delta E = \Delta l_2 + \Delta c_2 + \Delta v_2 + \Delta q,$$

$$k = k_0 + \Delta k,$$

$$\eta = \eta_0 + \Delta \eta,$$

$$\omega = \omega_0 + \Delta \omega$$

$$\kappa = \kappa_0 + \Delta \kappa.$$

Здесь η_0 и ω_0 определяются из выражений (1) при подстановке соответствующих значений x_0 , y_0 и f_0 при этом

$$x=x_0+\Delta x, \quad y=y_0+\Delta y, \quad f''=f''_0+\Delta f''.$$

Принятые условия позволяют найти погрешность определения направления визирования Δa как разность между единичным вектором a действительного направления и единичным вектором ${}_0$ расчетного направления визирования. В СК $X_I Y_I Z_I$ с учетом (3) и (4)

$$\Delta a_I = a_I - a_{0I} \quad (5)$$

Для анализа погрешностей инструмента удобно погрешность определения направления визирования Δa рассматривать не в СК $X_I Y_I Z_I$, а в СК $X_5 Y_5 Z_5$, тогда с точностью до величин первого порядка малости его проекции Δa_x и Δa_y будут равны угловым отклонениям действительного направления визирования от расчетного, соответственно в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, пересекающихся по линии визирования трубы. Воспользовавшись матрицами преобразования координат, после упрощений для погрешностей визирования получим выражения

Если в приборе угловое поле трубы не превышает нескольких градусов ($1-2^\circ$), то можно пользоваться более простыми выражениями:

$$\begin{aligned} \Delta a_x = & -\Delta m(\sin\beta \cos\epsilon \cos\omega_0 \sin\eta_0 + \cos\beta \sin\omega_0 \sin\eta_0 + \\ & + \sin\beta \sin\epsilon \cos\eta_0) + \Delta v(\cos\beta \cos\epsilon \cos\omega_0 \sin\eta_0 + \\ & - \sin\beta \sin\omega_0 \sin\eta_0 + \cos\beta \sin\epsilon \cos\eta_0) + \\ & + (\Delta l_1 + \Delta c_1 + \Delta v_1 + \Delta h)(\sin\epsilon \cos\omega \sin\eta_0 - \cos\epsilon \cos\eta_0) + \\ & + \Delta l(\cos\epsilon \cos\omega_0 \sin\eta_0 + \sin\epsilon \cos\eta_0) + \\ & - (\Delta l_2 + \Delta c_2 + \Delta v_2 + \Delta q) \sin\omega_0 \sin\eta_0 + \\ & - \Delta k \cos\eta_0 + \Delta \chi \cos\omega \sin\eta_0 + \\ & - \frac{\cos^2 \omega_0 \cos \eta_0}{\sqrt{f_0'^2 + y_0^2}} \Delta x + \frac{\sin \omega_0 \sin \eta_0 \cos \eta_0}{\sqrt{f_0'^2 + x_0^2 + y_0^2}} \Delta y + \\ & + \frac{\sin \omega_0 \cos^2 \eta_0}{\sqrt{f_0'^2 + x_0^2 + y_0^2}} \Delta f', \\ \Delta a_y = & \Delta m(\cos\beta \cos\omega_0 - \sin\beta \cos\epsilon \sin\omega_0) + \\ & + \Delta v(\sin\beta \cos\omega_0 + \cos\beta \cos\epsilon \sin\omega_0) + \\ & + (\Delta l_1 + \Delta c_1 + \Delta v_1 + \Delta h) \sin\epsilon \sin\omega_0 + \\ & + \Delta l \cos\epsilon \sin\omega_0 - (\Delta l_2 + \Delta c_2 + \Delta v_2 + \Delta q) \cos\omega_0 + \Delta \chi \sin\omega_0 + \\ & + \frac{f_0'}{f_0'^2 + y_0^2} \Delta y - \frac{y_0}{f_0'^2 + y_0^2} \Delta f'. \end{aligned}$$

Если в приборе угловое поле трубы не превышает нескольких градусов ($1-2^\circ$), то можно пользоваться более простыми выражениями:

$$\begin{aligned} \Delta a_x = & -\Delta m \sin\beta \sin\epsilon + \Delta v \cos\beta \sin\epsilon + \\ & - (\Delta l_1 + \Delta c_1 + \Delta v_1 + \Delta h) \cos\epsilon + \Delta l \sin\epsilon - \Delta k - \frac{\Delta x}{f_0'} \quad (7) \\ \Delta a_y = & -\Delta m \cos\beta + \Delta v \sin\beta + \\ & - (\Delta l_2 + \Delta c_2 + \Delta v_2 + \Delta q) + \frac{\Delta y}{f_0'}. \end{aligned}$$

Рассматривая в формулах (7) каждую погрешность как случайную и независимую, получим значение среднего квадратичного отклонения σ_Σ для случайной погрешности определения направления визирования:

$$\begin{aligned} \sigma_\Sigma = & [\sigma_m^2 (\sin^2\beta \sin^2\epsilon + \cos^2\beta) + \\ & + \sigma_v^2 (\sin^2\beta + \cos^2\beta \sin^2\epsilon) + \\ & + (\sigma_{l1}^2 + \sigma_{c1}^2 + \sigma_{v1}^2 + \sigma_h^2) \cos^2\epsilon + \\ & \sigma_l^2 \sin^2\epsilon + \sigma_k^2 + \sigma_x^2 + \sigma_{l2}^2 + \sigma_{c2}^2 + \sigma_{v2}^2 + \sigma_q^2 + \sigma_y^2]^{1/2}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $\sigma_m, \sigma_v, \sigma_{l1}, \sigma_{c1}, \sigma_{v1}, \sigma_h, \sigma_k, \sigma_x, \sigma_{l2}, \sigma_{c2}, \sigma_{v2}, \sigma_q, \sigma_y$ средние квадратичные отклонения погрешностей соответственно $\Delta m, \Delta v, \Delta l_1, \Delta c_1, \Delta v_1, \Delta h, \Delta l, \Delta k, \Delta x/f_0', \Delta l_2, \Delta c_2, \Delta v_2, \Delta q, \Delta y/f_0'$.

Полученные выражения позволяют распределить допуски на составные части конструкции, исходя из выходной точности инструмента. Из (8) видно, что нецелесообразно ужесточать требования на одни части конструкции, если для других частей они заданы достаточно грубо. В последнем случае можно получить еще более простое выражение, то есть, полагая каждое значение среднего квадратичного отклонения равным значению σ , будем иметь

$$\sigma_\Sigma = \sigma \sqrt{10 + 2 \cos^2 \epsilon}.$$

Это значит, что если имеется инструмент с составляющими случайными погрешностями, каждая из которых равна, например, $1''$, то в соответствии с последней формулой его выходная средняя квадратическая погрешность, в зависимости от угла места ϵ , будет находиться в пределах от $3.1''$ до $3.5''$. Если рассматривать оценку выходной погрешности инструмента более детально, например, допустить, что каждая из средних квадратических погрешностей (СКП) для биений осей, скручиваний осей и гнутый трубы, т.е. $\sigma_m, \sigma_v, \sigma_{l1}, \sigma_{c1}, \sigma_{v1}, \sigma_h, \sigma_k, \sigma_x, \sigma_{l2}, \sigma_{c2}, \sigma_{v2}, \sigma_q, \sigma_y$ не превышает $2''$, а СКП $\sigma_{l1}, \sigma_{c1}, \sigma_{l2}, \sigma_{c2}, \sigma_x, \sigma_y$ являются пренебрежимо малыми, например, каждая из них не превышает $0.2''$, то выходная СКП инструмента получается не менее

$\sigma_{\Sigma} = \sigma \sqrt{6} \approx 2.45 \cdot 2'' = 4.9''$ Известно также, что СКП одного излучающих приборов для траекторных измерений (Contraves EOTS) определяется величиной в $5''$.

Таким образом, оптико-электронная система, созданная по схеме традиционного телескопа, всегда будет иметь ограничение по инструментальной точности, определяемое случайными угловыми деформациями опорно-поворотного устройства (монтировки), биениями осей и гнутями трубы, возникающими во время работы изделия, то есть ограничение по точности будет всегда при недетерминированной геометрии несущей конструкции. В связи с этим появляется задача создания крупногабаритного угломерного прибора, в котором геометрия осей, их деформации и гнутя трубы практически бы не влияли на точность измерений.

Погрешности угломерного инструмента с разделением функций угловых мер и несущих конструкций.

Рассмотрим теперь какова инструментальная погрешность может быть у крупногабаритного угломерного инструмента с разделением функций угловых мер и несущих конструкций на примере определения углового положения визирной оси инструмента на альт-азимутальной монтировке [9], показанного на рисунке 3.

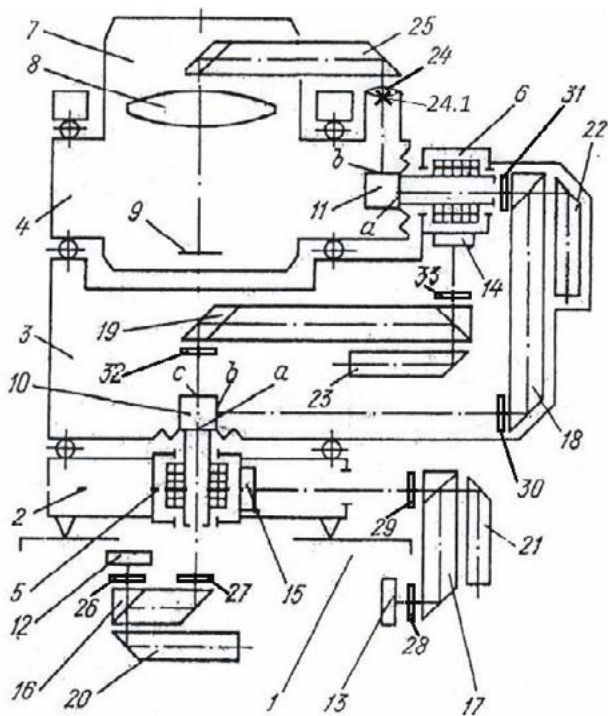


Рисунок 3 – Угломерный инструмент с разделением функций угловых мер и несущих конструкций

Для описания принципиальной схемы инструмента форма конструкции его монтировки не имеет определяющего значения. Поэтому для простоты изложения под термином «ось монтировки» будем понимать произвольный по форме материальный элемент (несущую конструкцию), вращения и повороты которого задают соответствующую геометрическую ось, т.е. ось вращения монтировки. На фундаменте 1 установлена монтировка с основанием 2, первой осью 3 и второй осью 4. Датчики углов поворота первой оси 5 и второй оси 6 состоят из ротора, соединённого с соответствующей осью, и статора. Статор датчика 5 закреплён на основании, а статор датчика 6 – на первой оси. Инструмент содержит трубу 7, расположенную на второй оси, объектив 8 и матричный светочувствительный приемник 9 в фокальной плоскости объектива. Инструмент снабжён сохраняющими форму зеркальными базовыми элементами 10 и 11 (выполненными, например, из кварца в виде прямоугольных параллелепипедов или кубов). Каждый базовый элемент имеет плоские отражающие грани (a , b , c), жёстко соединен с ротором датчика оси и является материальным носителем нерасстраивающейся системы координат оси. Представим себе такой инструмент в исходном идеальном положении, рисунок 3. Грань a соответствующего базового элемента перпендикулярна к оси вращения данной оси. Грань b элемента 10 перпендикулярна к оси вращения второй оси. Грань b элемента 11 перпендикулярна к визирной оси трубы. Грань c элемента 10 параллельна оси вращения второй оси. На фундаменте размещены два плоских зеркала 12 и 13. Зеркало 12 параллельно грани a элемента 10, а зеркало 13 – оси вращения первой оси 3. Со статором датчика 6 жёстко связано плоское зеркало 14, параллельное грани с элемента 10, а со статором датчика 5 – плоское зеркало 15, параллельное зеркалу 13. При этом связаны оптически: грань a элемента 10 и зеркало 12, плоское зеркало 15 и плоское зеркало 13, грань a элемента 11 и грань b элемента 10, плоское зеркало 14 и грань c элемента 10, грань b элемента 11 и приемный канал с объективом 8 и матричным приемником 9. Каждая из оптических связей, кроме последней, выполнена в виде одного устройства коллинарного переноса лучей 16, 17, 18 и 19 и соот-

