

Барышников Николай Васильевич

**Разработка методов и оптико-электронной аппаратуры автоюстировки
бортовой локационной станции с мощным источником лазерного
излучения**

05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Москва – 2012

✓ Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: Бездидько Сергей Николаевич,
доктор технических наук, профессор,
ОАО «НПК «Системы прецизионного
приборостроения»

Белозеров Альберт Федорович,
доктор технических наук, профессор,
ФГУП «НПО «Государственный институт
прикладной оптики»

Козлов Николай Николаевич,
доктор технических наук, профессор,
4 ЦНИИ МО РФ

Ведущая организация ОАО «ГСКБ «Алмаз – Антей», г. Москва

Защита диссертации состоится «31» октября 2012 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.19 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью организации, просим направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр.1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.19.

Автореферат разослан «__» _____ 2012 г.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



2000602

Барышников Н.В. Разработка

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук

Е.В. Бурый

603

2576

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Оптико-электронные системы (ОЭС), использующие лазерное излучение высокой мощности, получили широкое распространение в современной технике. К ним относятся лазерные системы экологического мониторинга природной среды, лазерные локационные станции, лазерные технологические установки для резки, сварки, обработки поверхностей различных материалов, научно-исследовательские установки для изучения взаимодействия лазерного излучения с веществом и т. д. В процессе проектирования таких ОЭС обеспечивается решение их главной задачи – формирование излучения мощного рабочего лазера (МРЛ) с требуемым пространственно-энергетическим распределением.

Вместе с тем, при эксплуатации лазерных ОЭС, как правило, необходимо решить ряд дополнительных задач. Эти задачи связаны с юстировками каналов системы, их калибровками и т.д. В некоторых случаях такие задачи решаются при проведении профилактических работ и с использованием дополнительной аппаратуры. Но для целого ряда систем эти задачи должны решаться в процессе работы и более того – их решение обеспечивает качество выполнения главной задачи ОЭС.

К таким ОЭС относятся современные лазерные локационные станции (ЛЛС), предназначенные для передачи энергии излучения МРЛ на объект исследования, находящийся на значительных расстояниях – в десятки и сотни километров, в т.ч. для передачи лазерного излучения на наблюдаемые подвижные воздушные и космические объекты. Особую актуальность в последние годы приобрела проблема уничтожения космического мусора как искусственного, так и естественного происхождения. Наиболее эффективно она решается с помощью ЛЛС, расположенной на борту авиационного носителя, что позволяет в значительной степени ослабить влияние атмосферных флуктуаций на работу станций.

Для таких систем угловые размеры сформированной диаграммы направленности излучения МРЛ минимальны и составляют не более 20 - 30 угловых секунд. Погрешности наведения лазерного пучка на объект, а также погрешности взаимной выставки осей каналов ЛЛС должны составлять единицы угловых секунд. Это обстоятельство позволяет рассматривать такие системы как высокоточные.

Габаритные размеры перспективной высокоточной ЛЛС составляют несколько десятков метров вдоль оптической оси, ее основные узлы располагаются на нескольких опорно-несущих конструкциях, распределенных по носителю. В таких условиях неизбежны механические воздействия на ЛЛС со стороны носителя в процессе его движения. Кроме

того, такая система функционирует при значительных изменениях температуры окружающей среды в процессе работы ЛЛС. Еще одним возмущающим фактором является собственные уводы оси диаграммы направленности излучения МРЛ за счет нагрева деталей его конструкции в результате выделения тепла системой накачки излучения.

Обеспечить в таких условиях высокоточное наведение пучка излучения МРЛ на объект исследования возможно, прежде всего, за счет использования системы автоустойровки (САЮ), позволяющей стабилизировать в заданных пределах угловое положение оси диаграммы направленности пучка излучения МРЛ, сформированной передающим каналом ЛЛС, относительно базового положения оси приемного канала.

В функциональные схемы ЛЛС включаются дополнительные узлы САЮ, обеспечивающие измерение углового положения оси пучка МРЛ, а при необходимости – отработку измеренного рассогласования с номинальным положением. В большинстве случаев использование для союстировки осей непосредственно излучения МРЛ связано с многочисленными проблемами (высокая мощность, ИК диапазон излучения, значительные габариты пучка излучения МРЛ и т.д.). Избежать этих проблем удастся за счет введения в состав системы дополнительного маркерного источника (МИ) излучения, представляющего собой полунатурную модель мощного источника лазерного излучения ЛЛС. Как правило, это лазерный излучатель видимого диапазона спектра, с незначительной мощностью излучения и минимальными габаритами пучка. Угловое положение оси пучка излучения МИ предварительно должно быть выставлено по контролируемой оси пучка МРЛ. Далее, в системе, пучок излучения МИ является репером пространственного положения оси пучка излучения МРЛ и может быть использован в приемном канале для его контроля.

САЮ не может быть разработана автономно от самой ЛЛС. Более того, ее функциональные узлы глубоко интегрированы в функциональную схему ЛЛС и система требований к ним должна разрабатываться на основе единой методики. Эта методика должна учитывать возможное воздействие на пространственные характеристики пучка излучения МИ и на работу САЮ в целом высокоэнергетического излучения МРЛ за счет проявления эффектов дифракции и нелинейной самодефокусировки его распространяющегося пучка.

Работы в данном направлении ведутся во ФГУП «НПО Астрофизика», ОКБ МИРЭА, ОАО «ОКБ «Гранат» им. В.К. Орлова», ОАО «КБточмаш им. А.Э. Нудельмана», ОАО «НПК «Системы прецизионного приборостроения», ФГУП ГосНИИЛЦ «Радуга», ОАО «ГСКБ «Алмаз-Антей», ГОИ им.С.И. Вавилова, МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Серьезным препятствием на пути создания высокоточных ЛЛС является отсутствие в настоящее время системных теоретических исследований и научно обоснованных методик проектирования систем

угловой автоюстировки осей их каналов на основе использования методов полунатурного моделирования.

Поэтому разработка научных основ проектирования систем автоюстировки каналов ЛЛС с мощным источником лазерного излучения, функционирующих в условиях механических возмущающих воздействий со стороны носителя, значительных изменений температуры окружающей среды, а также собственных уводов осей диаграмм направленности лазерных излучателей, является актуальной научно-технической задачей.

Цель работы и задачи исследований

Целью работы является разработка методов и оптико-электронной аппаратуры автоюстировки ЛЛС с мощным источником лазерного излучения, базирующихся на использовании методов полунатурного моделирования.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

- обоснованы методологические основы использования полунатурных методов моделирования при проектировании систем автоюстировки современных ЛЛС с мощным источником лазерного излучения;

- разработаны принципы формирования функциональной схемы системы автоюстировки каналов ЛЛС, построенной на основе использования полунатурной модели мощного рабочего лазера – маркерного источника излучения;

- исследовано воздействие излучения мощного рабочего лазера ЛЛС на пространственные характеристики пучка излучения маркерного источника, а также на работу системы автоюстировки в целом;

- разработаны методики проектирования функциональных узлов оптико-электронной системы автоюстировки ЛЛС, обеспечивающей стабилизацию в заданных пределах углового положения оси диаграммы направленности излучения мощного рабочего лазера, сформированной передающим каналом ЛЛС, относительно базового положения оси приемного канала в условиях существующих внешних возмущающих воздействий;

- разработан и испытан комплекс аппаратуры автоюстировки перспективной ЛЛС;

- создана метрологическая база, включающая методы и технические средства контроля точностных характеристик разработанной аппаратуры автоюстировки перспективной ЛЛС.

Объектом исследования является система автоюстировки локационной станции с мощным источником лазерного излучения.

Предметом исследования является научное обоснование технических решений, обеспечивающих создание аппаратуры автоюстировки лазерной локационной станции.

Методы исследований. При решении теоретических и прикладных задач были использованы: теория линейных систем, матричный метод

расчета оптических систем, методы теории вероятностей и математической статистики, методы математического моделирования.

Научная новизна исследований

Научная новизна работы заключается в том, что в процессе проведения исследований были получены новые научные результаты теоретического и прикладного характера:

- на базе развития теории оптико-электронных систем разработаны научные и методологические основы проектирования системы автоюстировки лазерной локационной станции, обеспечивающей стабилизацию в заданных пределах взаимного углового положения осей ее каналов в условиях существующих внешних возмущающих воздействий;

- научно обоснованы технические решения, обеспечивающие создание системы автоюстировки лазерной локационной станции на основе использования полунатурной модели мощного рабочего лазера – маркерного источника излучения;

- разработана модифицированная математическая модель дифракции и нелинейной самодифракции пучка излучения мощного рабочего лазера в ближней зоне и исследовано его воздействие на пространственные характеристики пучка излучения маркерного источника, а также на работу системы автоюстировки в целом;

- разработаны математическая модель и методика проектирования устройства пространственного сопряжения пучков излучения мощного рабочего лазера и маркерного источника, построенного на основе дифракционных оптических элементов и устойчивого к существующим внешним возмущающим воздействиям;

- разработаны математическая модель и методика проектирования устройства параллельного переноса пучка излучения маркерного источника, обеспечивающего высокоточное измерение углового положения оси переносимого пучка в условиях существующих внешних возмущающих воздействий;

- разработана методика проектирования оптико-электронного координатора устройства союстировки осей пучков излучения мощного рабочего лазера и маркерного источника, обеспечивающего заданную погрешность измерения углового рассогласования осей этих пучков в условиях существующих внешних возмущающих воздействий;

- создана метрологическая база в обеспечение контроля точностных характеристик аппаратуры автоюстировки.

Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие новые положения и результаты, полученные в диссертационной работе:

- математическая модель системы автоюстировки лазерной локационной станции, описывающая поведение ее узлов в условиях внешних механических возмущающих воздействий, изменений температуры

окружающей среды, а также собственных уводов осей диаграмм направленности излучения как мощного рабочего лазера, так и маркерного источника;

- модифицированная математическая модель дифракции и нелинейного взаимодействия со средой пучка излучения мощного рабочего лазера, а также результаты исследования его воздействия на пространственные характеристики пучка излучения маркерного источника и на работу системы автоюстировки в целом;

- совокупность технических решений построения узлов системы автоюстировки, обеспечивающих стабильную работу лазерной локационной станции в условиях существующих внешних возмущающих воздействий;

- методика проектирования устройства пространственного сопряжения пучков излучения мощного рабочего лазера и маркерного источника, построенного на основе дифракционных оптических элементов;

- методика проектирования устройства параллельного переноса пучка излучения маркерного источника, обеспечивающего перенос пучка на заданное расстояние и измерение угловых координатах его оси.

Практическая ценность работы

Практическая ценность работы заключается в разработанных оригинальных функциональных схемах и методиках проектирования узлов системы автоюстировки, которые были использованы при разработке и создании действующих образцов аппаратуры автоюстировки перспективной ЛЛС, в том числе:

- функциональной схемы системы автоюстировки ЛЛС, устройств союстировки мощного рабочего лазера и маркерного источника, а также устройств параллельного переноса пучка излучения маркерного источника.

Разработанные в диссертации методики проектирования основных функциональных узлов САЮ были использованы при проектировании высокоточных лазерных ОЭС различного назначения. К ним относятся следующая аппаратура:

- ИК-интерферометры для контроля формы оптических поверхностей в процессе производства на стадии шлифования;

- аппаратура для экспериментальных исследований световозвращательных характеристик оптико-электронных средств в среднем и длинноволновом ИК диапазонах;

- лазерная оптико-электронная аппаратура дистанционного бесконтактного контроля тепловых уводов элементов механических конструкций космических аппаратов при тепловакуумных испытаниях.

Реализация и внедрение результатов исследований

Результаты диссертационной работы внедрены на предприятиях: ОАО «ГСКБ «Алмаз-Антей», ОАО «ЛЗОС», ФБУ «З ЦНИИ Минобороны России», ФГУП ГКНПЦ им. М.В. Хруничева.

Реализация результатов работы подтверждается актами о внедрении и использовании.

Результаты работы использованы в 7 НИР и ОКР, выполненных в НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1995 – 2011 г.г.

Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана в курсе «Проектирование оптико-электронных приборов».

Апробация результатов работы

Основные положения диссертации докладывались на научно-технических конференциях и семинарах:

- на международных научно – технических конференциях «Современное телевидение» (г. Москва) в 2006, 2008, 2009, 2010 г.г.;
- на научно-технических конференциях «Радиооптические технологии в приборостроении» (г. Сочи) в 2004, 2005, 2006 г.г.;
- на международных научно – технических конференциях «Лазеры в науке, технике, медицине» (г. Сочи) в 1998, 2000, 2001, 2002, 2009, 2010 г.г..

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в 18 статьях в центральных научно-технических журналах, входящих в перечень ВАК РФ. На разработанные способы и устройства высокоточных лазерных оптико-электронных систем получено 8 авторских свидетельств и патентов РФ.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 163 наименований. Общий объем работы – 335 страниц машинописного текста, включая 149 рисунков и 34 таблицы.

2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна, практическая ценность и научные положения, выносимые на защиту. Приведена структура диссертации, формы апробации и реализации результатов.

В первой главе проанализированы требования, которые предъявляются к юстировке каналов современных ЛЛС. Выделены высокоточные ЛЛС, как системы, для которых угловая юстировка осей каналов должна обеспечиваться с секундной погрешностью.

Показано, что габаритные размеры оптической системы перспективной ЛЛС составляют 20 – 30 м по оптической оси, а ее основные узлы располагаются на нескольких опорно-несущих конструкциях, распределенных по носителю. Рассмотрены источники внешних возмущающих воздействий, приводящих к угловым разъюстировкам осей каналов такой ЛЛС. Систематизированы амплитудные и частотные характеристики этих воздействий (см. Таблицу 1).

Таблица 1.

Основные характеристики возмущающих воздействий на ЛЛС

№	Вид воздействия	Частотные характеристики воздействия	Амплитудные характеристики воздействия
1	Температурные уводы элементов конструкции	Не более 0,1Гц	1....5 угл.мин.
2	Нестабильность положения оси диаграммы направленности излучения МРЛ от импульса к импульсу	Соответствует рабочей частоте МРЛ	< 30 угл.с
3	Механические вибрации носителя с использованием демпфирующих платформ	Не более 60Гц	5....10 угл.с
4	Механические деформации корпуса носителя.	Не более 0,1Гц	1....10 угл.мин.

На основе проведенного анализа формулируются юстировочные задачи, связанные с этапами работы ЛЛС (см. Таблицу 2):

Таблица 2.

Юстировочные задачи, решаемые в процессе эксплуатации перспективной лазерной локационной станции

№	Наименование
1	Юстировка оптической системы без включения МРЛ и до начала движения носителя
2	Автоюстировка оптической системы без включения МРЛ после начала движения носителя
3	Автоюстировка системы после включения МРЛ во время движения носителя

Рассмотрены различные физические принципы работы САЮ и обоснована необходимость ее построения на основе использования МИ как полунатурной модели МРЛ. Отмечается, что именно такое построение САЮ обеспечивает решение задач юстировки в полном объеме.

Далее в главе проанализированы современные научные представления о месте полунатурных методов моделирования при проектировании систем среди методов математического, имитационного и натурного моделирования.

Полунатурное моделирование в современной научно-технической литературе рассматривается как исследование управляемых систем на моделирующих комплексах с включением в состав модели реальной аппаратуры. В модель обычно входят имитаторы воздействий и помех, а также процессов, для которых неизвестно точное математическое описание.

При исследовании полунатурными методами ОЭС, действующая система дополняется физическими имитаторами входных сигналов - источников излучения, ослабителей и отражателей излучения и т. п.

Моделироваться может не только внешнее воздействие, но и критические элементы самой аппаратуры, использование которых при проектировании ограничено рядом причин. Так, при проектировании ОЭС, работающих с мощным источником лазерного излучения, применение полунатурных методов особенно актуально. Возможность использования мощного лазерного источника на стадии отладки алгоритма управления системой практически всегда ограничена. Безопасность персонала, высокое энергопотребление, ограниченный ресурс работы элементов оптических систем – это объективные причины, которые заставляют разработчика обратиться к моделированию воздействия источника на систему.

При полунатурном моделировании материальный источник воздействия на систему заменяется на его физический аналог. Часть параметров источника $A_m \dots A_n$ необходимо будет при моделировании изменить (для обеспечения безопасности, снижения энергопотребления, и т.д.), а другая часть параметров $A_1 \dots A_{m-1}$ должна сохранять свои значения для адекватности проводимых исследований.

Полунатурная модель части системы характеризуется параметрами $\{A'_1, A'_2, A'_3 \dots A'_m \dots A'_n\}$, а соотношения между параметрами материального источника и его физического аналога имеют вид:

$$A'_i = A_i; (i = 1 \dots (m-1)); A'_i \neq A_i; (i = m \dots N). \quad (1)$$

Полунатурное моделирование предполагает также организацию некоторого управляющего воздействия $\{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \dots \alpha_{m-1}\}$ на сам физический аналог, обеспечивая управление его параметрами $\{A'_1(\alpha_1), A'_2(\alpha_2), A'_3(\alpha_3) \dots A'_{m-1}(\alpha_{m-1})\}$. Это позволяет исследовать различные режимы работы аппаратуры во всем диапазоне изменений параметров A'_i .

Если математическое моделирование наиболее эффективно на ранних стадиях проектирования системы, натурное – на завершающих, то полунатурное моделирование используется на промежуточных стадиях отладки алгоритмов работы системы с учетом моделирования внешнего воздействия. В этом случае обеспечивается:

1. Отладка оптимальных алгоритмов управления и обработки данных.
2. Исследование характеристик системы во всем диапазоне изменений параметров внешнего воздействия, чего не всегда можно достичь натурными экспериментами.
3. Исключение неопределенности, проявляющейся при имитационном моделировании, в связи с невозможностью точного математического описания работы системы.

В главе особое внимание уделено перспективному направлению использования методов полунатурного моделирования уже на стадии формирования структурной и функциональной схем аппаратуры.

Отмечено, что решение дополнительных юстировочных задач напрямую связано с использованием излучения критического элемента лазерной ОЭС – его МРЛ. Если такой подход наталкивается на значительные технические проблемы, о чем говорилось выше, то возникает объективная необходимость включения в функциональную схему МИ как полунатурной модели МРЛ. Его назначение – обеспечение решения дополнительной задачи. Часть его параметров (например, угловое положение оси диаграммы направленности пучка излучения МИ) должны соответствовать параметрам МРЛ с высокой точностью. Все остальные (длина волны излучения, пространственные и энергетические характеристики, частотный режим генерации) определяются разработчиком и обеспечивают условия для решения дополнительной задачи.

В общем случае вводимая модель характеризуется параметрами $\{a_1, a_2, a_3 \dots a_p \dots a_N\}$. Часть этих параметров $\{a_1 \dots a_{p-1}\}$ должна соответствовать значениям параметров $\{A_1 \dots A_{p-1}\}$ критического элемента, а другие параметры $\{a_p \dots a_N\}$ – ее собственные параметры, которые устанавливаются разработчиком при проектировании для решения дополнительной задачи.

