

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Т. П. Мишура, О. Ю. Платонов

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ

Учебное пособие

Санкт-Петербург
2006

УДК 621.373.826

ББК 32.86-5

М71

Рецензенты:

кафедра радиолокации Петербургского высшего военного училища;
доктор технических наук, профессор *А. А. Шаталов*

Утверждено редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

Мишура Т. П., Платонов О. Ю.

М71 Проектирование лазерных систем: учебное пособие / Т. П. Мишура, О. Ю. Платонов; ГУАП. — СПб., 2006. — 98 с.: ил.
ISBN 5-8088-0218-0

В учебном пособии рассмотрены основные методы поиска оптимальных решений в проектировании лазерных систем.

Предназначено для самостоятельной работы, которая позволяет изучить теоретический материал и получить необходимые навыки расчета и проектирования оптико-электронных приборов.

Рекомендовано студентам специальности 131200 «Лазерные системы в ракетной технике и космонавтике» дневного факультета, изучающих дисциплину «Проектирование лазерных систем».

УДК 621.373.826

ББК 32.86-5

ISBN 5-8088-0218-0

© ГУАП, 2006

© Т. П. Мишура,

О. Ю. Платонов, 2006

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	4
1. Основы проектирования	6
1.1. Краткая классификация оптико-электронных приборов	6
1.2. Основные критерии оценки качества лазерных систем	9
1.3. Уровни проектирования	11
1.4. Методы решения нешаблонных задач	14
1.5. Блочный-иерархический подход к проектированию	17
2. Распространение лазерного излучения	20
2.1. Оптические свойства атмосферы	20
2.2. Состав атмосферы	20
2.3. Распространение лазерного излучения через атмосферу	24
3. Рассеивающие свойства целей и характеристики отраженных сигналов в оптическом диапазоне	29
3.1. Эффективная площадь рассеяния типовых целей	29
3.2. Поляризационные характеристики целей	33
4. Расчет и выбор основных параметров оптико-электронных приборов	37
4.1. Энергетические расчеты оптико-электронных приборов	37
4.2. Особенности габаритного расчета приемных оптических систем оптико-электронных приборов	60
4.3. Расчет и выбор динамических параметров оптико-электронных приборов	64
4.4. Точностные расчеты оптико-электронных приборов	73
4.5. Расчет тепловых режимов работы оптико-электронных приборов	89
Библиографический список	97

ПРЕДИСЛОВИЕ

Оптико-электронные системы все больше входят в повседневную жизнь людей. Основными областями применения оптико-электронных систем являются геодезия и картография, строительное и горное дело, траекторные измерения космических объектов в системах Земля—Космос и космических комплексах (сближение и стыковка), калибровка радиолокационных измерителей и получение метеоинформации, управление оружием и системой передачи информации, медицинское оборудование и многое др. Часто оптико-электронные системы работают в комплексе с системами других диапазонов.

Перечисленные области применения оптико-электронных систем представляют собой очень сложные комплексы, требующие особого подхода к проектированию и разработке. Разработчик должен обладать широким кругозором и иметь знания из других областей техники. Разработка оптико-электронных систем требует нестандартного мышления и способностей коллективов разработчиков в совместной работе над проектом.

Подходы к решению нестандартных задач рассмотрены в первой главе учебного пособия. В зависимости от поставленной задачи для оптической системы необходимо выбрать частотный диапазон, обеспечивающий оптимальное решение. Для решения поставленной задачи разработчик должен знать условия распространения волн оптического диапазона в различных средах. Спектральные свойства различных сред можно найти в специальной справочной литературе, однако для правильной оценки разработчик должен иметь общее представление о различных свойствах сред распространения.

Основы спектрального анализа атмосферы для различных участков волн оптического диапазона приводятся во второй главе. Одним из основных преимуществ оптических систем перед системами радиодиапазона является повышенная информативность.

Для более эффективного использования этого преимущества разработчик оптических систем должен иметь представления о рассеивающих свойствах различных объектов и характеристиках отраженных сигналов в оптическом диапазоне. Данные вопросы рассматриваются в третьей главе.

При проектировании системы, обеспечивающей высокую эффективность, разработчик должен уметь создавать сценарий (алгоритм) работы системы, а также составлять ее энергетическую модель. Этим вопросам посвящена четвертая глава.