ветствующего одного автоколлиматора 20, 21, 22 и 23. Каждое УКПЛ представляет собой не расстраивающуюся зеркально-призменную систему класса В-0° или В-180° [9], то есть систему, эквивалентную по своему оптическому действию зеркальному ромбу или уголкового отражателю. Визирный луч автоколлиматора (АК) разделяется УКПЛ на два коллинеарных луча, перпендикулярных к связываемым отражающим граням и зеркалам. Последняя оптическая связь между трубой 7 и гранью b элемента 11 выполнена в виде объектива 24 с маркой 24.1, размещённой в его главной точке, установленного на трубе 7 так, что марка находится от грани b на расстоянии, равном половине фокусного расстояния объектива 24, и включает в себя УКПЛ 25, закреплённое на трубе 7. Марка 24.1 изображается на матричном приемнике 9 оптической системой, включающей зеркальную грань b , объектив 24, УКПЛ 25 и объектив 8 трубы. При этом прямая линия, проходящая через заднюю узловую точку объектива 8 трубы 7 и через изображение марки 24.1 на матричном приемнике 9, становится визирной осью трубы инструмента [4]. Направление визирной оси в такой схеме всегда определяется направлением нормали к грани b базового элемента второй оси 10. Для предотвращения наложений автоколлимационных изображений в полях зрения автоколлиматоров от оптически связанных граней каждое УКПЛ может содержать попарно установленные перед его окнами оптические клинья 26 и 27, 28 и 29, 30 и 31, 32 и 33. Вместо оптических клиньев, с помощью которых можно разводить автоколлимационные изображения в полях зрения автоколлиматоров на постоянные величины, также можно устанавливать светофильтры с раздельными спектральными областями и соответствующими источниками света в автоколлиматорах, которые включаются поочередно и дают раздельные изображения. Для разработки инструмента, его изготовления, юстировки, поверки и создания способов наблюдений необходимо иметь математические модели, учитывающие влияние погрешностей, возникающих при изготовлении, сборке и в процессе эксплуатации на угловое положение визирной оси инструмента или на увод визирной оси от её идеального положения. Также необходимо иметь

модели, учитывающие влияние погрешностей измерительной системы на точность определения этих уводов. Для математического описания идеального инструмента достаточно знать углы поворотов θ_1 и θ_2 первой и второй осей относительно исходного положения. Для обеспечения возможности более полного описания инструмента примем условия и обозначения, показанные на рисунках 3 и 4.

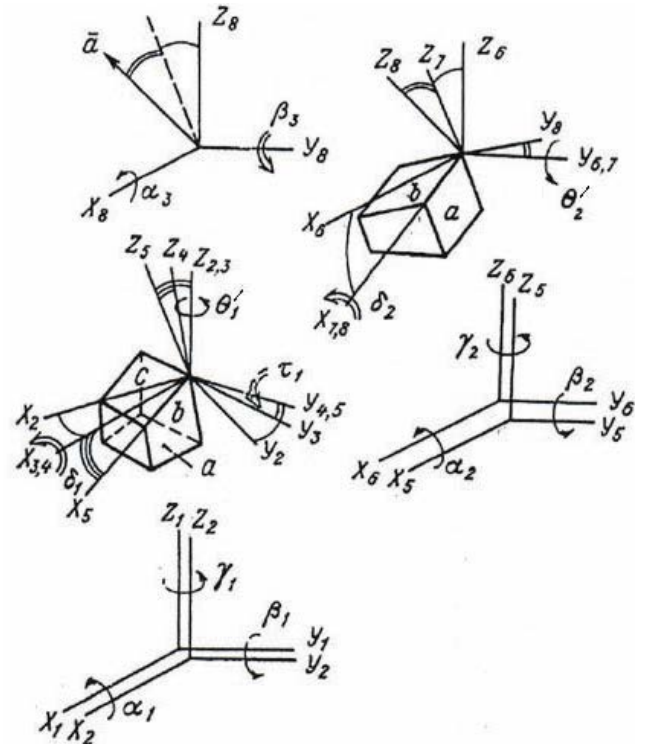


Рисунок 4 – Системы координат инструмента

$X_1Y_1Z_1$ – система координат (СК) места установки инструмента 1, в которой будем окончательно определять или задавать угловое положение визирной оси, при этом плоскость X_1Y_1 параллельна плоскости зеркала 12, а ось X_1 – линии пересечения плоскостей зеркал 12 и 13. Здесь, например, зеркало 12 может быть из состава устройства искусственного горизонта или задавать плоскость горизонта как ртутное зеркало. Нормаль к зеркалу 13 может задавать постоянное азимутальное направление. $X_2Y_2Z_2$ – СК первой оси, плоскость X_2Y_2 параллельна плоскости a и ось X_2 параллельна плоскости зеркала 15. $X_3Y_3Z_3$, $X_4Y_4Z_4$ и $X_5Y_5Z_5$ – системы координат базового элемента 10, при этом, у СК $X_3Y_3Z_3$ плоскость X_3Y_3 параллельна плоскости a , а ось X_3 параллельна линии пересечения граней a и b ; у СК $X_4Y_4Z_4$ плоскость X_4Y_4 параллельна плоскости b , а ось X_4 параллельна линии пересечения граней a и b или

оси X_3 ; у СК $X_3Y_3Z_3$ плоскость X_3Y_3 параллельна плоскости b , а ось X_3 параллельна линии пересечения граней b и c . $X_6Y_6Z_6$ – СК второй оси, плоскость X_6Y_6 параллельна плоскости a элемента 11, а ось X_6 параллельна линии пересечения плоскости a и зеркала 14. $X_7Y_7Z_7$ и $X_8Y_8Z_8$ – системы координат базового элемента 11, при этом у СК $X_7Y_7Z_7$ плоскость X_7Y_7 параллельна плоскости a , а ось X_7 параллельна линии пересечения граней a и b ; у СК $X_8Y_8Z_8$ плоскость X_8Y_8 параллельна плоскости b , а ось X_8 параллельна линии пересечения граней a и b . Здесь $\vec{a}$ – обозначение единичного вектора (орта) направления визирной оси, проходящей через заднюю узловую точку объектива 8 и изображение марки 24.1 на матричном приемнике 9. У идеального инструмента в исходном положении оси координат $X_1Y_1Z_1$, $X_2Y_2Z_2$, ..., $X_8Y_8Z_8$ соответственно параллельны друг другу, а орт $\vec{a}$ параллелен оси Z_8 . Представим теперь реальный инструмент, у которого в процессе работы при наличии гнутых трубы, погрешностей изготовления и установки частей конструкции, а также погрешностей отсчётных устройств могут быть следующие отклонения от исходного идеального положения (рисунки 3 и 4). Статор датчика 5 вместе с зеркалом 15 развернулся так, что плоскость зеркала 15 стала непараллельной плоскости 13 в плоскости X_1Y_1 и составила с ней угол γ_1 . Грань a элемента 10 оказалась непараллельной плоскости зеркала 12 и составила с ней угол β_1 в плоскости X_1Z_1 и угол α_1 в плоскости Y_1Z_1 . Ротор датчика 5 вместе с элементом 10 повернулся относительно статора на угол θ'_1 . Грань b элемента 10 наклонена на угол δ_1 к грани a . Ребро, образованное пересечением граней c и b элемента 10, непараллельно ребру, образованному пересечением граней a и b , и составляет с ним угол τ_1 . Статор датчика 6 вместе с зеркалом 14 развернулся так, что плоскость зеркала 14 оказалась непараллельной грани с элемента 10 и составила с ней угол β_2 . Грань a элемента 11 не параллельна грани b элемента 10 и составила с ней угол γ_2 в плоскости X_3Y_3 и угол α_2 в плоскости Y_3Z_3 . Ротор датчика 6 с элементом 11 повернулся относительно статора на угол θ'_2 . Грань b элемента 11 не перпендикулярна на угол δ_2 к грани a . Визирная ось не перпендикулярна к грани b элемента

11, т.е. орт $\vec{a}$ не параллелен оси Z_8 и составляет с ней угол α_3 в плоскости Y_8Z_8 и угол β_3 в плоскости Y_8Z_8 (из-за погрешностей изготовления, при которых марка 24.1 не совпадает с главной точкой объектива 24 и погрешностей УКПЛ 25). Зададим указанные отклонения и повороты последовательными разворотами систем координат по отношению к исходному положению идеального инструмента: $X_2Y_2Z_2$ – на угол γ_1 вокруг оси Z_1 , на угол β_1 вокруг оси Y_1 и на угол α_1 вокруг оси X_1 ; $X_3Y_3Z_3$ – на угол θ'_1 вокруг оси Z_2 ; $X_4Y_4Z_4$ – на угол δ_1 вокруг оси X_3 ; $X_5Y_5Z_5$ – на угол τ_1 вокруг оси Y_4 ; $X_6Y_6Z_6$ – на угол β_2 вокруг оси Y_5 , на угол γ_2 вокруг оси Z_5 и на угол α_2 вокруг оси X_5 ; $X_7Y_7Z_7$ – на угол θ'_2 вокруг оси Y_6 ; $X_8Y_8Z_8$ – на угол δ_2 вокруг оси X_7 , при этом справедливы соотношения:

$$\theta_1 = \theta'_1 + l_1, \quad \theta_2 = \theta'_2 + l_2,$$

где θ_1 и θ_2 – отсчёты, снимаемые с датчиков первой и второй осей, соответствующие действительным углам поворотов θ'_1 и θ'_2 роторов с базовыми элементами относительно статоров датчиков, а l_1 и l_2 – соответствующие отсчётам значения поправок. Воспользовавшись матрицами преобразования координат [14,15,16], т.е. последовательно переходя от одной системы координат к другой, определим с точностью до величин первого порядка малости положение орта визирной оси $\vec{a}_1$ в системе координат $X_1Y_1Z_1$. После преобразований получим, что для реального инструмента в общем случае могут иметь место следующие проекции орта $\vec{a}_1$:

$$\begin{aligned} a_{1x} &= (\gamma_1 + \gamma_2 + l_1) \sin \theta_1 \sin \theta_2 + \beta_1 \cos \theta_2 + \\ &+ (\tau_1 + \beta_2 + l_2 + \beta_3) \cos \theta_1 \cos \theta_2 + (\delta_1 + \alpha_2) \sin \theta_1 \cos \theta_2 + \\ &+ (\delta_2 + \alpha_3) \sin \theta_1 + \cos \theta_1 \sin \theta_2, \\ a_{1y} &= (\gamma_1 + \gamma_2 + l_1) \cos \theta_1 \sin \theta_2 + \alpha_1 \cos \theta_2 + \\ &+ (\tau_1 + \beta_2 + l_2 + \beta_3) \sin \theta_1 \cos \theta_2 - (\delta_1 + \alpha_2) \cos \theta_1 \cos \theta_2 + \\ &+ (\delta_2 + \alpha_3) \cos \theta_1 + \sin \theta_1 \sin \theta_2, \\ a_{1z} &= \alpha_1 \sin \theta_1 \sin \theta_2 - \beta_1 \cos \theta_1 \sin \theta_2 + \\ &+ (\tau_1 + \beta_2 + l_2 + \beta_3) \sin \theta_2 \cos \theta_2. \end{aligned}$$