Соотношения между параметрами выглядят следующим образом:

$$a_i = A_i; (i=1 \dots (p-1)); a_i \neq A_i; (i=p \dots N). \quad (2)$$

И, наконец, если в системе присутствует критический элемент - МРЛ, то, как правило, при проведении полунатурного моделирования системы с целью отладки алгоритмов управления и обработки данных, именно его необходимо заменить на физическую модель, о чем говорилось выше.

В главе разработана структурная схема системы (см. рис.1), построенной как с использованием методов полунатурного моделирования ее критического элемента для обеспечения решения дополнительной задачи (полунатурная модель 1), так и с моделированием его воздействия на саму систему (полунатурная модель 2).

Эта схема наиболее полно отражает возможности использования методов полунатурного моделирования при проектировании сложных систем и в частности – рассматриваемой перспективной ЛЛС. В результате ее анализа в работе сделан вывод о том, что качество выполнения дополнительных задач определяется точностью выполнения соотношений между параметрами (1) и (2). Отмечено также, что реализация этой структурной схемы системы связана с разработкой устройства сопряжения, которое является важным элементом схемы.

В общем случае, в зависимости от формулировки дополнительной задачи, моделироваться могут различные параметры излучения МРЛ – его

пространственные, энергетические, спектральные, поляризационные или временные характеристики. Принципиальным является то, что точность выполнения соответствующих соотношений между параметрами критического элемента - МРЛ и его модели - МИ будет обеспечивать качество решения дополнительной задачи. В любом случае в системе присутствует устройство сопряжения, технический облик которого будет определяться выбранными характеристиками излучения МРЛ. Функциональная схема лазерных ОЭС должна строиться с учетом этих двух факторов.



Рис. 1. Структурная схема полунатурной модели исследуемой системы с полунатурной моделью критического элемента

Во второй главе рассмотрены вопросы формирования обобщенной функциональной схемы ЛЛС с САЮ, построенной с использованием МИ.

Сформулированы условия, которые должны быть соблюдены при разработке функциональной схемы для обеспечения высокоточного углового совмещения осей каналов ЛЛС с погрешностью в единицы угловых секунд в условиях внешних возмущающих воздействий:

Принцип действия ее заключается в следующем. Излучение МРЛ проходит систему зеркал и зеркалом ввода вводится в формирующий телескоп, который обеспечивает заданную диаграмму направленности излучения МРЛ в дальней зоне. Излучение МИ с помощью оптической формирующей системы преобразуется к требуемым пространственным характеристикам. Далее, сформированное излучение МИ направляется на дефлектор, после чего оно вводится в передающий канал ЛЛС с помощью устройства сопряжения осей пучков излучения МРЛ и МИ.

Устройство сопряжения осей пучков излучения должно выполнять две функции: 1. Пространственное совмещение пучков излучения МРЛ и МИ, а также ввод основной части излучения этих пучков в оптико-механический тракт передающего канала ЛЛС; 2. Отвод части излучения пучков в канал оптической системы устройства союстировки осей.

В оптико-электронном блоке устройства союстировки осей определяется взаимное угловое рассогласование осей лазерных пучков, которое обрабатывается дефлектором маркерного канала системы. В приемный канал ЛЛС излучение МИ вводится с выхода телескопа передающего канала с помощью устройства параллельного переноса. Угловое положение оси пучка введенного пучка излучения несет информацию о положении оси диаграммы направленности сформированного излучения МРЛ на выходе телескопа передающего канала.

В приемном канале измеряется угловое рассогласование осей диаграммы направленности МИ и оптической системы приемного канала, которое обрабатывается управляемыми зеркалами передающего канала.

Как видно, обобщенная функциональная схема ЛЛС с САЮ представляет собой *два контура измерения и обработки рассогласований*. Основной контур измеряет и обрабатывает рассогласование между осями приемного и передающего каналов с помощью управляемых зеркал. Этот контур непосредственно решает задачу автоюстировки каналов ЛЛС.

Дополнительный контур измеряет и обрабатывает рассогласование между осями пучков излучения МРЛ и МИ излучателя с помощью собственного дефлектора и обеспечивает необходимые соотношения (2) между параметрами критического элемента - МРЛ и его модели - МИ.

В работе показано, что эта схема обеспечивает решение юстировочных задач в полном объеме. Для ее реализации необходимо разработать новые функциональные узлы, а именно:

- устройство сопряжения пучков излучения МРЛ и МИ, обеспечивающее ввод пучка излучения МИ в передающий канал ЛЛС, а также отвод заданной части излучения МИ и МРЛ в устройство союстировки;

- устройство союстировки осей пучков излучения МРЛ и МИ, обеспечивающее измерение их угловых координат и определение их углового рассогласования;

- устройство параллельного переноса пучка излучения МИ, обеспечивающее смещение оси пучка на заданное расстояние a , с сохранением информации об угловом положении оси исходного пучка.

В работе разработаны схемы построения устройства союстировки – с привязкой маркерного канала по реперному зеркалу, установленному на корпусе МРЛ (рис.3), по оси диаграммы направленности излучения МРЛ (рис.4), а также с привязкой к оси телескопического резонатора МРЛ (рис.5). Определены области их рационального использования. Показывается, что использование схемы союстировки по реперному зеркалу оптимально на этапе предварительной, или «холодной» юстировки оптической схемы, когда МРЛ не работает. На этом этапе МРЛ не включается. Схема обеспечивает любой требуемый частотный диапазон работы САЮ.

Вторая схема, построенная по принципу привязки маркерного канала к оси диаграммы направленности излучения МРЛ, дает объективно наиболее достоверные результаты измерения угловых рассогласований, т.к. использует прямые измерения. Она используется в режиме работы МРЛ. Частотный диапазон ограничен частотой генерации излучения МРЛ.

Отмечено, что третья схема потенциально имеет очень высокую точность измерений. Она может быть использована при юстировках оптической системы без включения МРЛ. Во время работы МРЛ ее использование ограничено тем, что излучение МИ должно распространяться в активной среде мощного лазера, что не всегда возможно.

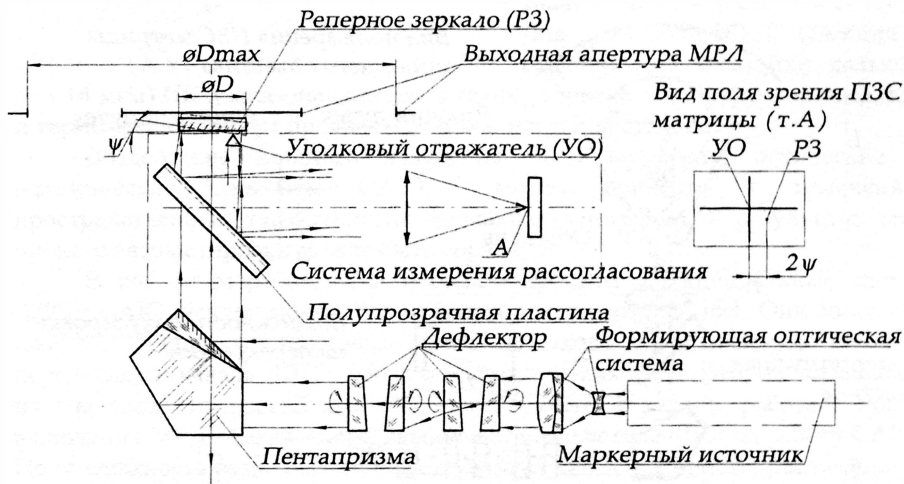


Рис.3. Функциональная схема устройства союстировки с привязкой маркерного канала по реперному зеркалу

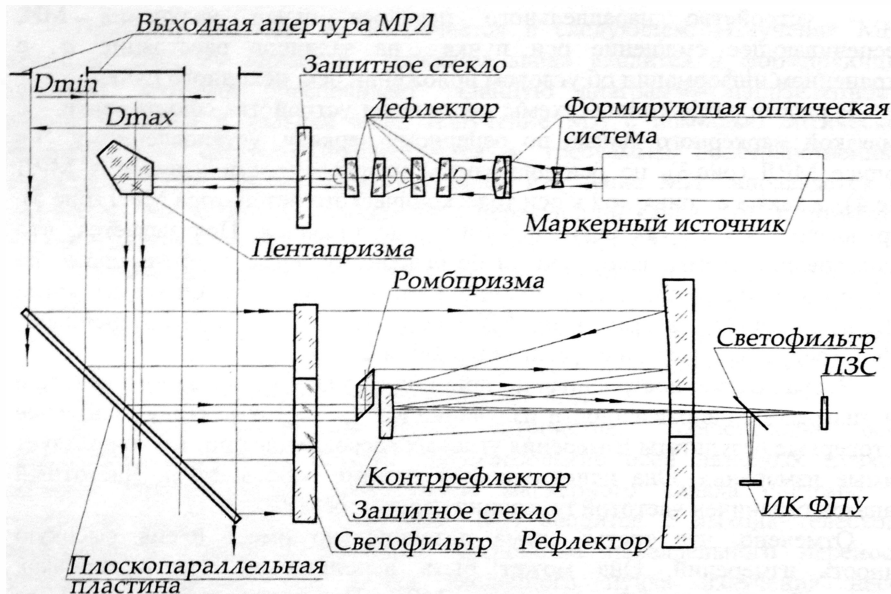


Рис.4. Функциональная схема устройства союстировки с привязкой маркерного канала к оси диаграммы направленности излучения МРЛ