Как и в любой другой системе, выполнение поставленной задачи обеспечивается при получении соответствующих характеристик конкретных элементов, входящих в состав системы. Разработчик должен уметь рассчитывать и выбрать параметры как источников излучения, так и его приемников, проводить габаритный расчет параметров приемных систем, выбирать параметры сканирующих систем. Помимо этого, в круг задач решаемых разработчиком на этапе проектирования входит также расчет и выбор динамических параметров оптической системы, таких, как например вид модуляции рабочего сигнала, полоса пропускания оптического тракта и т. д.

После проведения любых теоретических расчетов при проектировании важно оценить достоверность полученных результатов. Проведение точных расчетов — обязательный этап при проектировании системы. Данный этап является одним из ключевых этапов проектирования, поскольку по его результатам можно судить об удовлетворении требований, поставленных перед оптико-электронной системой. Если полученные результаты не удовлетворяют требованиям, то разработчик вынужден вернуться на ранние этапы и внести изменения либо в выбранную модель, либо непосредственно в конкретное исполнение того или иного узла системы. Для правильной оценки разработчик должен знать виды погрешностей, основные их источники и способы снижения погрешностей.

Важным условием сохранения рабочих характеристик системы во время ее эксплуатации, является обеспечение тепловых режимов работы оптико-электронной системы. Даже незначительный перепад температур узлов ОЭП может привести к появлению термооптических аберраций, расфокусировки оптической системы, децентрировки или термодформации оптических деталей, к изменению положения элементов конструкции, ухудшению чувствительности и отношения сигнал/шум из-за увеличения фонового потока излучения, попадающего на приемник излучения. Более значительные изменения температур, превышающие допустимые для элементов конструкции диапазоны, вызывают ухудшение надежности ОЭП, а иногда и полную потерю их работоспособности. Поэтому разработчик должен владеть методами расчета тепловых режимов.

В учебном пособии рассмотрены основные методы и общие подходы к решению задач проектирования систем. Показаны факторы, влияющие на распространение волн оптического диапазона в окружающей среде, а также влияние выбора длины волны излучения на характеристики принимаемых сигналов. Рассмотрена зависимость параметров объектов от длины волны излучения. Приводится расчет погрешности измерений. Даются основы энергетического расчета лазерных систем.

1. ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

1.1. Краткая классификация оптико-электронных приборов

Оптико-электронными называются приборы, в которых информация об исследуемом или наблюдаемом объекте переносится оптическим излучением (содержится в оптическом сигнале), а ее первичная обработка сопровождается преобразованием этого излучения (оптического сигнала) в электрическую энергию (в электрический сигнал). Оптическому диапазону электромагнитных колебаний соответствуют частоты от $3 \cdot 10^{12}$ до $3 \cdot 10^{16}$ Гц или в длинах волн от 100 до 0,01 мкм.

Оптико-электронный прибор (ОЭП) является сложной системой, состоящей из оптических, механических и электронных звеньев, поэтому часто его называют также *оптико-электронной системой* (ОЭС). Различия в принципах работы звеньев ОЭП, в способах обработки сигналов, проходящих через них, а также разнообразие условий эксплуатации ОЭП обуславливают сложность и многоступенчатость процесса проектирования этих приборов и требуют тщательного анализа как условий работы ОЭП, так и состояния имеющейся в распоряжении разработчика элементной базы. В качестве излучателей в ОЭС, как правило, используются различного вида лазеры.

По сравнению с другими источниками света лазеры имеют то преимущество, что излучаемое ими электромагнитное поле обладает высокой пространственной когерентностью и это дает возможность формировать узкие диаграммы направленности. Для твердотельных лазеров угловая расходимость составляет единицы миллирадиан, а для газовых — десятые доли миллирадиан. Следствием этого является более высокая, чем у РЛС СВЧ-диапазона, угловая разрешающая способность и точность измерения угловых координат. Малое поле зрения (узкая ДН) приемных оптических антенн позволяет эффективно селективировать отражения от Земли и местных предметов при работе с объектами, имеющими малый угол места, повышает помехоустойчивость оптической лазерной системы (ОЛС) по отношению к преднамеренными помехам.