Если представить такой идеальный инструмент, для описания которого достаточно знать повороты относительно углов θ_1 и θ_2 , то для того, чтобы его визирная ось совместилась с визирной осью реального инструмента, пер-

вую и вторую оси необходимо как бы повернуть на углы $\Delta\theta_1$ и $\Delta\theta_2$ соответственно. Приравнявая в этом случае соответствующие проекции ортов визирных осей для реального и идеального инструментов, после преобразований получим величины угловых поправок:

$$\Delta\theta_1 = \gamma_1 + \gamma_2 + l_1 - (\alpha_1 \cos\theta_1 + \beta_1 \sin\theta_1 + \delta_1 + \alpha_2) \operatorname{ctg}\theta_2 + -(\delta_2 + \alpha_3) \operatorname{cosec}\theta_2;$$

$$\Delta\theta_2 = -\alpha_1 \sin\theta_1 + \beta_1 \cos\theta_1 + \tau_1 + \beta_2 + l_2 + \beta_3.$$

Также, используя преобразования координат, можно найти угловые уводы Δa_{8x} и Δa_{8y} визирной оси реального инструмента от визирной оси такого идеального инструмента, т.е. от оси Z_8 в системе координат $X_8 Y_8 Z_8$ идеального инструмента:

$$\begin{aligned} \Delta a_{8x} &= \beta_1 \cos\theta_1 - \alpha_1 \sin\theta_1 + \tau_1 + \beta_2 + l_2 + \beta_3; \\ \Delta a_{8y} &= (\gamma_1 + \gamma_2 + l_1) \sin\theta_2 + \\ &- (\beta_1 \sin\theta_1 + \alpha_1 \cos\theta_1 + \delta_1 + \alpha_2) \cos\theta_2 + (\delta_2 + \alpha_3). \end{aligned} \quad (9)$$

Таким образом, если в фиксированные моменты времени знать значения всех перечисленных отклонений и поворотов, то для этих моментов можно получить точное положение визирной оси, для чего, исходя из конструкции (рисунок 3), используются следующие оптические связи: для измерения α_1 и β_1 – УКПЛ 16 вместе с АК 20, для γ_1 – УКПЛ 17 и АК 21, для α_2 и γ_2 – УКПЛ 18 и АК 22, для β_2 – УКПЛ 19 и АК 23, для α_3 и β_3 – объектив 24 с маркой 24.1, УКПЛ 25, объектив 8 и матричный приемник 9, на который передается изображение марки, несущей информацию об угловом положении грани b элемента 11. Погрешности τ_1 , δ_1 и δ_2 изготовления базовых элементов можно измерить заранее и ввести как постоянные систематические погрешности. Углы θ_1 и θ_2 определяются датчиками углов. Отклонения l_1 и l_2 в рассматриваемом инструменте не измеряются: как и в известных инструментах, они представляют собой погрешности датчиков, существенно меньшие погрешностей от деформаций конструкции, и могут быть исследованы предварительно, как и лимбы. Определение нулевых положений (нулей) датчиков углов поворота показано на рисунке 5. Нулевой или какой-либо фиксированный отсчет определяется углом между гранью 2 базового элемента и гранью 1 на статоре, угол измеря-

ется с помощью АК 3 и УКПЛ 4 с оптическими клиньями 5 и 6. Поскольку привязка нулей датчиков может осуществляться перед работой инструмента, устройство 3, 4, 5 и 6 может быть съемным. Частота проверок нулевого положения зависит от стабильности датчика угла поворота.

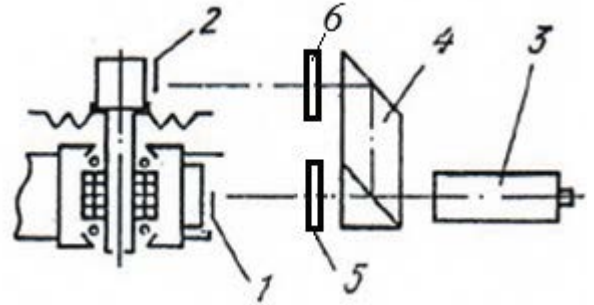


Рисунок 5 – Определение нулевого положения датчика угла поворота

Конструктивное решение каждой из оптических связей по разностной схеме в виде УКПЛ и АК (рисунок 3) позволяет исключать влияние уходов визирной оси АК, дрейфа нуля АК и возможные его смещения относительно места закрепления на точность определения взаимного углового положения оптически связываемых граней. Каждая из оптических связей (УКПЛ с АК и последней связью – объектив 24 с маркой 24.1, с УКПЛ 25, объективом 8 и светочувствительным матричным приемником 9) может обеспечить измерение указанных углов с определёнными случайными погрешностями. Заранее измеряемые постоянные величины или систематические отклонения также могут быть выявлены со случайными погрешностями. Поэтому, исходя из (9), для средней квадратичной погрешности (СКП) определения направления визирной оси можно записать:

$$\begin{aligned} \sigma_{\Sigma}^2 &= [\sigma_{\beta 1}^2 \cos^2\theta_2 + \sigma_{\alpha 1}^2 \sin^2\theta_2 + \sigma_{\tau 1}^2 + \sigma_{\beta 2}^2 + \sigma_{l 2}^2 + \sigma_{\beta 3}^2 + \\ &+ (\sigma_{\gamma 1}^2 + \sigma_{\gamma 2}^2 + \sigma_{l 1}^2) \sin^2\theta_2 + \\ &+ (\sigma_{\beta 1}^2 \sin^2\theta_1 + \sigma_{\alpha 1}^2 \cos^2\theta_1 + \sigma_{\delta 1}^2 + \sigma_{\alpha 2}^2) \cos^2\theta_2 + \sigma_{\delta 2}^2 + \sigma_{\alpha 3}^2]^2, \end{aligned} \quad (10)$$

где

σ_{Σ} – СКП определения направления визирования;

$\sigma_{\alpha 1}, \sigma_{\beta 1}, \sigma_{\delta 1}, \sigma_{l 1}, \sigma_{\gamma 1}, \sigma_{\tau 1}, \sigma_{\alpha 2}, \sigma_{\beta 2}, \sigma_{\delta 2}, \sigma_{l 2}, \sigma_{\gamma 2}, \sigma_{\alpha 3}, \sigma_{\beta 3}$ – СКП определения соответствующих углов $\alpha 1, \beta 1, \delta 1, l 1, \gamma 1, \tau 1, \alpha 2, \beta 2, \delta 2, l 2, \gamma 2, \alpha 3, \beta 3$.

Если допустить, что для составляющих погрешностей справедливо:

$$\sigma_{\alpha 1} = \sigma_{\beta 1} = \sigma_{\delta 1} = \sigma_{11} = \sigma_{\gamma 1} = \sigma_{\epsilon 1} = \sigma_{\alpha 2} = \sigma_{\beta 2} = \sigma_{\delta 2} = \sigma_{12} = \sigma_{\gamma 2} = \sigma_{\beta 3} = \sigma_{\delta 3} = \sigma_{\alpha 3} = \sigma$$

то из (10) получим, что

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma \sqrt{10} \approx 3,2\sigma \quad (11)$$

Современные технические решения датчиков углов («Renishaw») и автоколлиматоров [18] позволяют иметь СКП устройств до десятых долей угловой секунды и меньше. Если при существующей на сегодняшний день элементной базе считать, что СКП для каждого датчика угла, для каждой оптической связи из УКПЛ с АК не превышают 0,2", а СКП последней оптической связи задания углового положения визирной оси, т.е. погрешности углов $\alpha 3$ и $\beta 3$ также не более 0,2", то для СКП определения углового положения направления визирной оси получается

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma \sqrt{10} \approx 3,2\sigma.$$

Отметим, что здесь рассмотрена инструментальная погрешность определения углового положения только для визирной оси и не рассмотрено визирное направление на объект, как в предыдущем примере. Однако если еще дополнительно рассмотреть погрешность определения углового положения направления визирования на объект наблюдения относительно известного углового положения визирной оси, то в полученной формуле погрешности (11) прибавится незначительная поправка, связанная с погрешностью матричного приемника и нарушением фокусировки объектива [10]. Таким образом, от угломерного инструмента с разделением функций угловых мер и несущих конструкций можно ожидать повышения точности в 5...7 и более раз по сравнению с традиционным угломером. Погрешность инструмента зависит только от совершенства и совершенствования таких элементов конструкции как матричный приемник, датчики углов, автоколлиматоры и УКПЛ. Погрешность инструмента не зависит от недетерминированной геометрии несущей конструкции, т.е. от монтировки, входного устройства (трубы), геометрия которых меняется случайным образом из-за возникающих в процессе работы переменных силовых нагрузок и ускорений.

Заключение

На основе рассмотренных примеров показано, что применение метода разделения функций угловых мер и несущих конструкций при проектировании позволяет устранять принципиальное ограничение существенного повышения инструментальной точности для крупногабаритных оптико-электронных систем или инструментов на многоосных монтировках, используемых в качестве средств угловых измерений или средств высокоточных определений взаимных угловых положений разнесенных в пространстве систем координат и направлений при наличии деформирующихся, нестабильных механических связей между ними.

Рассмотренный метод был впервые применен на Красногорском механическом заводе имени С.А.Зверева при разработке контрольно-измерительных устройств определения погрешностей визирования крупногабаритных телескопов [19, 20]. Метод разделения функций угловых мер и несущих конструкций был применен в АО «НПК «СПП» при разработке крупногабаритной оптико-электронной системы для улучшения ее характеристик [21, 22, 23, 24].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елисеев С.В. *Геодезические инструменты и приборы*. М.: Недра, 1973. 256 с.
2. Плотников В.С. *Геодезические приборы*. М.: Недра, 1987. 396 с.
3. Подобед В.В. *Фундаментальная астрометрия*. М.: Наука, 1968. 452 с.
4. Блажко С.Н. *Курс практической астрономии*. М.: Наука, 1979. 432 с.
5. Мейтин В.А., Майков Б.П. Анализ погрешностей угломерного инструмента. "Оптико-механическая промышленность", 1988, № 7, С. 11.
6. Мейтин В.А. Детерминированная модель угломерного прибора и его погрешности // *Оптический журнал*. 1994. № 7. С. 60-62.
7. Мейтин В.А. Разработка квазиидеальных оптических угломерных приборов на основе применения способа разделения функций // *Материалы VI междун. конф. "Прикладная*

оптика-2004". СПб, 2004. Т. 1. С. 7-11.

8. Мейтин В.А. Разработка оптических угломерных приборов с недетерминированной геометрией несущих конструкций. "Оптический журнал", 2007, том 74, № 12, С. 10.

9. Мейтин В.А., Чернов В.С. Угломерный инструмент с квазиидеальной системой координат // ОМП. 1983. № 10. С. 45-48.

10. Мейтин В.А. Анализ погрешностей угломерного прибора с квазиидеальной системой координат. "Оптический журнал", 1992, № 4, С. 47.

11. Мейтин В.А. Устройство для коллинеарного переноса оптических осей. // Авторское свидетельство № 957147 // Бюллетень изобретений № 33, 1982.

12. Власов Б.И. Устройство для автоколлимационного осуществления оси вращения трубы в любых азимутах // Новая техника в астрономии. 1970. В. 3. С. 157-161.