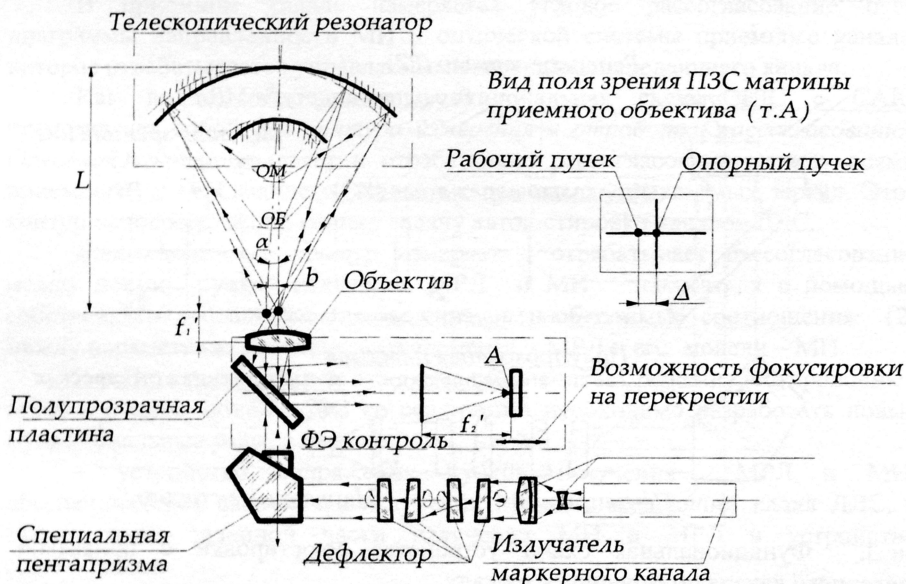


Рис.5. Функциональная схема устройства союстировки с привязкой маркерного канала к телескопическому резонатору МРЛ

В работе показано, что использование разработанных функциональных схем по рис. 2...5 обеспечивает решение задач юстировки и автоюстировки каналов ЛЛС (см. Таблицу 2) на всех этапах в полном объеме.

В работе обоснована необходимость проведения исследования влияния на работу САЮ дифракции пучка излучения ИК лазера, а также термоэффектов, возникающих при нелинейном взаимодействии мощного излучения МРЛ со средой распространения (атмосферой). Эти эффекты приводят к уширению пучка МРЛ, заплыванию его излучения на ось распространения пучка МИ.

Действительно, эти пучки должны распространяться в непосредственной близости, последовательно проходя одни и те же компоненты оптической системы. На рис.6 показано оптимальное расположение пучка МИ для случая кольцевого сечения пучка излучения МРЛ.



Рис.6. Взаимное расположение пучков излучения мощного лазера и маркерного источника

Длина оптического пути пучков излучения МРЛ и МИ в передающем канале может быть значительной и достигать 20–30м. Для длин волн МРЛ, лежащих в среднем (3-5 мкм) или дальнем

(8 – 14 мкм) ИК диапазоне спектра в таких условиях как дифракционные, так и термоэффекты могут проявляться в значительной степени.

Воздействие мощного излучения МРЛ на среду, оптические и механические элементы САЮ может привести к изменению пространственных характеристик пучка излучения МИ, в результате чего процесс автоюстировки может быть сорван.

В работе разработаны и проанализированы функциональные схемы ЛЛС с САЮ, исключающие возможность такого воздействия. Они содержат два МИ. Один из них установлен на входе в оптическую систему передающего канала ЛЛС и работает до включения МРЛ. Второй установлен на выходе оптической системы передающего канала и работает после включения МРЛ. Такая схема исключает воздействие МРЛ на работу САЮ. Но ее сложность резко ограничивает технические возможности реализации.

Поэтому в третьей главе работы детально исследован характер проявления дифракции и термоэффектов при распространении излучения МРЛ и МИ в системе и предложены схемные и конструктивные решения, снижающие или исключающие их влияние на работу САЮ.

Для исследования дифракционных эффектов в работе получено выражение для амплитуды поля в т. $P(x, y)$, лежащей в плоскости, удаленной на расстояние L от выходного зрачка МРЛ кольцевого сечения с внутренним и внешним радиусом ρ_1 и ρ_2 соответственно. Выражение получено в приближении Френеля, что соответствует ближней зоне, в которой располагаются элементы системы автоустойчивки:

$$U(P) = 2\pi \cdot A \cdot B \cdot \int_{\rho_1}^{\rho_2} \rho \cdot \exp\left\{ik \frac{\rho^2}{2L}\right\} \cdot I_0(kW\rho) d\rho, \quad (3)$$

$$\text{где: } W = r/L; \quad B = \frac{\exp\{i \cdot k \cdot L\}}{i \cdot \lambda \cdot L};$$

A - амплитуда поля в плоскости выходного зрачка МРЛ;

$$I_0(x) = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} \exp\{i \cdot k \cdot x \cdot \cos \alpha\} d\alpha - \text{функция Бесселя первого рода}$$

нулевого порядка.

Проведены расчеты дифракционных распределений пучка излучения МРЛ кольцевого сечения в ближней зоне (см. рис.7). В процессе исследований установлено, что в дифракционной картине на оси пучка МРЛ кольцевого сечения периодически появляется пик интенсивности. Учитывая, что эта ось – наиболее рациональное место положения пучка МИ, исследуется возможность исключения этого пика.

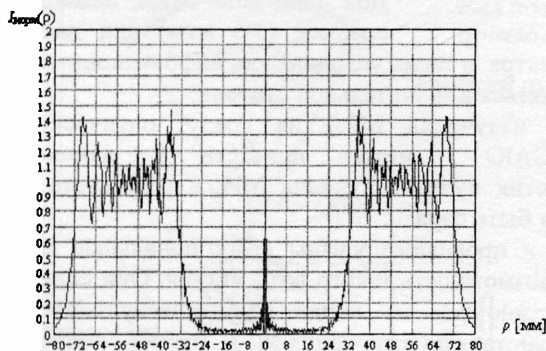


Рис.7. Нормированное распределение интенсивности в дифракционной картине Френеля на расстоянии $L=10$ м от зрачка МРЛ при $\rho_1=30$ мм, $\rho_2=75$ мм, $\lambda=5$ мкм и $L=10$ м

Такая возможность основывается на диафрагмировании выходного зрачка МРЛ, видимого из точки на оси, без виньетирования самого пучка МРЛ. Реализация этой возможности требует анализа амплитуды поля в точке P на оси, удаленной на расстояние b от зрачка МРЛ с учетом его разбиения на зоны Френеля:

$$U(P) = 2Ai\lambda \exp\{i \cdot k \cdot b\} \cdot \frac{K_1 \pm K_N}{2}, \quad (4)$$

где: $K_{j=1;N} = i(1 + \cos(\gamma)/(2\lambda))$ — коэффициент наклона, описывающий изменение амплитуды вторичных волн в зависимости от угла γ между нормалью и направлением на точку наблюдения для 1-ой и N -ой зоны Френеля, видимой на зрачке МРЛ из осевой точки P .

Учитывается, что максимумы центрального пика соответствуют нечетному числу зон Френеля, а минимумы — четному. Получены выражения для общего числа зон Френеля, укладывающихся на кольцевой диафрагме в зависимости от расстояния b до точки наблюдения P :

$$N(b) = \frac{2}{\lambda} \cdot (\sqrt{\rho_2^2 + b^2} - \sqrt{\rho_1^2 + b^2}), \quad (5)$$

а также периода $|T_b(b)|$ осциллирующей функции интенсивности на оси:

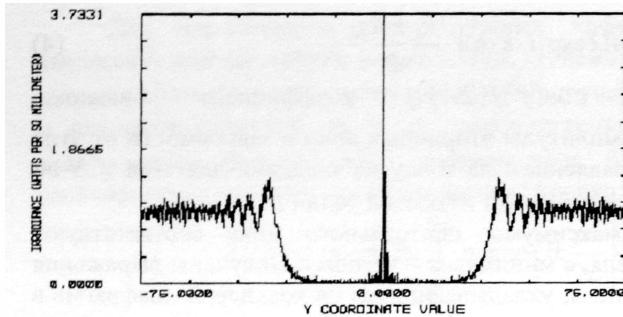
$$T_b(b) = \frac{\lambda}{b} \frac{\sqrt{\rho_2^2 + b^2} \cdot \sqrt{\rho_1^2 + b^2}}{\sqrt{\rho_1^2 + b^2} - \sqrt{\rho_2^2 + b^2}}. \quad (6)$$

Разработан метод подавления центрального пика дифракционной картины для кольцевой апертуры МРЛ без виньетирования его пучка. Метод позволяет подавить интенсивность в конкретной точке P на оси за счет установки диафрагмы между выходным окном МРЛ и этой точкой. Положение и параметры диафрагмы рассчитываются на основе выражений (5) и (6). В результате из т. P на выходном окне МРЛ должно наблюдаться либо четное число зон Френеля, либо выходное окно должно полностью виньетироваться. Показано, что методика обеспечивает подавление пика как в отдельной точке на оси (см. рис.8), так и на заданном отрезке вдоль оси, что исключает влияние дифракционных эффектов на работу системы автоустойчивки.

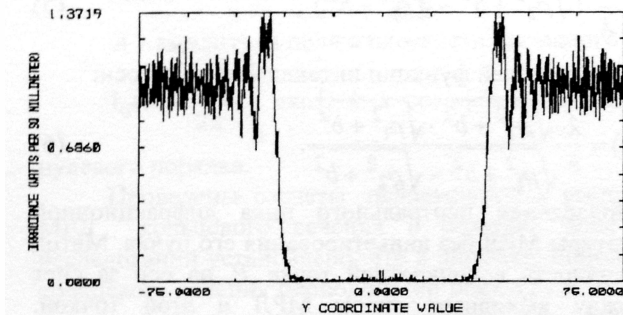
Исследован механизм возникновения в среде распространения пучка излучения МРЛ тепловой линзы, что приводит к его самодефокусировке. В обобщенном виде его можно сформулировать следующим образом. Мощное лазерное излучение при распространении оказывает воздействие на слой пространства, которое проявляется в виде неравномерного нагрева приосевой области. Как следствие, появляется неравномерность распределения в поперечном сечении комплексной диэлектрической проницаемости среды, в зависимости от интенсивности излучения в пучке. В результате образуется тепловая линза, неравномерно распределённая вдоль пучка. При высокой мощности излучения тепловое искажение пучка может оказаться довольно существенным за счет возникновения нелинейной рефракции световых волн, приводящих к его дефокусировке.