Переход в оптический диапазон дает также возможность повысить точность измерения дальности до цели и ее радиальной скорости. При импульсном методе измерения это связано с возможностью излучения импульсов наносекундной длительности с пиковой мощностью в сотни и тысячи мегаватт. При фазовом методе измерение ведется на поднесущих, имеющих частоты вплоть до СВЧ-диапазона.

Доплеровские методы измерения радиальной скорости в оптическом диапазоне характеризуются высокой чувствительностью. Так,

при длине волны $\lambda_{\text{и}} = 1$ мкм радиальной скорости $V_r = 0,1$ м/с соответствует доплеровское смещение частоты $F_v = 2V_r/\lambda_{\text{и}} = 200$ кГц. Для реализации таких методов требуется высокая стабильность (временная когерентность) излучения, которая может быть достигнута с помощью газовых лазеров.

Высокое пространственное разрешение, свойственное оптическим сигналам, позволяет успешнее, чем в радиодиапазоне, распознавать наблюдаемые объекты и формировать изображение просматриваемого пространства; ОЛС присущи следующие особенности, которые нужно учитывать при выборе частотного диапазона проектируемой лазерной системы.

1. Характеристики ОЛС сильно зависят от свойств среды, в которой происходит распространение лазерного излучения. Например, при работе ОЛС в приземном слое атмосферы (тропосфере) дальность действия и точность измерения координат объекта определяются в основном метеоусловиями.

2. Вследствие узости ДН требуется большое время для поиска цели по угловым координатам.

3. Существующие ограничения по частоте повторения импульсов, вызванные теплофизическими особенностями работы лазера, снижают темп обновления информации, получаемой от лоцируемого объекта.

4. Квантовый характер электромагнитного излучения уменьшает эффективность обнаружения сигнала и измерения его параметров вследствие как внутренних и внешних шумов, так и вероятностного характера регистрации оптического излучения.

Существуют разнообразные способы классификации ОЭП. По конкретному назначению оптико-электронных приборов их можно разделить на группы: ОЭП выделения, регистрации, информационно-измерительные и следящие ОЭП, приборы преобразования информации. Как видно из приведенной классификации, все ОЭП предназначены для получения информации об объектах окружающей среды, переносимой оптическими сигналами.

Другая классификация ОЭП возможна по широкому кругу признаков в зависимости от принципов построения приборов и характера их применения (рис. 1.1). К числу таких признаков могут быть отнесены параметры оптического сигнала, метод измерений, спектральный диапазон работы, режим работы, степень автоматизации, вид измерений, назначение и область применения, условия эксплуатации.

Наиболее емким из приведенных признаков классификации является назначение (область применения). В схеме классификации



Рис. 1.1. Классификация ОЭП

указаны только некоторые области техники, в которых применение ОЭП — решающий фактором их дальнейшего развития.

Также необходимо отметить, что ОЭП внутри каждой из рассмотренных классификационных групп могут подразделяться по конструктивным, функциональным и иным признакам. Кроме того, между всеми классификационными признаками существуют прямые и косвенные связи.

1.2. Основные критерии оценки качества лазерных систем

Критерий качества — это комплекс показателей, используемых для оценки свойств прибора, а также решений, принимаемых на различных этапах проектирования. Вследствие специфики лазерных систем и разнообразия условий их производства оценка качества связана с рассмотрением широкого круга показателей, приведенных на рис. 1.2.

Критерии качества системы расположены по степени значимости для разработчика системы. Всесторонняя оценка системы может быть выполнена лишь при комплексном учете всех указанных показателей. Показатели функционирования характеризуют техническую сущность изделия, и именно поэтому они стоят на первом месте в техническом задании.

Ввиду большого разнообразия лазерных систем показатели функционирования могут быть самыми различными. Достаточно обобщенными являются информационные характеристики, к которым относят:



Рис. 1.2. Схема оценки качества ЛС

- входной язык, посредством которого осуществляется связь прибора с наблюдаемым или контролируемым объектом;
- энергия, необходимая для формирования единицы информации;
- функция преобразования, описывающая зависимость информационного параметра выходного сигнала от информативного параметра входного сигнала при номинальных значениях неинформативных параметров;
- выходной язык, посредством которого осуществляется связь прибора с потребителем информации;
- скорость выдачи информации прибором и восприятия ее потребителем;
- потери информации.