13. Колосов М.П. Оптика адаптивных угломеров. М.: ООО СКАН-1, 1997. 212 с.

14. Погарев Г.В. Юстировка оптических приборов. Л., 1968, 292с.

15. Грейм И.А. Зеркально-призмённые системы. – М.: Машиностроение, 1981. – 125., ил. – (Б-ка приборостроителя).

16. Бронштейн Ю.Л. Геометрия и юстировка крупных зеркальных систем. – М.: ДПК Пресс. 2020. – 816 с., ил.

17. Мейтин В.А. Теодолит. Патент на изобретение № 2209392. Бюллетень изобретений № 21 от 27.07.2003.

18. Королев А.Н., Гарцуев А.И., Полищук Г.С., Трегуб В.П. Цифровой автоколлиматор. "Оптический журнал", 2009, том 76, № 10, С. 12.

19. Мейтин В.А., Харламов В.Н. Система для определения погрешности направления визирования телескопа. // Авторское свидетельство 1335805 // Бюллетень изобретений, 1987, № 33.

20. Мейтин В.А. Система для определения погрешности направления визирования телескопа. // Авторское свидетельство 1610257 // Бюллетень изобретений, 1990, № 44.

21. Александров А.Б., Мейтин В.А., Мокишанов В.Н., Мошков В.Л. Устройство автоматической юстировки двухзеркальной телескопической системы с заданным направлением выходного излучения. Патент на изобретение № 2611604. Бюллетень изобретений № 7 от 28.02.2017.

22. Мейтин В.А., Мокишанов В.Н., Олейников И. И., Бажанов Ю.В. Разработка алгоритмов автоматической юстировки двухзеркального телескопа. "Оптический журнал", 2020, том 87, № 4, С. 66.

23. Мейтин В.А., Мокишанов В.Н., Олейников И.И., Периков А.П. Разработка алгоритмов автоматической юстировки оптической системы с двухзеркальным телескопом. «Оптический журнал», 2022, том 89, № 1, С. 3.

24. Мейтин В.А., Мокишанов В.Н., Олейников И.И., Тунгушпаев А.Т. Устройство автоматической юстировки двухзеркальной телескопической системы с заданным направлением выходного излучения относительно направления визирования. Патент на изобретение № 2820599. Бюллетень изобретений № 16 от 06.06.2024.

АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЛАКОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ В ГРАДАЦИЯХ СЕРОГО

*Евгений Юрьевич Швейкин**Кирилл Львович Ефимов**Филиал АО «НПК «СПП» в Великом Новгороде,
shveykin_ej@npkspp.ru, efimov_kl@npkspp.ru*

В статье проанализированы возможности применения существующих алгоритмов мониторинга облачного покрова в наземных видеосистемах реального времени, использующих черно-белые камеры видимого и инфракрасного диапазона. Показаны их ограничения и приведено описание и исследование работы специализированного алгоритма обнаружения облаков на изображениях в градациях серого.

Ключевые слова: мониторинг облачности, алгоритм обнаружения облаков, изображения в градациях серого, обработка изображения.

CLOUD DETECTION METHOD ON GRAYSCALE IMAGES*Evgenii Yu. Shveykin**Kirill L. Efimov JSC «RPC «PSI»,**Branch in Velikij Novgorod,**shveykin_ej@npkspp.ru, efimov_kl@npkspp.ru*

The article gives brief analysis of existing ground-based cloud monitoring methods with all-sky cameras and their effectiveness to detect clouds on grayscale images especially in multispectral video systems. Based on analysis summary authors propose specialized algorithm for detection clouds on grayscale images and provide test results of investigation.

Keywords: cloud monitoring, all-sky cameras, detect clouds on grayscale images, image processing.

На данный момент ряд существующих видеосистем наземного мониторинга облачности используют для обнаружения облаков изображения от цветных камер, а их алгоритмы основаны на анализе соотношений цветовых каналов (R-B, R/B) с последующей пороговой бинаризацией [1, 2]. Их эффективность критически зависит от наличия цветовой информации и условий освещения: в ночных ус-

ловиях теряется цветность, и преимущества цветowych алгоритмов нивелируются. Также существует класс специализированных многоспектральных систем, использующих в работе высокочувствительные черно-белые камеры видимого или инфракрасного диапазона, позволяющие регистрировать быстро изменяющийся облачный покров. Для обнаружения облаков в таких системах вышеуказанные методы анализа соотношения цветовых компонент неприменимы. Это создаёт потребность в методах, работающих исключительно с информацией о яркости. В данной статье представлены результаты исследования алгоритма обнаружения облаков на изображениях в градациях серого, ориентированного на использование в многоспектральных системах с ограниченными вычислительными ресурсами, где ключевым требованием является работа в реальном времени с частотой обработки в несколько десятков кадров в секунду. Существующие подходы к обнаружению облаков имеют ограничения, затрудняющие их применение в специализированных системах реального времени:

- методы на основе анализа звёздного поля [4] обеспечивают высокую точность ночью, но требуют длительной экспозиции для накопления сигнала от звёзд и значительных вычислительных ресурсов для сопоставления с каталогом и сложной калибровки;
- алгоритмы, использующие разностный кадр [3], чувствительны к движению облаков и изменениям фона между кадрами, что ограничивает их применимость при больших экспозициях;
- методы на основе глубокого обучения [5, 6] показывают высокую точность, но требуют больших размеченных наборов данных и специальных вычислителей для быстрой работы нейронных сетей, что осложняет их внедрение во встраиваемые системы. Таким образом, существует потребность в быстродействующем алгоритме с низкими требованиями к аппаратным ресурсам и работающем на основе данных черно-белых изображений.

Исследования показывают, что в большинстве случаев на изображении облака светлее фона неба (рисунок 1 а)), особенно в инфракрасном (ИК) диапазоне (рисунок 1 б)). В данном слу-

чае задача обнаружения облаков может быть сведена к вычитанию фона из изображения и последующей бинаризации. Структурная схема алгоритма приведена на рисунке 2.



а) в видимом диапазоне
в дневное время



б) в инфракрасном диапазоне (1400 мкм)
в ночное время

Рисунок 2 – Наблюдаемый участок неба с облаками

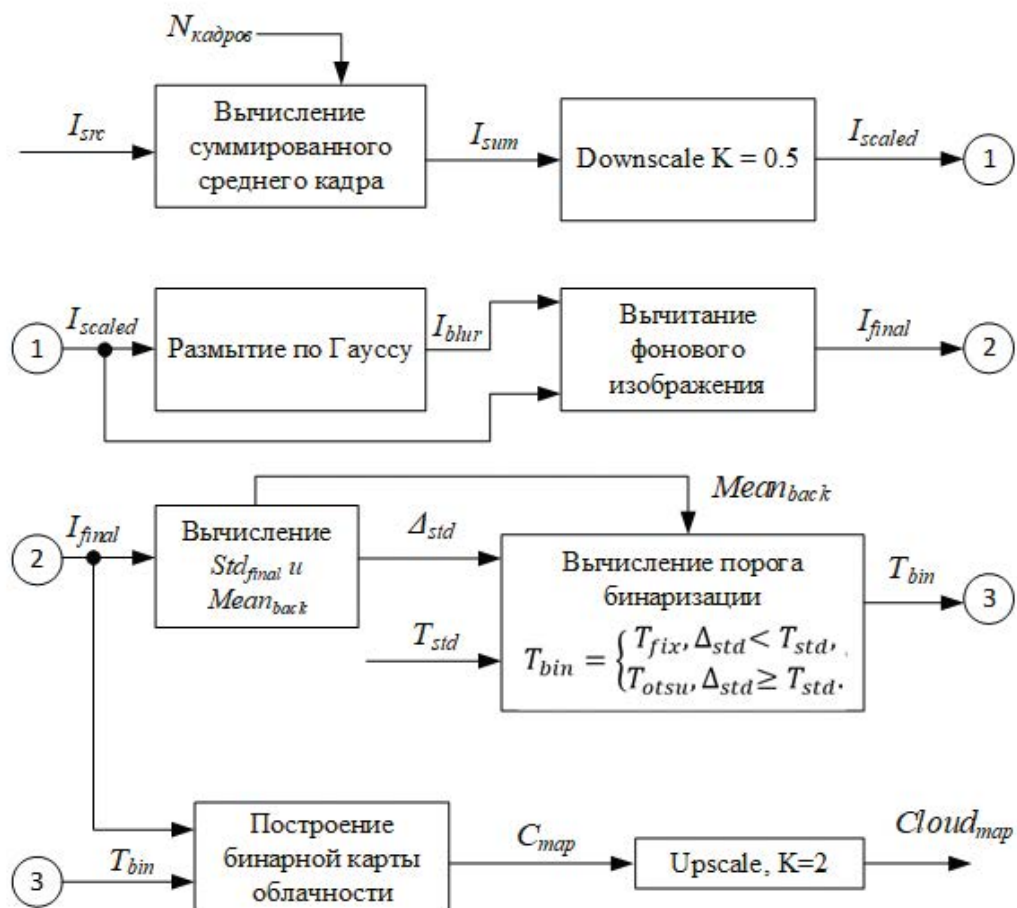


Рисунок 2 – Структурная схема алгоритма

Алгоритм включает в себя следующие основные этапы:

- предобработка и усреднение. Исходное изображение I_{src} усредняется по N кадрам для сглаживания шума (выражение 1). Затем размер изображения уменьшается вдвое для ускорения обработки. Формируется изображение I_{scaled} . Используется билинейная интерполяция

$$I_{sum} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N I_{src_i} \quad (1)$$

где I_{sum} – усредненное изображение, I_{src_i} – исходное изображение i -го кадра, N – количество кадров;

- вычисление фона. Для учёта локальных изменений яркости фон моделируется с помощью сглаживающего фильтра Гаусса с размером ядра, равным 10% от большей стороны изображения (синтетическое изображение I_{blur});
- формирование рабочего изображения I_{final} , которое получается путем попиксельного вычитания из I_{scaled} изображения I_{blur} (выражение 2)

$$I_{final} = I_{scaled} - I_{blur} \quad (2)$$

где I_{final} – итоговое рабочее изображение, I_{scaled} – уменьшенное изображение, I_{blur} – изображение фона;

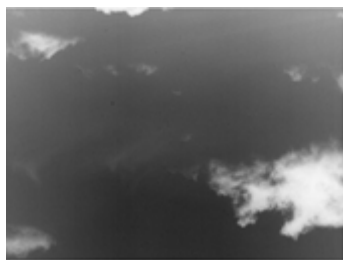
- выбор метода вычисления порога бинаризации. Как правило, для бинаризации широко используется алгоритм Оцу, однако порог T_{otsu} , вычисленный по этому методу, не подходит для обработки однородных изображений: полностью облачного или полностью чистого неба. Гистограммы подобных изображений одномодальны: имеется один пик и небольшое отклонение. Для подобных изображений

бражений порог бинаризации T_{fix} рассчитывается, согласно фиксированному выражению (3):

$$T_{fix} = Mean_{back} + K \cdot \Delta_{std} \quad (3)$$

- где $Mean_{back}$ – среднее значение яркости пикселей изображения I_{final} , Δ_{std} – среднее отклонение значений пикселей изображения I_{final} , K – множитель, подбираемый экспериментальным путем.
- Выбор между методами вычисления порога осуществляется на основе анализа величины среднего отклонения Δ_{std} . Если Δ_{std} превышает T_{std} , то изображение считается неоднородным и порог рассчитывается адаптивно с помощью метода Оцу, иначе – используется выражение (3);
- бинаризация изображения. Для бинаризации используется вычисленный ранее порог T_{bin} . Формируется карта облачности C_{map} , которая увеличивается до размеров исходного изображения (синтезированное бинарное изображение $Cloud_{map}$). Каждый элемент $Cloud_{map}$ принимает либо значение 1 (облако), либо 0 (чистое небо), что соответствует принадлежности пикселя исходного изображения I_{src} либо к облаку, либо к чистому небу.