2000 6 02

Рис.8. Распределение интенсивности в плоскости регистрации дифракционной картины в отсутствии (а) и при наличии (б) виньетирующей диафрагмы



а)



б)

Показатель преломления нелинейной среды представляется в виде:

$$n = n_0 + n_2 |A|^2 + n_4 |A|^4 + \dots, \quad (7)$$

где: A – комплексная амплитуда поля световой волны;

n_0 – показатель преломления в линейном приближении;

$n_{2,4, \dots}$ – коэффициенты разложения нелинейной составляющей n .

При исследовании особенностей эффекта нелинейной рефракции обычно ограничиваются учётом только квадратичного члена в разложении (7). Очевидно, что характер нелинейной рефракции определяется знаком n_2 .

В среде с $n_2 > 0$ области максимальной интенсивности являются одновременно и наиболее оптически плотными. Периферийные лучи отклоняются в эту область, что приводит к концентрации энергии. Этот эффект получил название самофокусировки светового пучка.

В среде с $n_2 < 0$ (например, в газах (в воздухе)) при нагреве $\partial n / \partial T < 0$. В данном случае нелинейная среда играет роль отрицательной тепловой линзы и пучок дефокусируется.

Точное количественное описание этого эффекта основывается на совместном решении уравнения теплопроводности и волнового уравнения.

Этот подход достаточно сложен, связанные с ним расчеты требуют значительных ресурсов специальных вычислительных средств, которые не всегда могут быть доступны. Поэтому понятен интерес к разработке приближенного описания данного явления, позволяющего создать алгоритмы и программы расчета параметров самодефокусирующегося пучка, оперативно реализуемые на доступной базе вычислительных средств. Их использование позволяет определить зоны, свободные от излучения МРЛ при его самодефокусировке, в которых возможно расположение элементов САЮ. Кроме того, они позволяют оценить возможные изменения пространственных характеристик пучка излучения МИ при его распространении в нелинейной среде. И если такая возможность будет установлена, то необходимо принять меры для исключения условий самодефокусировки пучка излучения МРЛ за счет прокачки трассы газом с низким показателем поглощения на длине волны его излучения.

В работе разработан алгоритм расчета расходимости и диаметра пучка, основанный на использовании понятия тонкой тепловой линзы. Пояснить его можно следующим образом.

Приближения тонкой тепловой линзы справедливы при условии, что фокусное расстояние самой линзы $f'_{нл}$ намного превосходит толщину нелинейного слоя L :

$$f'_{нл} > L \quad (8)$$

Нелинейный слой любой толщины L разбивается на k равных слоев, толщиной l ($L = k \cdot l$), в пределах которых условия (8) выполняются. Каждый слой представляется в виде тонкой параксиальной линзы, действие которой эквивалентно действию тепловой линзы этого слоя. Таким образом, любой нелинейный слой может быть представлен системой из k отрицательных параксиальных линз, расположенных на расстоянии l друг от друга. Зная фокусные расстояния каждой линзы, можно проследить преобразование такой системой исходного пучка излучения.

Дополнительно к этому условию будем считать, что дифракционная расходимость θ_0 пучка радиусом r_0 для длины волны λ при достаточно высокой его интенсивности оказывается малой по сравнению с нелинейной рефракцией $\theta_{нл}$, что достаточно хорошо соответствует реальным условиям дифракции пучка излучения МРЛ в рассматриваемой ближней зоне:

$$\theta_{нл} > \theta_0 = \frac{\lambda}{\pi r_0}. \quad (9)$$

В работе получены выражения для фокусного расстояния тепловой линзы в приближениях Гауссового распределения интенсивности по сечению пучка для тонкого слоя среды толщиной l , с коэффициентом поглощения α , интенсивность пучка на его оси I_0 и теплопроводностью χ :

$$f'_{нл} = \frac{1}{2ln_2} = \frac{2\chi}{\alpha I_0 l \left| \frac{\partial n}{\partial T} \right|}, \quad (10)$$

а также расходимости параллельного пучка, падающего на линзу:

$$\theta_{нл} = \frac{r_0}{f'_{нл}}. \quad (11)$$

Сформулированы граничные условия (8) и (9), выполнение которых необходимо для корректного разбиения нелинейного слоя толщиной L на элементарные слои толщиной l , значение которой лежит в пределах $l_{\min} \leq l \leq l_{\max}$:

$$\begin{cases} f'_{нл} > l \\ f'_{нл} = \frac{2\chi}{\alpha I_0 l \left| \frac{\partial n}{\partial T} \right|} \rightarrow \frac{2\chi}{\alpha I_0 l \left| \frac{\partial n}{\partial T} \right|} > l \rightarrow \sqrt{\frac{2\chi}{\alpha I_0 \left| \frac{\partial n}{\partial T} \right|}} = l_{\max} > l \\ \theta_{нл} > \theta_0 = \frac{\lambda}{\pi r_0} \\ \theta_{нл} = \frac{r_0}{f'_{нл}} = \frac{1}{\frac{2\chi}{\alpha I_0 l \left| \frac{\partial n}{\partial T} \right|}} \cdot r_0 \rightarrow \frac{1}{\frac{2\chi}{\alpha I_0 l \left| \frac{\partial n}{\partial T} \right|}} \cdot r_0 > \frac{\lambda}{\pi r_0} \rightarrow l > \frac{2\chi\lambda}{\pi r_0^2 \alpha I_0 \left| \frac{\partial n}{\partial T} \right|} = l_{\min} \end{cases} \quad (12)$$

Получены выражения для фокусного расстояния f'_i i -ой линзы, угла наклона габаритного луча θ_{i+1} на выходе i -той линзы, радиуса пучка $r_{0(i+1)}$ на входе $i+1$ слоя и интенсивности $I_{0(i+1)}$ на входе $i+1$ слоя:

$$\begin{aligned} f_i &= \frac{2\chi}{\alpha \cdot I_{0i} \cdot l \cdot \left| \frac{dn}{dT} \right|}, & \theta_{i+1} &= \arctg \left(\frac{r_{0i} + f_i \cdot \tg(\theta_i)}{f_i} \right), \\ r_{0(i+1)} &= r_{0i} + l \cdot \tg(\theta_{i+1}), & I_{0(i+1)} &= I_{0i} \cdot \left(\frac{r_{0i}}{r_{0(i+1)}} \right)^2 \exp[-\alpha \cdot l]. \end{aligned} \quad (13)$$

Для подтверждения корректности разработанной методики расчета были проведены расчеты нелинейной дефокусировки пучка аргонового лазера в жидкостях (Таблица 3). Результаты сравнивались с экспериментальными результатами приведенными в статье С. А. Ахманова и др. «Нелинейная дефокусировка лазерных пучков» (Письма в ЖЭТФ. 1967. V. 6, №62. Р. 509-513). Задавались следующие исходные данные:

коэффициент поглощения излучения $3,4 \text{ м}^{-1}$ (для всех жидкостей), толщина слоя 44 см, длина волны излучения 488 нм.

Таблица 3.

Результаты расчета параметров лазерного пучка по разработанной методике

Жидкость	$\left \frac{dn}{dT} \right $, [K ⁻¹]	χ , [Вт/(м*К)]	P_0 , [Вт]	$a \times 10^{-3}$, [м]	Предельная дефокусировка, [угл. мин.]	
					Результаты расчета	Результаты эксперимента
Вода	$0,8 \cdot 10^{-7}$	0,6	0,1	0,9	10,58	$10 \pm 0,7$
			0,15	0,9	14,82	$14,8 \pm 0,7$
			0,15	1,6	9,65	$9 \pm 0,7$
Ацетон	$5 \cdot 10^{-4}$	0,16	0,1	0,7	24,45	$28 \pm 1,5$
			0,15	0,7	33,07	$41 \pm 1,5$
Спирт	$4 \cdot 10^{-4}$	0,17	0,1	0,7	19,67	$20,5 \pm 1,5$
			0,15	0,7	26,79	$30,5 \pm 1,5$

Сравнивая результаты расчёта с результатами эксперимента, можно сделать вывод, что они совпадают с погрешностью не более 19 %.

Разработанная методика позволяет провести расчеты параметров самодефокусирующегося пучка излучения МРЛ. В качестве примера в Таблице 4 приведены расчеты расходимости и радиуса сечения пучка для $\alpha = 0.2 \text{ 1/км}$, $\alpha = 0.1 \text{ 1/км}$ и $\alpha = 0.01 \text{ 1/км}$, соответствующих значениям коэффициентов поглощения в атмосфере на длинах волн генерации СО лазера. Температурный градиент показателя преломления $dn/dT = -1 \cdot 10^{-6} [\text{1/К}]$, коэффициент теплопроводности воздуха $\chi = 257 \cdot 10^{-4} [\text{Вт/(м} \cdot \text{К)}]$, длина волны излучения $\lambda_{\text{рл}} = 5 \text{ мкм}$.

Таблица 4.