В практике проектирования ОЭС в качестве этих показателей часто используют параметры и характеристики оптического сигнала (входной язык), чувствительность и КПД ОЭС (энергетические критерии), статическую (дискриминационную) характеристику, определяющую диапазон измерений и ряд других параметров (функция преобразования), быстродействие и другие динамические характеристики ОЭС (например, скорость выдачи информации).

Наряду с перечисленными, к показателям функционирования могут быть отнесены также вид потребляемой энергии и мощность потребления, габаритные размеры и масса изделия. Эти показатели обязательно необходимо учитывать при проектировании ОЭС, расположенных на борту различного вида носителей. К показателям надежности работы ОЭС относят такие общепринятые параметры, как вероятность безотказной работы, среднее время безотказной работы, интенсивность отказов. К показателям технологичности ОЭС — технологичность деталей и узлов, удобство сборки, рациональный выбор материалов, минимальная номенклатура элементов, материалов и полуфабрикатов, взаимозаменяемость деталей, узлов и блоков, и другие характеристики.

Показатели стандартизации и унификации характеризуют степень использования стандартных изделий, уровень унификации деталей, узлов, марок комплектующих изделий и материалов, соответствие унифицированных и стандартизованных изделий действующим стандартам, соответствие принятых методик контроля и аттестации требованиям Государственной системы измерений и т. п.

Показатели технической эстетики характеризуют степень обеспечения в приборе требований эргономики и всестороннего учета человеческого фактора.

Патентные показатели характеризуют степень новизны заложенных в ОЭС технических решений, а также вопросы патентно-правовой защиты.

Показатели техники безопасности включают оценку наличия вредных воздействий при работе оборудования, надежность защиты от указанных воздействий и т. д.

Экономические показатели выражаются прежде всего в стоимости изделия. К основным факторам, определяющим стоимость изделия, относятся область применения, условия эксплуатации, технологичность конструкции, требования по надежности, серийность выпуска, стоимость материалов и комплектующих изделий, простота и удобство обслуживания, юстировок и ремонта.

Поскольку все требования, предъявляемые к изделию, находятся в тесном взаимодействии и часто противоречат друг другу, то это приводит к тому, что перед проектировщиком ставится задача из многовариантности проектных решений выбрать одно, удовлетворяющее предъявленным требованиям в большей мере.

1.3. Уровни проектирования

Разработка сложных систем, какими являются ОЭС, проводится в определенной последовательности. Отправной точкой создания любой системы являются выбор и формулировка цели проектирования. При этом необходимо на основании современных данных прогнозировать развитие систем. Обоснование исходных данных требует учета назначения системы, основных видов ее взаимодействия с другими системами или подсистемами, если она является подсистемой, входящей в состав другой, более крупной системы, влияния внешних факторов.

В результате этого должна быть получена совокупность исходных данных для проектирования системы, которая содержит:

- перечень всех переменных, имеющих место в процессе измерения;
- исчерпывающее определение физических объектов измерения и окружающей их среды;
- перечень всех функций, осуществляемых при измерениях;
- перечень первичных преобразователей, соответствующих измеряемым величинам и входному устройству измерительной системы;
- перечень испытательных процедур, т. е. перечень методов калибровки системы и необходимой коррекции результатов измерений;

— указание необходимого вида представления результата измерения (аналоговый, цифровой);

— перечень способов регистрации результатов измерений и регистрирующих, телеметрических и обрабатывающих результаты измерений частей системы;

— оценку внешних воздействий и чувствительности к ним системы, возможных неисправностей и отказов;

— особенности размещения, использования системы и т. п.

Обоснование исходных данных — весьма ответственный этап, который целесообразно проводить совместными усилиями разработчиков, заказчиков и потребителей проектируемой системы.

Результатом проделанной работы является основной документ, которым руководствуется проектировщик системы, т. е. техническое задание (ТЗ).

Различают следующие основные уровни проектирования:

— информационно-логический;

— системотехнический;

— схемотехнический;

— конструкторский;

— технологический.

Первые три уровня иногда объединяют в единый функциональный или схемный уровень проектирования. В процессе проектирования на информационно-логическом уровне определяется конкретная структура данной системы, определяются связи функциональных устройств между собой и устанавливаются требования технических заданий на проектирование отдельных функциональных устройств, исходя из требований технического задания на систему в целом. Техническое задание на проектирование того или иного устройства содержит требования к сигналам, информации и командам, вырабатываемым этим устройством.