Алгоритм тестировался на видеопотоках с камер видимого (2048 на 2048 пикселей, 10 значащих бит на пиксель) и инфракрасного (640 на 480 пикселей, 12 значащих бит на пиксель) диапазонов с частотой кадров 25 Гц. В ходе исследования экспериментально было определено количество кадров N ($N = 5$) и порог СКО для переключения между методами бинаризации T_{std} ($T_{std} = 11\%$) от максимальной яркости. Алгоритм корректно обнаруживает кучевые облака на ИК изображениях (рисунок 3), однако рассеянные перистые облака с низким контрастом могут не детектироваться.



а) исходное изображение



б) карта облачности, $\Delta_{std} = 258$. Бинаризация по методу Оцу

Рисунок 3 – Результаты обработки ИК изображения с облаками в кадре

В кадре на рисунке 4 представлен результат обработки ИК изображения условно безоблачного неба. Наблюдаемая в верхней части кадра область, ошибочно классифицированная как облака, предположительно, связана с систематической неоднородностью отклика фотоприемника. Однако это не является принципиальным ограничением алгоритма и может быть скомпенсировано процедурой предварительной коррекции.

В видимом диапазоне (рисунок 5) также корректно обнаруживаются кучевые облака, но, как и в случае с ИК диапазоном, не обнаруживаются перистые облака из-за размытости. Тем не менее, в случае наличия только перистых облаков в кадре (рисунок 6) часть из них определяется верно, что указывает на потенциальную возможность улучшения детектирующих характеристик за счет иного анализа изображения и подбора порогов бинаризации.

Исследование подтвердило работоспособность алгоритма в видимом и инфракрасном диапазонах. Выявлено, что в ИК диапазоне, где контраст между облаками и фоном неба выше, результаты сегментации более точны и устойчивы. В видимом диапазоне алгоритм уверенно детектирует кучевые облака, но

может терять слабоконтрастные перистые облака. Выявленные ограничения алгоритма носят систематический характер и могут быть учтены на этапе предобработки данных или дальнейшей модификации:

- необходима предварительная компенсация неравномерности чувствительности фотоприёмника (flat-field коррекция) в ИК диапазоне;
- повышение вероятности обнаружения перистых облаков требует введения дополнительных алгоритмов определения порогов бинаризации;
- для подавления влияния наземных объектов целесообразно использование маски горизонта, вычисляемой на основе азимута и угла места наблюдения.

Таким образом, алгоритм представляет собой эффективное решение для задачи обнаружения облаков на изображениях в градациях серого и за счет своей линейности обеспечивает легкость дальнейшей модификации, а также снижает вычислительную нагрузку на аппаратную платформу за счет отсутствия рекурсивных операций. Изложенные в данной статье границы применимости позволяют избежать типичных ошибок при его использовании.



а) исходное изображение



б) карта облачности, $\Delta std = 138$.
Бинаризация фиксированным порогом

Рисунок 4 – Результаты обработки ИК изображения безоблачного неба



а) исходное изображение



б) карта облачности, $\Delta std = 61$

Рисунок 5 – Результаты обработки изображения в видимом диапазоне. Бинаризация по методу Оцу



а) исходное изображение

б) карта облачности, $\Delta std = 49$

Рисунок 6 – Результаты обработки изображения в видимом диапазоне с малым количеством облаков в кадре. Фиксированный порог

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. С. В. Зуев, В. А. Левикин. Определение общего балла облачности по синеве неба. УДК 551.508.761+53.082.52 // *Оптика атмосферы и океана*, 26 № 6 (2013)
2. Li Q, Lu W, Yang J. A Hybrid Thresholding Algorithm for Cloud Detection on Ground-Based Color Images // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 2011;28:1286–96. DOI:10.1175/JTECH-D-11-00009.1
3. Sebastian Buntin, Chris M. Copperwheat, Helen E. Jermak. Nighttime Cloud Detection, Tracking and Prediction with All-Sky Cameras [Электронный ресурс]. URL: <https://academic.oup.com/rasti/article/doi/10.1093/rasti/rzaf034/8222489> (дата обращения: 25.01.2026)
3. Jan Adam, Jens Buss, Kai Brügge, Max Nöthe, Wolfgang Rhode. Cloud Detection and Prediction with All Sky Cameras // *European Physical Journal Web of Conferences* 144 01004 (2017). DOI: 10.1051/epjconf/201714401004
4. Michael Mommert. Cloud Identification from All-sky Camera Data with Machine Learning [Электронный ресурс]. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-3881/ab744f> (дата обращения: 29.01.2026)
5. Joseph Nied, Michael Jones, Shane Seaman, Taylor Shingler, Johnathan Hair, Brian Cairns, David Van Gilst, Anthony Bucholtz, Sebastian Schmidt, Seethala Chellappan, Paquita Zuidema, Bastiaan Van Diedenhoven, Armin Sorooshian, Snorre Stamnes. A cloud detection neural network for above-aircraft clouds using airborne cameras [Электронный ресурс]. URL: www.frontiersin.org/journals/remote-sensing/articles/10.3389/frsen.2023.1118745/full (дата обращения: 19.01.2026)

УДК 621.397.13:621.391.26

АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ*Дамир Раисович Галеев – канд. техн. наук**АО «НПК «СПП», osp-kazan@nprk-spp.ru*

В статье предложен алгоритм накопления кадров и обработки изображений путем интегрирования видеоинформации. Алгоритм может быть использован для обработки данных с камер наблюдения для решения задач обнаружения малоконтрастных объектов с летательными аппаратами или осуществления воздушного наблюдения.

Ключевые слова: *инфракрасный диапазон, матричное фотоприемное устройство, усреднение, пространственный шум, минимальная обнаруживаемая разность температур, накопление кадров.*

THERMAL IMAGING PROCESSING ALGORITHM*Damir R. Galeev – Cand. Sc. (Technology)**JSC «RPC «PSI», osp-kazan@nprk-spp.ru*

The article proposes an algorithm for accumulating frames and processing images by integrating video information. The algorithm can be used to process data from surveillance cameras to solve the problems of detecting low-contrast objects with aircraft or conducting aerial surveillance.

Key words: *IR range, matrix photodetector, averaging, spatial noise, minimum detectable temperature difference, frame accumulation*

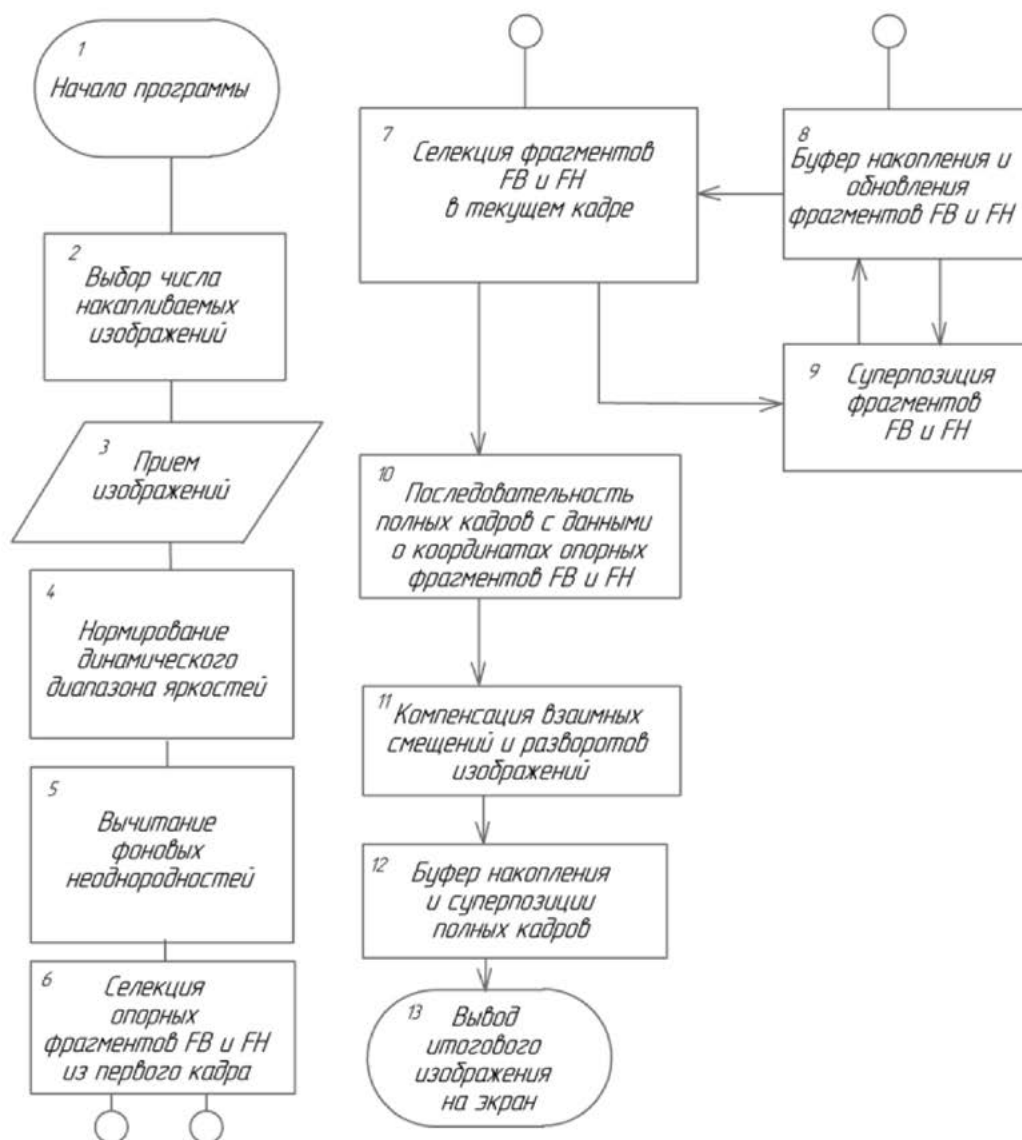
В настоящее время острую востребованность приобретают беспилотные летательные аппараты (БПЛА) и другие летательные аппараты (ЛА), оснащенные оптико-электронными приборами с различными камерами наблюдения. Одной из задач обработки данных с камер являются задачи обнаружения и распознавания. При этом успешность выполнения данных задач зависит в том числе и от качества получаемых изображений данных каналов. Другой проблемой при использовании БПЛА является вопрос ограниченности передачи больших объемов видеоинформации на дальние расстояния при больших скоростях передачи информации. Поскольку съемка может проис-

ходить в условиях наличия естественных помех: снег, дождь, туман, то не всегда оператор может получить качественное изображение. К числу основных параметров тепловизионных приборов, определяющих эффективность его использования, относят минимальную обнаруживаемую разность температур (МОРТ). От значения данного параметра зависит вероятность обнаружения объектов на дальних расстояниях. Обеспечить получение меньшего значения данного параметра возможно путем повышения отношения S/N , используя цифровую обработку. Увеличение отношения S/N осуществимо путем накопления кадров. Причем для сложно-оцениваемых объектов целесообразно предусмотреть возможность выбора числа накапливаемых кадров, обеспечив при этом малое время обработки и требуемое улучшенное значение МОРТ. Съемка при неподвижном состоянии фотоприемного устройства (ФПУ) и объекта наблюдения позволяет увеличить время накопления фотоприемной матрицы. Но в условиях полета ЛА или движения объекта наблюдения время накопления ограничено, так как увеличение времени накопления приведет к смазу ИК-изображения. Поэтому в условиях малоподвижного движения накопление кадров по пространству позволяет дополнительно увеличить отношение S/N тепловизионных изображений. Целью работы является разработка алгоритма повышения отношения сигнал/шум (S/N) путем пространственно-временного накопления сигналов и программных способов обработки информации для повышения качества изображений. Интегрирование видеоинформации по пространству основано на том, что видеосъемка совокупности исходных кадров, предназначенных для обработки, сопровождается перемещением поля зрения прибора относительно объекта съемки в процессе полета. При перемещении поля зрения в процессе съемки пиксели изображения объекта налагаются на разные чувствительные элементы матричного фотоприемника. Это позволяет снизить пространственные шумы, вызванные неоднородностью чувствительности

элементов фотоприемника. Ниже представлена блок-схема алгоритма, обеспечивающего накопление видеoinформации путем формирования единого изображения, составленного из совокупности кадров, зарегистрированных в процессе тепловизионной съемки. Формирование единого изображения осуществляется посредством попиксельного сложения яркостей изображений наблюдаемого объекта, полученных в различных кадрах.