Влияние коэффициента поглощения нелинейной среды на параметры лазерного пучка на расстоянии $L = 5 \text{ м}$

Мощность, кВт	$\alpha = 0.2 \text{ 1/км}$		$\alpha = 0.1 \text{ 1/км}$		$\alpha = 10^{-2} \text{ 1/км}$		$\alpha = 10^{-4} \text{ 1/км}$	
	$\theta_{\text{вых}}$, град	$r_{\text{вых}}$, мм	$\theta_{\text{вых}}$, град	$r_{\text{вых}}$, мм	$\theta_{\text{вых}}$, град	$r_{\text{вых}}$, мм	$\theta_{\text{вых}}$, град	$r_{\text{вых}}$, мм
10	0,27	35,3	0,14	29,24	0,02	23,41	$1,6 \cdot 10^{-4}$	22,51
20	0,48	46,4	0,27	35,30	0,03	24,06	$3,2 \cdot 10^{-4}$	22,53
30	0,67	56,51	0,38	40,99	0,05	24,72	$4,7 \cdot 10^{-4}$	22,54
40	0,84	65,92	0,48	46,40	0,06	25,38	$6,3 \cdot 10^{-4}$	22,56
50	0,99	74,77	0,58	51,56	0,08	26,03	$7,9 \cdot 10^{-4}$	22,57

Использование методики расчета пространственных параметров самодефокусирующегося пучка излучения лазера в ближней зоне позволяет

при проектировании обосновать требования к компоновке оптической схемы САЮ.

В четвертой главе разработана методика проектирования функциональных узлов ЛЛС, использующих МИ: устройства сопряжения пучков излучения МРЛ и МИ, устройства союстировки осей пучков излучения МРЛ и МИ, устройства параллельного переноса пучка излучения МИ.

Устройство сопряжения пучков излучения МРЛ и МИ, как отмечалось выше, выполняет две функции. Во-первых, пространственное совмещение пучков излучения МРЛ и МИ и ввод этих пучков в оптико-механический тракт системы. Во-вторых, отвод части излучения пучков в канал оптической системы САЮ.

Введены параметры, характеризующие устройство сопряжения:

- коэффициент $K_{ОИ}$ отвода излучения, показывающий, какая доля от общей мощности $W_{рл}$ пучка излучения МРЛ отводится в канал союстировки;
- коэффициент $K_{ПИ}$ потерь излучения, показывающий, какая доля от общей мощности $W_{рл}$ пучка излучения МРЛ теряется при прохождении оптической системы устройства сопряжения.

Эти коэффициенты определяют мощность $W_{рлс}$ пучка излучения МРЛ на входе в оптическую систему канала союстировки, а также мощность $W_{рл0}$ пучка излучения МРЛ на входе оптической системы оптико-механического тракта передающего канала ЛЛС.

Показано, что учитывая высокую энергетику МРЛ, при проектировании устройства сопряжения требуется минимизировать значения $K_{ОИ}$ и $K_{ПИ}$.

Проанализированы возможности построения устройства сопряжения на основе плоскопараллельной пластины, выполненной из материала, прозрачного в спектральных диапазонах работы МРЛ и МИ (см. рис.9).

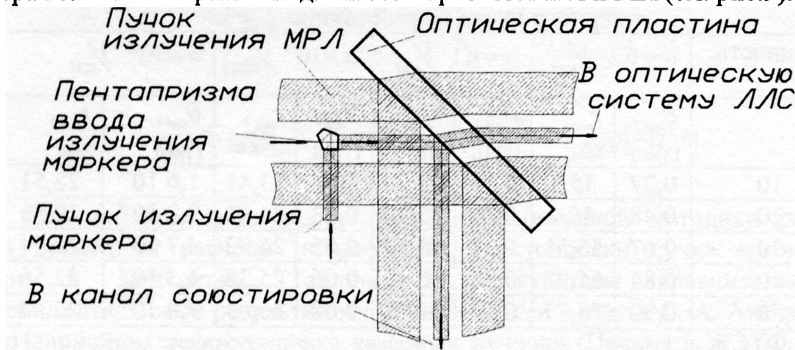


Рис. 9. Функциональная схема устройства сопряжения на основе оптической пластины

Показано, что это – идеальная схема устройства сопряжения, не вносящая собственные погрешности во взаимное угловое положение осей пучков в условиях воздействия внешних механических вибраций. Отмечаются ограничения на минимальные значения коэффициента отвода излучения, которые составляют $K_{он} \approx 10^{-2} \dots 10^{-3}$, а также ограничения на использование пластины, связанные с лучевой стойкостью ее материала.

Далее в главе рассмотрен дифракционный оптический элемент (ДОЭ) в виде эквидистантных полос прямоугольного профиля, нанесенных на плоское зеркало. ДОЭ для МРЛ и МИ наносятся на одно зеркало и имеют каждый свои параметры. Разработана математическая модель дифракции излучения МРЛ на таком ДОЭ.

Получено выражение, связывающее 5 важнейших параметров системы: дифракционную эффективность в первом максимуме M_1 , угол падения α пучка излучения МРЛ на ДОЭ, угол отклонения ψ первого дифракционного максимума, ширину a и глубину h полосы.

$$2a = \frac{\lambda}{\psi \cos \alpha} \sqrt{\frac{M_1}{2 \left(1 - \cos \left(\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{h}{\cos \alpha} \right) \right)}}. \quad (14)$$

На основании этого выражения построены рабочие характеристики ДОЭ (см. рис.10), позволяющие для заданной пространственной компоновки системы обеспечить минимальное значение $K_{он} = M_1$.

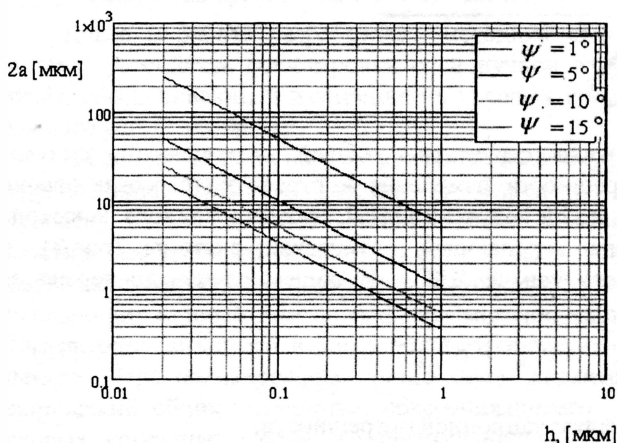


Рис.10.Рабочие характеристики ДОЭ для $M_1 = 10^{-4}$

Разработана математическая модель и методика проектирования устройства пространственного сопряжения пучков на основе двух ДОЭ (см. рис.11). Показано, что при параллельном расположении плоскостей ДОЭ

угол падения α_1 пучка на первый ДОЭ равен углу дифракции $\varphi_{2,\lambda}$ на втором ДОЭ для любой длины волны. Доказано, что такое устройство устойчиво к нестабильности длины волны, работает с излучением широкого спектрального состава и обеспечивает минимальные значения коэффициента отвода излучения МРЛ $K_{он} = 10^{-6} \dots 10^{-10}$. Показано также, что рациональные значения погрешностей взаимной юстировки элементов вносят во взаимное угловое положение осей отводимых пучков МРЛ и МИ погрешности, не превышающие 1..2 угл.с.

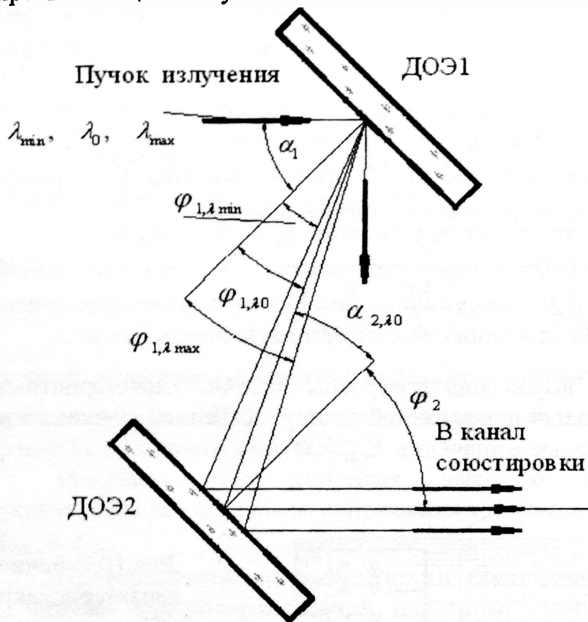


Рис. 11. Устройство сопряжения на основе двух дифракционных оптических элементов

В главе исследована структура общей погрешности системы автоюстировки, т.е. погрешности измерения и обработки рассогласования оси диаграммы направленности излучения МРЛ, сформированного на выходе формирующего телескопа передающей оптической системы (рис.2), и оптической оси приемного канала ЛЛС. В общем случае дисперсия ее σ_{ao}^2 выражается следующим образом:

$$\sigma_{ao}^2 = \sigma_{фл}^2 + \sigma_{дин}^2 + \sigma_{ин}^2 + \sigma_{мет}^2, \quad (15)$$

где

$\sigma_{фл}^2$ – дисперсия флуктуационной погрешности;

$\sigma_{дин}^2$ – дисперсия динамической погрешности;

$\sigma_{ин}^2$ – дисперсия инструментальной погрешности;

$\sigma_{мет}^2$ – дисперсия методической погрешности.

Обеспечить высокие требования к точностным характеристикам САЮ перспективной ЛЛС, в работе предлагается следующим образом.

1. Минимизировать $\sigma_{\text{ин}}^2$ за счет использования в основном контуре измерения и отработки рассогласований высокочастотной ПЗС матрицы (с кадровой частотой 1 кГц), а также высокочастотных и высокоточных управляемых зеркал с погрешностью отработки рассогласования, не превышающей 1 угл.с. Типовой спектр внешних вибраций для рассматриваемых условий работы ЛЛС не превышает 60 Гц (см. Таблицу 1).