Таким образом, проектирование на этом уровне состоит из определения сначала структуры проектируемой системы, а затем в определении оптимальных значений параметров этой структуры, т. е. составляющих ее элементов.

На следующем уровне функционального проектирования — системотехническом — производится проектирование отдельных функциональных устройств, т. е. процесс разбивается на отдельные ветви. Каждое из функциональных устройств рассматривается здесь как структура, состоящая из взаимосвязанных функциональных блоков. Процесс проектирования заключается в определении оптимального состава и параметров блоков, например оптической системы, прием-

ника излучения, электронного тракта, системы отображения. При этом блоки рассматриваются подобно черным ящикам без определения их внутренней структуры. Здесь определяются требования к преобразованию сигналов тем или иным блоком, т. е. к его передаточным и прочим характеристикам.

Затем при проектировании системы переходят к уровню, который называется схемотехническим. На этом уровне производится проектирование отдельных блоков, входящих в состав функциональных устройств, в соответствии с техническими заданиями, определенными на предыдущем уровне. На этом уровне определяются основные параметры различных схем прибора. Целью проектирования на этом уровне является определение как структуры системы, т. е. получение количества входящих в нее элементов и их типов, так и численных значений параметров этих элементов. Схемотехнический уровень в зависимости от степени сложности системы может распадаться на ряд подуровней или ветви. В общем случае образуются три ветви: оптическая, электронная и механическая. Таким образом в процессе схемотехнического проектирования разработчик определяет элементную базу системы.

В более простых системах некоторые уровни функционального проектирования могут исключаться, например информационно-логический или системотехнический.

Конструкторское проектирование идет параллельно с функциональным проектированием или с некоторым отставанием от него. На данном этапе выпускаются комплекты чертежей по функциональным схемам того или иного блока системы. Так же, как и функциональный уровень, конструирование разделяется на подуровни. Верхний уровень — это компоновочный, на котором определяется общая компоновка всей системы, взаимное расположение его узлов и блоков. Один или несколько следующих подуровней в зависимости от сложности системы это подуровни узлов (сборочных единиц), где разрабатывается конструкция отдельных частей системы. Последний подуровень — подуровень деталей, на котором разрабатываются и выпускаются рабочие чертежи отдельных деталей.

На технологическом уровне проектирования производится разработка технологических процессов изготовления системы. Здесь также можно выделить ряд подуровней. Верхним подуровнем является подуровень испытаний системы, на котором разрабатываются методики испытаний системы на соответствие различным пунктам технического задания. Следующим идет подуровень юстировки, где разрабатываются методики юстировки системы, затем подуровень сбор-

ки системы, далее процесс разветвляется по отдельным узлам (сборочным единицам). На этих уровнях разрабатываются техпроцессы сборки, юстировки и контроля отдельных сборочных единиц системы. На низших подуровнях разрабатываются технологические процессы изготовления отдельных деталей.

1.4. Методы решения нешаблонных задач

На различных уровнях проектирования, чаще всего на информационно-логическом и системотехническом уровнях, могут быть использованы методы, направляющие творческую мысль разработчика на создание новых, нешаблонных, нетиповых решений. Рассмотрим некоторые из этих методов.

Мозговая атака (или *мозговой штурм*) — метод, основанный на стимулировании группы разработчиков к быстрому генерированию большого количества идей и информации в области проектируемого объекта. Мозговая атака проводится в виде конференции, каждый участник которой свободно выдвигает предложения, которые обычно записываются (фиксируются) на карточках. Метод требует от каждого участника конференции большого опыта и знаний в исследуемой области и ведется по правилам, запрещающим критиковать любые предложения, сколь нереальными они не казались бы на первый взгляд, и по правилам, способствующим совершенствованию и увеличению числа выдвинутых идей. Необходимым и важным этапом мозговой атаки является классификация всех выдвинутых идей и их оценка на практическую пригодность. Выполнение этой работы возлагается на руководителя группы. Считается, что метод мозговой атаки является наиболее доступным и распространенным на всех этапах проектирования.