Предварительно целесообразно провести процедуру калибровки ФПУ для коррекции неравномерности чувствительности фоточувствительной матрицы. Оператор задает начало наблюдения, после которого поступающие кадры с инфракрасной камеры будут обрабатываться. Перед запуском процесса обработки изображения поступают с тепловизионной ка-

меры в виде потока кадров и хранятся в буфере. Предварительно, в блоке 2 целесообразно предусмотреть возможность выбора числа накапливаемых кадров в зависимости от параметров движения и динамики полета. Теоретически, чем больше число накапливаемых кадров, тем более высокое значение отношения S/N на итоговых изображениях можно получить. Это может позволить быстрее обнаружить искомый объект или повысить дальность обнаружения. Перед обработкой изображений производится приведение динамического диапазона яркостей к требуемому формату данных с помощью блока 4. Процедура вычитания постоянных фоновых неоднородностей производится посредством блока 5. Полные кадры поступают на вход блока селекции 6. Блок 6 выделяет исходные опорные фрагменты F_B и



88 Рисунок 1 - Блок-схема алгоритма пространственно-временного интегрирования изображений

Fn из первого кадра изображения и копирует их в блок накопления 8. При поступлении в блок селекции 7 второго кадра, селектор 7 выбирает из этого кадра фрагменты, подобные исходным, например, методом маски, предусматривающим наложение фрагмента на различные участки поля кадра, вычисление коэффициентов корреляции между фрагментом и находящимся под ним участком изображения. Корреляционный метод основан на так называемой методике скользящего окна, предусматривающей использование коэффициента корреляции в качестве меры подобия фрагментов изображений. Этот метод является хорошо изученным и дает надежные, точные результаты, например, при совмещении фотоснимков земной поверхности, полученных из космоса в разное время. Процедура совмещения изображений с использованием корреляционного метода требует, чтобы целевая корреляционная функция имела легко локализуемый максимум коэффициента корреляции. При сканировании опорным фрагментом тепловизионного изображения по полю значение r коэффициента корреляции между фрагментами совмещаемого и опорного изображений для текущего положения опорного фрагмента вычисляется по формуле:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{mn} (A_{mn} - \bar{A})(B_{mn} - \bar{B})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{mn} (A_{mn} - \bar{A})^2 \sum_{i=1}^{mn} (B_{mn} - \bar{B})^2}}, \quad (1)$$

где A_{mn} и B_{mn} – матрицы яркостей совмещаемого и опорного фрагментов изображений размерами $m \times n$, $\bar{A}$, $\bar{B}$ – средние арифметические значения яркостей матриц A_{mn} и B_{mn} .

Среди вычисленных значений коэффициентов корреляции фрагментов изображений из кадра выбирается один фрагмент с максимальным значением r . Если опорные фрагменты не найдены, например, вследствие резких движений БПЛА, то кадр в дальнейшей обработке и накоплении не участвует. Фрагменты F_v и F_n , выбранные блоком селекции 7 из второго кадра, передаются в блок суперпозиции 9. Одновременно в блок суперпозиции 9 из буфера накопления 8 поступают исходные опорные

фрагменты F_v и F_n . В блоке суперпозиции 9 числовые матрицы яркостей двух фрагментов суммируются с различными весовыми коэффициентами по формуле (2):

$$M = M1(k-1)/k + M2/k, \quad (2)$$

где $M1$ – фрагмент, поступающий из блока накопления; $M2$ – фрагмент, поступающий из блока селекции; k – номер обрабатываемого кадра, начиная со второго.

Результирующий фрагмент M записывается в буфер накопления 8 взамен предыдущего фрагмента $M1$. С поступлением в блок селекции 7 третьего и последующих кадров циклы обработки и накопления изображений опорных фрагментов F_v и F_n повторяются, в результате чего опорные фрагменты, хранящиеся в буфере 8, наполняются информацией из всей совокупности обработанных кадров. В процессе суперпозиции производится наложение соответствующих опорных фрагментов друг на друга, чем обеспечивается подавление шумов в изображении итоговых опорных фрагментов. Последовательность полных кадров с данными о координатах опорных фрагментов из блока 10 поступает в блок 11 для компенсации разворотов и сдвигов изображения объекта в различных кадрах. Компенсация сдвига изображения осуществляется смещением пикселей. После компенсации межкадровых сдвигов и поворотов последовательность полных кадров поступает в буфер накопления 12, где происходит попиксельное суммирование изображений:

$$M_{SUM} = \sum_k^n M_k / (n-1), \quad (3)$$

где n – количество кадров, подвергшихся обработке; M_k – матрица яркости изображения в k -том кадре; M_{SUM} – матрица яркости итогового изображения, после чего итоговое изображение выводится оператору на экран дисплея 13. В результате данной обработки обеспечивается повышение качества изображения поскольку итоговое изображение будет иметь большее значение отношения сигнал/шум (S/N). В условиях ограниченности пропускной способности радиолинии или на дальних расстояниях возможна передача не потокового видео, а итоговых изображений

наблюдаемых объектов. Что при более низкой частоте кадров снизит объем передаваемой информации, повысив качество изображений малоконтрастных объектов. Данный алгоритм с процедурой компенсации смещений и разворотов кадров также может быть полезен при наложении изображений с разных оптических каналов или при коррекции параллакса многоканальных оптико-электронных систем. Поскольку в этих задачах также требуется приведение к одной оптической оси. Разработанный алгоритм может быть использован при разработке или модернизации систем цифровой обработки изображений в оптико-электронных средствах или при решении задач обнаружения малоконтрастных объектов в заданных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бугаенко А.Г., Макаров А.Н. Методы и аппаратура для измерений основных параметров и оценки качества изображения тепловизионных приборов: Аналитический обзор за 1982-87г.г.- М.: ЦНИИ и ТЭИ, 1988. - № 4648.
2. Василейский А.С. Исследование методов совмещения видеоданных дистанционного зондирования. Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. М., 2003.
3. Верденская Н.В. Сегментация изображений – статистические модели и методы //Успехи современной радиоэлектроники. – 2002. – № 12.
4. Волков В.Г, Гейхман И.Л. Основы улучшения видимости в сложных условиях. - М.: Недра-Бизнесцентр, 1999.
5. Вораксо И.Х., Соболева Н.Ф. Измерение минимальной разрешающей разности температур тепловизионных приборов // Оптико-механическая промышленность, 1982, № 7, с. 57-58.
6. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. / Пер. с англ. В.В. Чепыжова. - М.: Техносфера, 2006.
7. Демидов В.М., Яковлев М.Б. Снижение уровня шума на видеоизображении путем цифровой обработки // в сб. «Оптико-

электронные системы визуализации и обработки оптических изображений» вып. № 2, - М.: ЦНИИ «Циклон», - 2007, с. 243 - 247.

УДК 621.378.324:535.8

ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНАЯ СИСТЕМА С КОМПЕНСАЦИЕЙ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ МОД ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ*Дмитрий Александрович Серебряков¹**Николай Петрович Корнышев² – д-р техн. наук**¹филиал АО «НПК «СПП» в Великом Новгороде, serebryakov_da@npkspp.ru**²Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, nikolai.kornishev@novsu.ru*

В статье рассматривается гиперспектральное телевизионное устройство, функционирующее на основе интерферометра Фабри–Перо (далее – ФПИ). Приводится описание принципа формирования спектральных изображений и анализируется влияние дополнительных интерференционных порядков на точность спектральной селекции. Основное внимание уделено методу компенсации паразитных интерференционных мод путём вычитания соответствующих изображений. Результаты численного моделирования подтверждают эффективность предложенного подхода и демонстрируют возможность повышения спектрального разрешения без усложнения оптической части системы.

Ключевые слова: гиперспектральная визуализация, интерферометр Фабри–Перо, спектральная фильтрация, компенсация интерференционных мод, телевизионные системы.

HYPERSPECTRAL SYSTEM WITH COMPENSATION OF ADDITIONAL INTERFERENCE MODES FOR HIGH-FREQUENCY SPECTRAL ANALYSIS*Dmitry A. Serebriakov¹**Nikolai P. Kornyshev - Dr. Sc. (Technology)**¹Branch JSC «RPC «PSI» in Veliky Novgorod, serebryakov_da@npkspp.ru**²Yaroslav-the-Wise Novgorod State University, nikolai.kornishev@novsu.ru*

The article considers a hyperspectral television device based on a Fabry–Perot interferometer. The principle of spectral image formation is described and the effect of additional interference orders on the accuracy of spectral selection is analyzed. The main attention is paid to the method

of compensation of spurious interference modes by subtracting the corresponding images. The results of numerical simulation confirm the effectiveness of the proposed approach and demonstrate the possibility of increasing the spectral resolution without complicating the optical part of the system.

Key words: hyperspectral imaging, Fabry–Perot interferometer, spectral filtering, interference mode compensation, television systems.

Гиперспектральные методы регистрации находят широкое применение в задачах дистанционного зондирования, технического зрения, медицины, агромониторинга и анализа культурного наследия [1-6]. Их основным преимуществом является возможность одновременного получения пространственной и спектральной информации об объекте. Простейшие гиперспектральные телевизионные системы строятся на базе многоканальных матричных фотоприёмников с электронным разделением спектральных диапазонов [7]. Однако подобные решения, как правило, характеризуются ограниченным спектральным разрешением. Более высокой селективностью обладают системы, использующие управляемые спектральные фильтры, в частности интерферометры Фабри–Перо [8]. Вместе с тем при их применении возникает проблема регистрации сигналов, соответствующих высшим порядкам интерференции, что приводит к искажению измеряемых спектров. Наиболее близким по технической сути к рассматриваемому в статье устройству является гиперспектральное устройство, описанное в [9]. В его состав входят объектив, ФПИ, черно-белая телевизионная камера, микроконтроллер и блок памяти. Работа устройства заключается в том, что световой поток, проходя через объектив, попадает на ФПИ, который выделяет узкие спектральные зоны регистрации с определённым шагом $\delta\lambda$. Микроконтроллер управляет напряжением, которое изменяет воздушный зазор ФПИ, что позволяет проводить сканирование спектрального диапазона. Полученные

данные оцифровываются и записываются в блок памяти. Однако существенным недостатком данного устройства является возможность появления дополнительных спектральных зон регистрации, обусловленных вторыми и последующими порядками интерференции. Эти дополнительные зоны (моды) формируют суммарное изображение, которое включает данные не только от основной, но и от дополнительных зон. В результате возникает искажение выходного сигнала и снижение точности спектральной селекции. Для устранения указанного недостатка в гиперспектральном устройстве предлагается ввести блок вычитания для компенсации сигналов от дополнительных интерференционных мод. В устройстве реализуется метод компенсации сигнала изображения от дополнительных мод, который заключается в запоминании и последующем вычитании сигналов изображения, полученных от дополнительных мод, из текущих сигналов суммарного изображения, соответствующего смеси лучистых потоков, получаемых от основных и дополнительных мод. На рисунке 1 приведена структурная схема устройства.