2. Минимизировать $\sigma_{\text{ин}}^2$ и $\sigma_{\text{мет}}^2$ за счет разработки высокоточного устройства союстировки осей пучков излучения МРЛ и МИ, реализующего алгоритм поиска координат центра тяжести зарегистрированного на матричном фотоприемнике пятна излучения лазера, а также высокоточного устройства параллельного переноса пучка излучения МИ. Суммарное значение этих погрешностей не должно превышать 1 угл.с. В дополнительном контуре используется скоростной и высокоточный акустооптический дефлектор для управления пучком МИ с погрешностью отработки не более 1 угл.с.

В главе показано, что в этом случае общая погрешность $\sigma_{\text{со}}^2$ будет определяться флуктуационной составляющей $\sigma_{\text{фл}}^2$, обусловленной в основном нестабильностью положения оси диаграммы направленности пучка излучения МРЛ от импульса к импульсу. Ее уменьшение возможно за счет использования на выходе передающей оптической системы формирующего телескопа с увеличением Γ^x . В этом случае на выходе телескопа значение $\sigma_{\text{фл}}^2$ уменьшается кратно увеличению телескопа.

Далее в работе разработана методика проектирования оптической системы устройства союстировки осей пучков излучения МРЛ и МИ (см. рис.4), обеспечивающей измерение их угловых координат и определение их углового рассогласования.

На основе анализа параметров внешних возмущающих воздействий для перспективной ЛЛС (см. Таблицу 1) определен динамический диапазон отработки рассогласований. Разработаны схемы построения устройства союстировки углового положения осей пучков излучения МРЛ и МИ на основе акустооптического дефлектора и оптико-электронных координаторов, включающих единый зеркальный объектив и матричные фотоприемники – ПЗС матрицу видимого и микроболометрическую матрицу ИК диапазонов спектра. Проанализированы точностные характеристики и обоснован технический облик устройства, обеспечивающего погрешность измерения угловых координат осей, не превышающую 1..2 угловых секунды в диапазоне не менее 10 угловых минут.

В следующем разделе рассмотрены вопросы проектирования устройства параллельного переноса (УПП) пучка излучения, схема которого

построена на основе углового отражателя и ромб призм (см.рис.12). Показано, что действие рассматриваемого УПП можно описать матрицей M :

$$M = M_{pp2} \cdot M_{yo} \cdot M_{pp1} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} = M_{yo}, \quad (16)$$

$$\text{где: } M_{pp1,2} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; M_{yo} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

- матрицы преобразования вектора падающего луча соответственно ромб-призмой и угловым отражателем.

Такое УПП идеально решает задачу переноса углового направления оси пучка излучения МИ. Отмечены ограничения применения этой схемы, связанные с массо-габаритными характеристиками, небольшим расстоянием переноса a и экранированием сечения пучка излучения МРЛ на выходе оптической системы передающего канала ЛЛС.

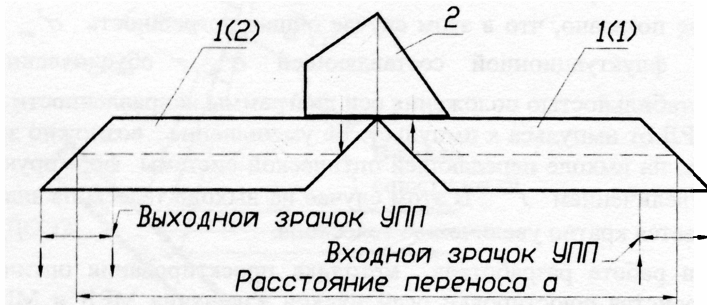


Рис.12. Устройство параллельного переноса на основе двух ромб-призм 1(1) и 1(2) и углового отражателя 2

Предложена схема УПП, построенная на основе двух пар пентапризм и свободная от перечисленных выше ограничений (см. рис. 13). Рассмотрено преобразование вектора $\vec{L}_0$ каждой призмой. Установлена связь угловых координат θ_y и θ_z пучка МИ на входе устройства с координатами θ_{z1}, θ_{y1} и θ_{z2}, θ_{y2} двух пучков на выходе УПП с углом 2φ между главными плоскостями каждой пары призм П1, П2 и П3, П4:

$$\begin{aligned} \theta_z &= (-\theta_{y1} \sin \varphi + \theta_{z1} \cos \varphi + \theta_{y2} \sin \varphi + \theta_{z2} \cos \varphi) / 2 \cos \varphi, \\ \theta_y &= (\theta_{y2} \sin \varphi + \theta_{z2} \cos \varphi + \theta_{y1} \sin \varphi - \theta_{z1} \cos \varphi) / 2 \sin \varphi. \end{aligned} \quad (17)$$

Доказана независимость результатов измерения от угловых разъюстировок пентапризм, вызванных воздействием внешних факторов. Проанализированы погрешности измерения и показано, что УПП обеспечивает измерение угловых координат пучка с секундной погрешностью.

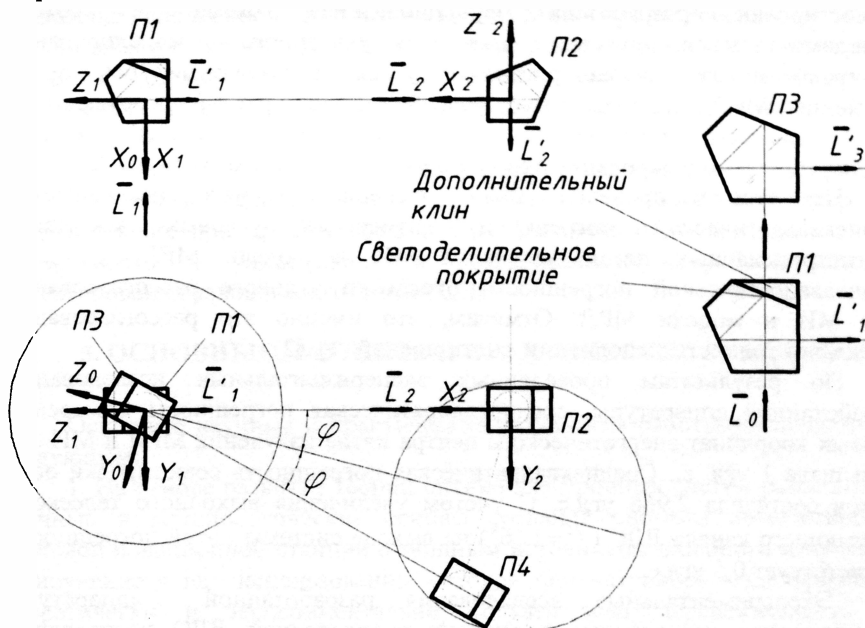


Рис.13. Устройство параллельного переноса на основе двух пар пентапризм

В пятой главе рассмотрены вопросы практической реализации полученных в работе результатов.

Разработанные математические модели и методики проектирования функциональных узлов положены в основу создания под руководством и при непосредственном участии автора аппаратуры автоюстировки перспективной высокоточной ЛЛС:

- устройств УСО-1 и УСО-2 союстировки осей пучков излучения мощного лазера и маркерного источника;
- устройств УПП-1 и УПП-2 параллельного переноса пучка излучения маркерного источника, построенных на основе углового отражателя и ромб-призм, а также на основе двух пар пентапризм.

Аппаратура внедрена в работы, выполняемых по заказам ОАО «ГСКБ «Алмаз-Антей».

В процессе разработки обоснован технический облик аппаратуры, построенной на основе использований современной элементной базы в

области многоплощадочных фотоприемных устройств видимого диапазона спектра, микроболометрических матриц ИК диапазона спектра, высокоточных и быстродействующих акустооптических дефлекторов.

Для проведения экспериментальных исследований и отладки алгоритмов программ обработки сигналов и управления аппаратурой автоюстировки разработана функциональная схема и создан экспериментальный стенд для полунатурного моделирования пространственных характеристик и углового положения оси пучка излучения МРЛ. Стенд реализует разработанную структурную схему (см. рис.1) системы, построенной на основе использования методов полунатурного моделирования при проектировании высокоточных ЛЛС.

На стенде проведен цикл экспериментальных исследований среднеквадратической погрешности измерения угловых координат зарегистрированных пятен излучения МИ и модели МРЛ, а также среднеквадратической погрешности отработки углового рассогласования осей МИ и модели МРЛ. Отметим, что именно это рассогласование определяет точность выполнения соотношений (1), (2).

По результатам проведенных экспериментальных исследований разработанной аппаратуры, среднеквадратическая погрешность измерения угловых координат энергетического центра пятна излучения МРЛ и МИ не превышала 1 угл. с.. Среднеквадратическая погрешность союстировки осей пучков составила 2,966 угл.с. С учетом увеличения выходного телескопа передающего канала ЛЛС ($\Gamma = 1/6^*$) на выходе системы этой погрешности соответствует 0,5 угл.с.

Экспериментальные исследования разработанной аппаратуры автоюстировки каналов перспективной высокоточной ЛЛС подтвердили возможность достижения погрешности союстировки в единицы угловых секунд в условиях воздействия внешних механических вибраций, температурных перепадов, а также собственных уводов осей диаграмм направленности лазерных излучателей.

Важно отметить, что полученные в предыдущих главах результаты носят общий характер и могут быть использованы при разработке лазерных ОЭС различного назначения. Для этих систем не требуется реализация в полном объеме обобщенной функциональной схемы по рис. 2. Но принципы введения полунатурной модели, заключающиеся в обосновании требований к соотношениям между параметрами МРЛ и МИ, а также в обеспечении этих соотношений при проектировании системы, имеют общий характер.