Синектика — видоизменение метода мозговой атаки, суть которой состоит в организации и направлении спонтанной деятельности мозга и нервной системы на решение конкретной задачи. Суть метода состоит в использовании аналогий как средства целенаправленного ориентирования мышления специалистов на проблему. При этом возможно использование аналогий четырех типов: прямые аналогии, которые часто находят в биологических и технических системах, а также субъективные, символические и фантастические аналогии. При синектике, как и при мозговой атаке, тщательно подбирается группа специалистов, которые должны обладать большим опытом в разных научных областях, например биологии, механи-

ке, физиологии. Порядок действий этой группы может быть следующим:

- формулировка проектной задачи;
- конференция, в ходе которой участники пытаются исключить неперспективные решения подобно методу мозговой атаки;
- поиск аналогий, позволяющий выразить задачу в понятиях, хорошо знакомых членам группы по их профессии;
- определение главных трудностей и противоречий в решении задачи;
- поиск и развитие перспективной идеи на основе некоторых типов аналогий.

Ликвидация тупиковых ситуаций — метод, основанный на стимуляции творческой деятельности мозга путем:

- определения преобразований, которым подвергается тупиковая ситуация, с целью выявления новых направлений поиска;
- поиска новых связей между элементами неудовлетворительного решения;
- переоценки тупиковой ситуации.

Составление морфологических таблиц — метод, заключающийся в стимулировании мыслительной деятельности в направлении расширения области поиска. Суть этого метода состоит в заполнении морфологических таблиц (матриц) с последующим выбором из них большого числа возможных решений. Сначала разработчик должен занести в таблицы набор характеристик, которому должен удовлетворять элемент на рассматриваемом уровне проектирования, а затем перечислить в таблице все возможные, частные (для каждой характеристики) решения. Принцип поиска решения состоит в том, чтобы из каждого ряда выбрать наилучшее решение по некоторым критериям, например массе, габаритам, стоимости. Применение данного метода требует от проектировщика глубоких знаний в исследуемой проблеме. При некорректном выборе необходимого набора характеристик и некорректным выбором числа частных решений может произойти резкое увеличение количества комбинаций, что делает практически невозможным поиск приемлемого решения.

Инверсия — метод получения нового технического решения путем отказа от традиционного взгляда на задачу (взгляд на задачу, например, с диаметрально противоположной позиции). Инверсия позволяет создать новые оригинальные и смелые технические решения. Основными принципами инверсии являются: снаружи — изнутри, вертикально — горизонтально, с лицевой стороны — с обратной стороны, в движении — неподвижно, вращение вперед — вращение на-

зад, линейное перемещение — вращение, ведущее — ведомое, вредные явления — превращение их в полезные, жесткие связи — гибкие связи, растяжение — сжатие и т. д.

Аналогия — использование технических решений из других областей науки и техники для решения задачи или стимулирования разработки новых решений.

Комбинирование — применение в новой разработке в разном порядке и в разных сочетаниях отдельных технических решений, процессов, элементов. В разработке могут быть использованные не только новые элементы, но и старые, известные и использованные ранее. Комбинации элементов могут иметь различный характер: механическое соединение, соединение через промежуточные элементы, дублирование, создание многоступенчатых конструкций и т. п.

Компенсация — уравнивание нежелательных и вредных факторов средствами противоположного действия (компенсация влияния массы, трения, нелинейности элементов, температуры и т. д.).

Унификация — это уменьшение числа видов и типов приборов с одинакового функционального назначения, а также сокращение типов, марок, сортамента узлов и деталей, входящих в них. В основе унификации лежат различные виды стандартов, различающиеся требованиями, предъявляемыми к приборам, а именно: государственный стандарт (ГОСТ), отраслевой стандарт (ОСТ) и стандарты предприятий (СТП). Стандарты устанавливают ограничения на материал, сырье, полуфабрикаты, конструктивные исполнения и основные размеры изделия, единые термины, обозначения и т. п. Результатом унификации является создание серии изделий (унифицированных), состоящих из ограниченного числа стандартизованных взаимозаменяемых узлов и деталей, и отличающихся от основной модели некоторыми дополнительными узлами и деталями. Применение унификации и стандартизации дает экономический и качественный эффект при проектировании изделий на всех его уровнях. На уровне функционального проектирования сначала составляется и обосновывается перечень тех функциональных элементов, которые рационально унифицировать в серии изделий. Далее выполняется функциональное проектирование этих элементов, т. е. определяются их оптимальные структуры, типы и характеристики.