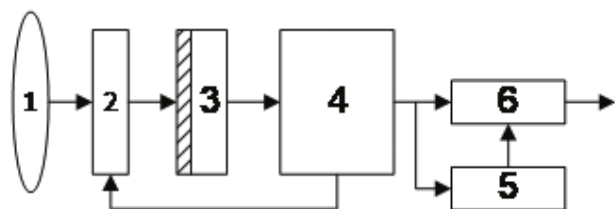


Рисунок 1 – Структурная схема гиперспектрального устройства с компенсацией интерференционных мод

Структурная схема устройства содержит: 1 – объектив, 2 – ФПИ, 3 – телевизионную камеру, 4 – микроконтроллер, 5 – блок памяти, 6 – блок вычитания. Сигнал изображения формируется телевизионной камерой, на вход которой поступает оптический поток, прошедший через объектив и ФПИ. Микроконтроллер управляет ФПИ, блоком памяти, а также оцифровывает текущий видеосигнал от телевизионной камеры и передает его на блок памяти для записи. Вычитание производится в блоке 6, на входы которого поступает текущий сигнал изображения и запомненный в блоке памяти 5 сигнал изображения от дополнительных мод. Рабо-

способность рассмотренного выше устройства подтверждается результатами компьютерного моделирования в среде Python для диапазона длин волн $\Delta\lambda = \lambda_{max} - \lambda_{min}$ с $\lambda_{min} = 0.4$ мкм и $\lambda_{max} = 0.7$ мкм при величинах воздушного зазора $d_{min} = 0.3$ мкм и $d_{max} = 0.5$ мкм с шагом $\delta d = 0.01$ мкм. Для расчета спектральных характеристик ФПИ использовалась известная формула Эйри [10]:

$$T(\lambda) = \frac{T^2}{1 + R^2 - 2R \cos\left(\frac{4\pi \cdot m \cdot d \cdot \cos(\theta)}{\lambda}\right)}, \quad (1)$$

где $T = 0,1$ – коэффициент пропускания зеркала, $R = 1 - T = 0.9$ – коэффициент отражения зеркала, d – величина воздушного зазора, $m = 1$ – порядок интерференции, $\theta = 5^\circ$ – угол падения света на зеркало интерферометра.

При моделировании рассчитывалась спектральная характеристика $T1(\lambda)$ для воздушных зазоров в диапазоне от d_{min} до d_{max} с шагом δd и длин волн в диапазоне от λ_{min} до λ_{max} (вычитаемое) и спектральная характеристика $T2(\lambda)$ для воздушных зазоров в диапазоне от $2d_{min}$ до $2d_{max}$ с шагом $2\delta d$ и длин волн в диапазоне от $2\lambda_{min}$ до $2\lambda_{max}$ (уменьшаемое), а также результат компенсации (вычитания) $T2(\lambda) - T1(\lambda)$. На рисунке 2 показаны результаты компьютерного моделирования спектральных характеристик интерферометра Фабри–Перо. Они демонстрируют процесс последовательного сканирования спектрального диапазона 0.4–0.7 мкм за счёт изменения воздушного зазора интерферометра. При этом на каждом шаге формируется узкая спектральная полоса регистрации. Компенсация дополнительной интерференционной моды осуществляется путём вычитания спектральной характеристики дополнительной моды $T1(\lambda)$ из суммарной характеристики $T2(\lambda)$, что позволяет выделить полезную спектральную компоненту и повысить точность спектральной селекции.

На рисунке 3 приведена иллюстрация принципа компенсации сигнала от лучистого потока дополнительной моды путем вычитания изображений.

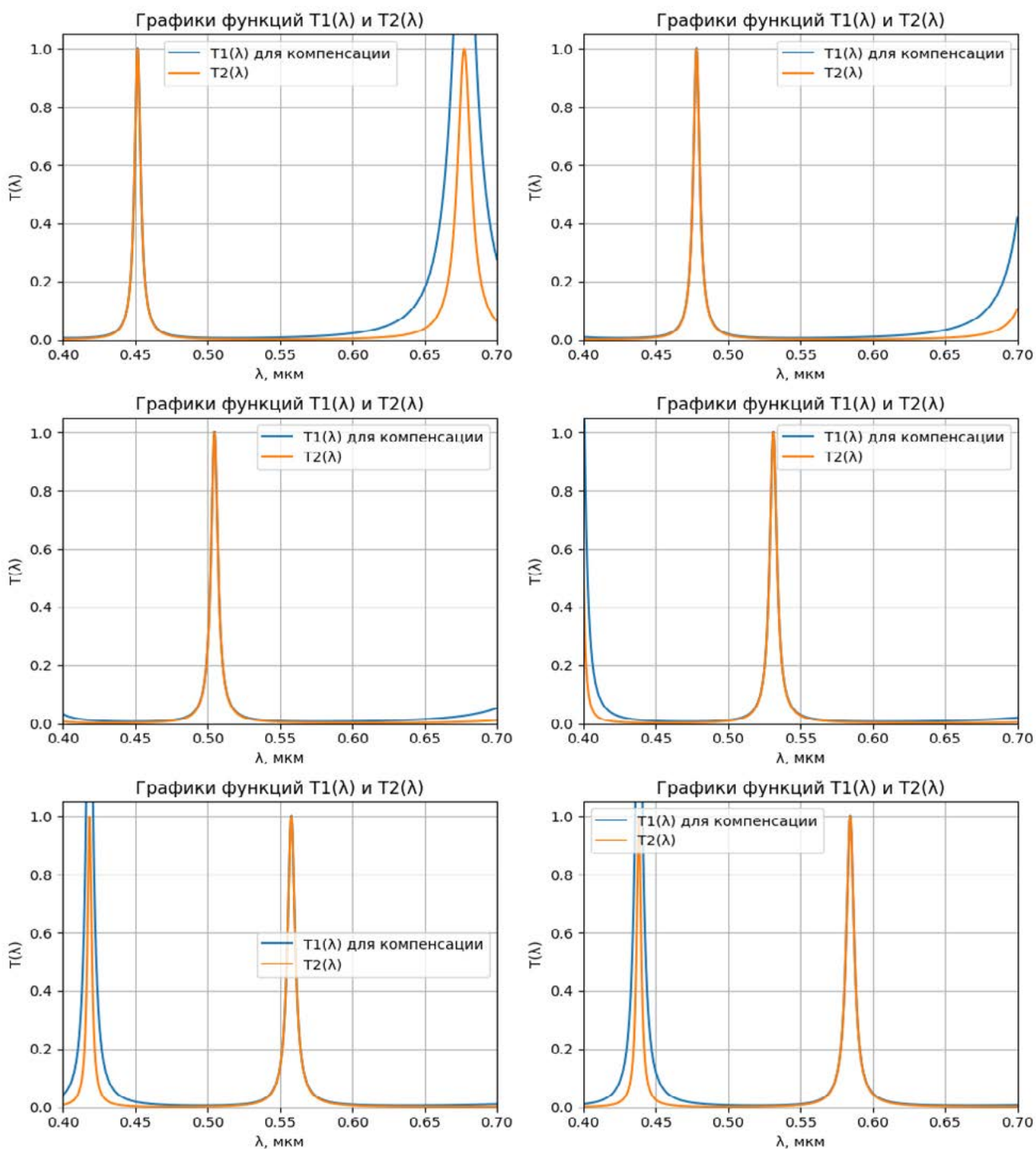


Рисунок 2 - Результаты компьютерного моделирования спектральных характеристик



Рисунок 3 – Иллюстрация принципа компенсации сигнала изображения от дополнительных мод

Компенсация сигнала (рисунок 3, изображение 3) осуществляется путем вычитания изображения дополнительной моды (рисунок 2, изображение 1), который был записан ранее из совокупного сигнала, содержащего как основные, так и дополнительные моды (рисунок 3, изображение 1). На изображениях 1–3 условно показаны треугольниками фрагменты изображения, соответствующие дополнительной моде, прямоугольниками – фрагменты изображения, соответствующие основной моде. Таким образом, в результате компенсации получается изображение, соответствующее только основным интерференционным модам, что обеспечивает повышение точности спектральной селекции. Можно утверждать, что внедрение блока вычитания в конструкцию гиперспектрального телевизионного устройства обеспечивает эффективное подавление паразитных сигналов, порождаемых дополнительными интерференционными модами. Это приводит к существенному повышению точности и достоверности формируемых спектральных изображений. Результаты численного моделирования подтверждают работоспособность подхода и его способность к селективной регистрации данных в узких спектральных интервалах. Ключевым преимуществом предложенной архитектуры является отсутствие необходимости в использовании сложного многосигнального матричного фотоприемника, что упрощает аппаратную реализацию системы и снижает её стоимость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бельский А.Б. Применение гиперспектрометров для решения задач по обнаружению, распознаванию объектов в составе вертолетов // *Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки: сборник научных статей по материалам VI Международной научно-практической конференции «АВИАТОР», 14–15 февраля 2019 г. Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2019. С. 91–97.*
2. Lu G., Fei B. *Medical hyperspectral imaging: A review // Journal of Biomedical Optics. 2014. 19(1). 010901. DOI: 10.1117/1.jbo.19.1.010901*
3. Feng Y.Z., Sun D.W. *Application of hyperspectral imaging in food safety inspection and control: A review // Crit. Rev. Food. Sci. 2012. 52. P. 1039–*

1058. DOI: 10.1080/10408398.2011.651542

4. Adão T., Hruška J., Pádua L., Bessa J., Peres E., Morais R., Sousa J. *Hyperspectral imaging: A review on UAV-based sensors, data processing and applications for agriculture and forestry // Remote Sens. 2017. 9. 1110. DOI: 10.3390/rs9111110*
5. Klein M.E., Aalderink B.J., Padoan R., De Bruin G., Steemers T.A. *Quantitative hyperspectral reflectance imaging // Sensors. 2008. 8(9). P. 5576–5618. DOI: 10.3390/s8095576*
6. Rosi F., Miliani C., Braun R., Harig R., Sali D., Brunetti B.G., Sgamellotti A. *Noninvasive analysis of paintings by mid-infrared hyperspectral imaging // Angew. Chem. Int. Ed. Engl. 2013. 52(20). P. 5258–5261. DOI:10.1002/anie.201209929*
7. Гурyleва А.В., Хорохоров А.М., Ширанков А.Ф., Введенский В.В. *Гиперспектрометр с повышенной спектральной разрешающей способностью. Патент № 2716454 C1 Российская Федерация, МПК G01J 3/02, G01J 3/28, G01J 3/51. Опубл. 11.03.2020.*
8. Хорохоров А.М., Ивашкина Е.С., Гурyleва А.В. *Быстродействующий гиперспектрометр с управляемым спектральным фильтром. Патент № 2801836 C1 Российская Федерация, МПК G01J 3/02, G01N 21/25. Опубл. 16.08.2023.*
9. US Patent No: US10.323.985 B2 18.06.2019 (МПК G01J3/10, G01J3/02).
10. *Fabry–Pérot interferometer [Электронный ресурс]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Fabry-Pérot_interferometer (дата обращения: 10.02.2026).*

Требования к материалам для публикации в журнале «Прецизионные оптические информационно-измерительные и управляющие системы»

В журнал ПОИИУС для публикации принимаются отвечающие критериям ВАК РФ материалы (научные статьи, материалы конференций и круглых столов АО «НПК «СПП», методические и аналитические материалы, описания изобретений, обзоры, научные отзывы и рецензии) о научных достижениях в области прецизионных оптических информационно-измерительных и управляющих систем, системного анализа, обработки информации и других направлений, указанных в п. 2, ранее не публиковавшиеся в открытой печати.