Кроме того, разработанные в диссертации методики проектирования функциональных узлов также могут быть использованы при проектировании высокоточных лазерных ОЭС различного назначения. В частности, к ним относятся следующая аппаратура, разработанная под руководством и при участии автора и используемая на предприятиях отрасли:

1). ИК-интерферометры для контроля формы и качества оптической поверхности в процессе изготовления, на стадии шлифования, внедренных в ОАО «ЛЗОС».

2). Аппаратура для экспериментальных исследований световозвращательных характеристик ОЭС в среднем и длинноволновом ИК диапазонах, внедренной во ФБУ «3 ЦНИИ Минобороны России».

3). Лазерная оптико-электронная аппаратура дистанционного бесконтактного контроля тепловых уводов элементов механических конструкций космических аппаратов при тепловакуумных испытаниях, внедренной во ФГУП ГКНПЦ им. М.В. Хруничева.

Создание и успешная эксплуатация аппаратуры подтверждает универсальность использования разработанных методов полунатурного моделирования при проектировании ОЭС различного назначения, а также правильность и универсальность разработанных в работе методик проектирования узлов высокоточных ОЭС.

3. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. На основе развития теории оптико-электронных систем разработаны научные и методологические основы создания системы автоюстировки бортовой локационной станции с мощным источником лазерного излучения, базирующиеся на использовании методов полунатурного моделирования. Теоретически и экспериментально подтверждена перспективность их использования для стабилизации взаимного углового положения осей каналов ЛЛС в условиях существующих внешних возмущающих воздействий.

2. Научно обоснованы технические решения построения САЮ ЛЛС с использованием полунатурной модели мощного источника лазерного излучения – маркерного излучателя, обеспечивающие стабилизацию в заданных пределах углового положения оси диаграммы направленности излучения мощного лазера относительно базового положения оси приемного канала в условиях существующих внешних возмущающих воздействий.

3. Разработана модифицированная математическая модель дифракции и нелинейной самодефокусировки пучка излучения мощного лазера в ближней зоне. Исследовано его воздействие на пространственные характеристики пучка излучения маркерного источника, а также на работу системы автоюстировки в целом и определена система мер, позволяющих исключить это воздействие.

4. Разработаны математическая модель и методика проектирования устройства пространственного сопряжения пучков излучения мощного лазера и маркерного источника, обеспечивающего их согласованный отвод в

канал союстировки, построенного на основе дифракционных оптических элементов, устойчивого к внешним возмущающим воздействиям, работающего в широком диапазоне длин волн излучателей, обеспечивающего заданный коэффициент отвода излучения мощного лазера и заданный уровень вносимой погрешности во взаимное угловое положение осей сопрягаемых пучков.

5. Обоснована возможность высокоточного переноса пучка излучения маркерного источника на заданное расстояние и измерения углового положения его оси в условиях существующих внешних возмущающих воздействий. Разработаны оптические системы и математические модели устройств параллельного переноса на основе уголкового отражателя, ромб-призм, а также пентапризм, разработана методика их проектирования и анализа точностных характеристик, определены области их рационального применения.

6. Предложена схема и разработана методика проектирования устройства союстировки осей пучков излучения мощного лазера и маркерного источника, построенного на основе акустооптического дефлектора, оптико-электронных координаторов, включающих единый зеркальный объектив и матричные фотоприемники видимого и ИК диапазона спектра. Разработана методика анализа их точностных характеристик и обоснованы технические характеристики устройства, обеспечивающего заданную погрешность измерения угловых координат осей пучков.

7. Создан измерительный комплекс и метрологическая база в обеспечение контроля точностных характеристик аппаратуры автоюстировки. Разработан и изготовлен экспериментальный стенд для полунатурного моделирования режимов работы аппаратуры, обеспечивающий отладку алгоритмов программ обработки сигналов и управления аппаратурой, а также экспериментальные исследования ее точностных характеристик.

8. Разработанные методики и технические решения реализованы и внедрены:

- в аппаратуре автоюстировки перспективной лазерной локационной станции;

- в ИК-интерферометрах для контроля формы и качества оптической поверхности в процессе ее изготовления, на стадии шлифования;

- в аппаратуре для экспериментальных исследований световозвращательных характеристик ОЭС в среднем и длинноволновом ИК диапазонах;

- в лазерной оптико-электронной аппаратуре дистанционного бесконтактного контроля тепловых уводов элементов механических конструкций космических аппаратов при тепловакуумных испытаниях, освоенной предприятиями отрасли, что подтверждено соответствующими

документами, приведенными в приложении к диссертации. Проведенные экспериментальные исследования перечисленных ОЭС и полученные результаты подтвердили правильность разработанных в диссертации теоретических положений.

Основные результаты диссертации отражены в следующих научных работах:

1. Барышников Н.В., Карачунский В.В., Свигач О.А. Современные методы проектирования систем автоюстировки высокоточных оптико-электронных приборов // Вестник МГТУ. Приборостроение. Спец. выпуск «Современные проблемы оплотехники». 2011. С. 128-142.
2. Барышников Н.В. Разработка и исследование устройств параллельного переноса пучка излучения для систем автоюстировки каналов лазерных локационных станций // Измерительная техника. 2011. №4. С. 65-70.
3. Барышников Н.В. Исследование пространственных характеристик пучка излучения лазера при его нелинейном взаимодействии со средой распространения // Вестник МГТУ. Приборостроение. 2011. №2(83). С. 3-15.
4. Барышников Н.В., Денисов Д.Г., Животовский И.В. Система измерения углового рассогласования осей рабочего лазера и маркерного источника на основе дифракционных оптических элементов // technomag.edu.ru: Наука и Образование: электронное научно-техническое издание. 2011. Выпуск 8. URL <http://technomag.edu.ru/doc/166411.html> (дата обращения 05.05.12)
5. Барышников Н.В., Карасик В.Е., Ширанков А.Ф. Анализ пространственно-частотных характеристик тетраэдрического световозвращателя // Изв. вузов. Приборостроение. 1985. №7. С.67-70.
6. Барышников Н.В., Карасик В.Е., Ширанков А.Ф. Световозвращательные оптические системы: методы анализа отражательных характеристик // Вестник МГТУ. Приборостроение. 1990. №1. С.34-38.
7. Барышников Н.В., Орбачевский Л.С. Низкоинтенсивные лазерные технологии в офтальмологии // Вестник МГТУ. Приборостроение. 1998. №1
8. Барышников Н.В., Пикуз Т.А. Приборы рентгеновской спектроскопии для контроля параметров плазменных источников // Приборы и системы управления. 1998. №3. С.27-29.
9. Барышников Н.В., Карасик В.Е., Ширанков А.Ф. Методы проектирования тетраэдрических световозвращателей с заданными отражательными характеристиками // Известия ВУЗов. Приборостроение. 1991. Т. XXXIV, №5. С.24-29.
10. Барышников Н.В., Карасик В.Е., Степанов Р.О. Исследование отражательных характеристик тетраэдрических световозвращателей в ИК диапазоне // Вестник МГТУ. Приборостроение. 2010. №1. С. 3-16.
11. Оптико-электронный прибор высокоточного контроля двугранных оптических элементов / Н.В. Барышников [и др.] // Вестник МГТУ. Приборостроение. 1994. №3. С.41-46.

12. Барышников Н.В., Ефремов А.А., Карасик В.Е., Пахомов И.И. и др. Устройство для измерения углов призмы. Авторское свидетельство №1518669 заявл. 23.03.1988г. //Б.И. - 1989. - №40.
13. Барышников Н.В., Ефремов А.А., Карасик В.Е., Пахомов И.И. и др. Способ измерения двугранных углов между отражающими гранями тетраэдрического отражателя. Авторское свидетельство №1522032 заявл. 19.02.88г.//Б.И. - 1989. - №42.
14. Анализ возможности дистанционного обнаружения камер скрытого видения на основе эффекта световозвращения / Н.В. Барышников [и др.] // Информационно-измерительные и управляющие системы, 2005. Т.3, №4-5. С.76-86.
15. Неравноплечий ИК–интерферометр Тваймана–Грина для контроля формы и качества поверхностей крупногабаритных оптических деталей на стадии шлифования / М.А. Абдулкадыров [и др.] // Оптический журнал. 2010. №1. 12/4 с.
16. Барышников Н.В., Карасик В.Е. Лабораторные исследования пространственно-частотных характеристик оптических световозвращающих систем // Вестник МГТУ. Приборостроение. Спец. выпуск «Лазерные и оптико-электронные приборы и системы». 1998. С. 11-18.
17. Устройство для измерения показателя световозвращения оптико-электронных приборов: патент № 2202814 РФ / Н.В. Барышников [и др.] заявл. 28.05.2002 // Б.И. - 2003. - № 11.
18. Барышников Н.В., Бокшанский В.Б., Животовский И.В. Автоматизация измерений световозвращательных характеристик // Вестник МГТУ. Приборостроение. 2004. № 2(55). С. 27-36.
19. Барышников Н.В., Степанов Р.О. Разработка метода и аппаратуры измерения световозвращательных характеристик ОЭС ИК диапазона // Измерительная техника. 2007. №9. С.24-28.
20. Барышников Н.В. Использование полунатурных методов моделирования при проектировании сложных лазерных оптико-электронных систем: //technomag.edu.ru: Наука и Образование: электронное научно-техническое издание. 2011. Выпуск 2. URL <http://technomag.edu.ru/doc/166411.html> (дата обращения 05.05.12)
21. Барышников Н.В. Исследование и разработка методов подавления центрального пика дифракционного распределения пучка лазерного излучения с кольцевым сечением: //technomag.edu.ru: Наука и Образование: электронное научно-техническое издание. 2011. Выпуск 9. URL <http://technomag.edu.ru/doc/166411.html> (дата обращения 05.05.12)