Представленные материалы должны удовлетворять рубрикам журнала, соответствующим следующим научным специальностям Высшей аттестационной комиссии (ВАК):

- оптические и оптико-электронные приборы и комплексы (2.2.6);
- информационно-измерительные и управляющие системы (2.2.11);
- системный анализ, управление и обработка информации (2.3.1);
- радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения (2.2.13);
- приборы навигации, радиолокация и радионавигация (2.2.5, 2.2.16);
- динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов (2.5.16).

Материалы для публикации сотрудников АО «НПК «СПП» представляются в редакцию непосредственно на имя главного редактора журнала служебной запиской с приложением материалов, указанных в п. 5.

Материалы сотрудников других организаций или самостоятельных авторов направляются в редакцию в письменном или электронном виде сопроводительным письмом на имя главного редактора журнала (в электронном виде материалы направляются на электронный адрес редакции redactsia@nprk-spp.ru).

К сопроводительному письму, отправляемому по почте, для публикации материалов прикладываются:

- научно-технические материалы для публикации в печатном виде – 1 экз;
- диск с электронной версией материалов – 1 экз;
- оформленный акт экспертизы о возможности открытого опубликования материалов (согласуется с заказчиком, если материалы разработаны на основе контрактов (хоздоговоров)) – 1 экз;
- экспертное заключение комиссии внутреннего экспортного контроля (КВЭК) об отсутствии в материалах сведений, подпадающих под действие списков контролируемых товаров и технологий (согласуется с заказчиком, если материалы разработаны на основе контрактов (хоздоговоров)) – 1 экз;
- рецензия специалиста отрасли науки по специальности предоставляемых материалов (кандидата или доктора наук), имеющего не менее одной публикации по этой специальности за последние три года;
- согласия на обработку персональных данных от всех авторов с их подписями;
- сведения об авторах.

К сопроводительному письму, отправляемому на электронную почту редакции, для публикации материалов прикладываются:

- научно-технические материалы для публикации в электронном виде;
- отсканированная копия оформленного акта экспертизы о возможности открытого опубликования материалов;
- отсканированная копия экспертного заключения комиссии внутреннего экспортного контроля (КВЭК) об отсутствии в материалах сведений, подпадающих под действие списков контроли-

руемых товаров и технологий;

- отсканированная рецензия специалиста отрасли науки по этой специальности (кандидата или доктора наук), имеющего не менее одной публикации по этой специальности за последние три года;
- отсканированные согласия на обработку персональных данных от всех авторов с их подписями;
- сведения об авторах.

Допускается предварительное представление научно-технических материалов для оценки редакцией соответствия материалов рубрикам и требованиям журнала, а также возможности опубликования.

Экспертное заключение КВЭК оформляется в соответствии с «Типовой методической инструкцией по проведению экспертизы научно-технических материалов, подготовленных к открытому опубликованию и обладающих признаками контролируемых технологий», изложенной в Приложении № 1 к протоколу заседания Комиссии по экспортному контролю Российской Федерации от 15 июля 2025 г. № ЭК-2прс. Экспертное заключение утверждает председатель КВЭК, а при отсутствии КВЭК в организации - руководитель организации или уполномоченное им должностное лицо организации.

С каждым автором (соавтором) научной статьи заключается лицензионный договор о передаче редакции журнала «Прецизионные оптические информационно-измерительные и управляющие системы» неисключительных прав на использование статьи на безвозмездной основе, а также подписывается согласие на обработку персональных данных в целях передачи материалов статьи в электронном виде в НЭБ (e-Library, РИНЦ). Лицензионный договор составляется в редакции и высылается авторам, авторы возвращают подписанный лицензионный договор в редакцию по почте или его отсканированную цветную копию по электронной почте.

В материалах для публикации рекомендуется указывать: постановку проблемы исследования, краткое обоснование её актуальности, новизны, теоретического и практического значения. При описании методологии применительно к теоретическим исследованиям целесообразно указывать применяемые базовые теории, к экспериментам исследованиям – применяемые методы и методики исследования, способы сбора и обработки данных, а в отношении моделей – результаты вычислительных и имитационных экспериментов. Желательно указание ограничений на применение разработок авторов и областей их применения.

Материалы для публикации должны содержать:

- индекс УДК (слева, сверху);
- индекс e-Library (слева, сверху, под индексом УДК);
- инициалы и фамилии авторов, учёная степень и учёное звание каждого из авторов, должность, место работы (полное название организации, страна, город), контактная информация (e-mail);
- название статьи (жирным шрифтом, заглавными буквами);
- аннотация (5 – 8 строк), ключевые слова (5 – 7 слов) на русском и английском языках с отступом 2 см (ключевые слова должны соответствовать основным специальностям ВАК – рубрикам журнала, по которым подаётся статья);
- основной текст;
- заключение (выводы) – могут идти без заголовка после основного текста;
- список литературы.

Объём статьи не должен превышать 20 страниц и содержать не более 8 рисунков. Все страницы должны быть пронумерованы.

шрифтом Times New Roman, размер – 14, межстрочный интервал – 1.5, и представлен в виде отдельного файла вместе с иллюстрациями. Поля со всех сторон – 25 мм.

Текст не должен содержать пустых строк, для задания межстрочных интервалов должны использоваться абзацные интервалы (6 пт, 12 пт).

Иллюстрации также должны быть представлены в отдельном виде в соответствии с требованиями, изложенными в п. 19.

Формулы и математические обозначения в тексте, представленные буквами латинского и греческого алфавитов, включая индексы, набираются шрифтом Times New Roman, курсивом, русские символы и обозначения – прямым шрифтом. Для формул должен использоваться редактор, встроенный в MS Word.

Математические символы ($\lim$, $\sup$, $\log$, $\max$, $\Pr$, M , St и т. п.), тригонометрические функции ($\sin$, $\cos$ и т. п.), индексы, обозначенные по-русски, и цифры набираются обычным шрифтом прямого начертания, векторы – шрифтом жирного начертания.

Единицы измерения (*мм*, *см*, *км* и т. п.) набираются *курсивом*.

Формулы, имеющие ссылки в тексте, должны иметь сквозную нумерацию. Номер формулы, заключённый в круглые скобки, располагается справа от формулы на краю формата набора перед правым полем.

Все используемые буквенные обозначения и аббревиатуры должны быть расшифрованы. Размерность величин должна соответствовать системе СИ (ГОСТ 8.417-2024 — «Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин»).

Элементы списка литературы должны содержать фамилии и инициалы авторов, полное название работы. Применительно к книгам указываются место издания, издательство, год издания, количество страниц, к статьям – название журнала или сборника, год выпуска, том, номер, номера первой и последней страниц цитируемых материалов.

Список литературы для статьи должен содержать не более 20 источников, для обзора – не более 40. Номера литературы в списке расставляются в порядке цитирования в тексте. Ссылки на литературу в основном тексте материалов нумеруются арабскими цифрами и заключаются в квадратные скобки. Автор несёт ответственность за правильность данных, приведённых в списке литературы.

Векторные иллюстрации (графики, схемы, чертежи и т. д.), вставленные в WORD-файл статьи, должны быть дополнительно представлены в виде отдельных файлов в форматах приложений (программ), в которых они были созданы. В иллюстрациях латинские и греческие буквы, индексы, единицы измерения и позиции набираются *курсивом*, а цифры и русский текст – прямым начертанием шрифта Times New Roman.

Растровые иллюстрации (фотографии, градиентные рисунки и т. д.) представляются в форматах *jpeg(jpg)*, *tiff(tif)*, *png* с разрешением не менее 300 dpi.

Размер иллюстрации должен быть не более формата А4, желательно, чтобы он занимал не более 0.3 размера страницы формата А4. При изменении формата иллюстрации редакторами (пропорциональном сжатии или расширении, перемещении) иллюстрация не должна искажаться и оси графиков должны соответствовать рисункам на графиках. Приветствуются цветные иллюстрации. Иллюстрации располагаются в тексте статьи сразу после ссылок на них. Если иллюстрация не помещается на странице после ссылки, она переносится на следующую страницу. При буквенной нумерации иллюстраций (например, 1а, 1б, 1в и т. д.) каждая из них считается за отдельную. Под иллюстрацией должна быть подпись Рисунок № – Название рисунка, где № – номер рисунка. Точка в конце названия рисунка не ставится.

Таблицы должны быть пронумерованы, иметь краткое наименование сверху таблицы: Таблица № – Название таблицы, где № – номер таблицы. Точка в конце названия таблицы не ставится. Текст в таблице печатается без полужирного начертания.

Сведения об авторах должны представляться в виде отдельного документа (печатной страницы или документа в формате MS Word). В полном виде они не подлежат печати в журнале, а используются исключительно для взаимодействия редакции с авторами). В сведениях об авторе(ах) следует сообщить: ФИО (полностью), учёную степень, учёное звание или он является аспирантом, рабочие телефоны (с кодом города) или мобильные (предпочтительней), адрес электронной почты. В сведениях также должен быть указан ответственный автор (автор, которому делегированы полномочия представлять интересы группы авторов), с кем редакция будет взаимодействовать при работе над статьёй.

Научно-технические материалы, оформленные с нарушением правил редакции, возвращаются авторам на доработку.

О результатах редактирования статьи для выпуска журнала (о корректуре статьи) сообщается ответственному автору. Автор обязан в срок до 5 рабочих дней согласовать результаты редактирования. При отсутствии замечаний автор должен известить об этом редакцию. При не поступлении в редакцию замечаний в течение 5 рабочих дней корректура считается согласованной и ответственность за возможные ошибки несут авторы. Замечания после этого срока принимаются только по уважительным причинам (отпуск, командировка).

Консультации по корректному оформлению планируемых к подаче научно-технических материалов можно получить в редакции по телефону +7 (495) 988-21-40 доб. 30-33.

Рукописи авторам статей не возвращаются.

После выпуска номера журнала авторам напечатанных научно-технических материалов бесплатно предоставляется количество экземпляров журнала по числу авторов.

Издатель

*Акционерное общество
«Научно-производственная корпорация
«Системы прецизионного приборостроения»*

Главный редактор

Сухой Ю. Г.

Технический редактор

Никольская Т. В.

Литературный редактор

Кутузова Д. М.

Дизайн и верстка

Хафизова Е. А.

Адрес редакции

*111024, г. Москва,
улица Авиамоторная, дом № 53
тел.: 8 (495) 988-21-55 доб. 3033
e-mail: redactsia@npk-spp.ru*

Выход в свет ежеквартально

Подписано в печать 06.04.2026 г. Формат 60x84/8.

Бумага мелованная. Цифровая печать.

Объем 12,5 печ. л. Тираж 300 экз.

*Оригинал-макет подготовлен редакцией журнала
«Прецизионные оптические
информационно-измерительные
и управляющие системы»*

*Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии «Ридо».
603074, Нижний Новгород, ул. Шалапина, 2а.*