Унификация может существенно уменьшить число разного рода схем (оптических, электрических и др.) проектируемой серии изделий. Соблюдение требований унификации позволяет применять в процессе проектирования унифицированные или стандартизованные де-

тали и узлы, изготавливаемые централизованно и обладающие высоким качеством, надежностью и минимальной стоимостью.

Унификация приводит к существенному сокращению объема проектирования унифицируемой серии изделий. Кроме того, уменьшение номенклатуры изделий и их узлов позволяет специализировать процесс изготовления изделий и улучшить их эксплуатационные характеристики.

Агрегатирование — частный случай унификации, заключающийся в разработке изделий на основе их компоновки из ограниченного числа унифицированных блоков (модулей), обладающих функциональной и геометрической взаимозаменяемостью.

Важнейшей особенностью агрегатирования является повышение универсальности изделия путем применения широкого набора модулей в процессе эксплуатации. Большой выбор модулей обуславливает и широкий диапазон изменения характеристик изделия, его схем, конструкции, а, следовательно, и стоимости изделия.

Блочно-модульное проектирование, основанное на создании изделий на базе модулей и блоков, позволяет унифицировать изделие, обеспечить экономию времени при его разработке и обслуживании.

Резервирование — увеличение числа элементов, узлов для повышения надежности изделия в целом.

Ассоциация — свойство психики при появлении одних объектов в определенных условиях вызывать представление о других за счет совпадения их определенных признаков.

Идеализация — наделение реальных объектов нереальными, несуществующими свойствами и изучение их как идеальных (точка, линия, абсолютно твердое тело и др.); путем идеализации удается значительно упростить сложные системы, обнаружить существенные связи и применить математические методы исследований.

1.5. Блочно-иерархический подход к проектированию

Решение проблем проектирования, отмеченных выше, построено на основе системного и блочно-иерархического подходов. Системный подход предусматривает, что изделие представляется как сложная система, состоящая из связанных между собой и взаимодействующих частей, а блочно-иерархический подход или принцип заключается в том, что изделие рассматривается как иерархическая структура, состоящая из большого количества уровней и ветвей, наподобие некоторого опрокинутого дерева, как показано на рис. 1.3. На каж-

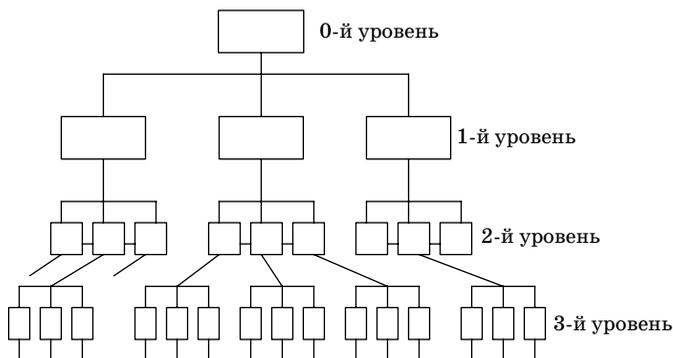


Рис. 1.3. Блочнo-иерархическая структура

дом иерархическом уровне и на каждой ветви рассматривается небольшое количество связанных между собой элементов, которые разработчик в состоянии одновременно удерживать в поле зрения.

Обычно это количество не превосходит десяти-двадцати, оптимальное число таких элементов — три-пять. На рис. 1.3 для простоты изображения показано по три элемента на каждом уровне и ветви. На следующем, более низком уровне каждый элемент высшего уровня рассматривается как система, состоящая из элементов данного уровня и т. д.

Общий процесс проектирования при таком подходе представляется в виде движения по рассматриваемому дереву, при котором выполняются элементарные проектные операции на каждом уровне и на каждой ветви, т. е. структура проектирования также является блочно-иерархической, причем на каждом уровне ветви проектирования имеем дело с небольшим количеством элементов, рассматриваемых как целые, благодаря чему этот процесс достаточно несложен и вполне реализуем при нормальных ресурсах. Весь процесс проектирования, сплетающийся в виде блочно-иерархической структуры таких элементарных процессов, также становится вполне реализуемым.

Легко заметить, что такая структура позволяет осуществлять общий процесс проектирования, используя различные направления движения по блочно-иерархическому дереву. В зависимости от направления движения различают нисходящее, восходящее и смешанное проектирование.

Нисходящее проектирование, как следует из его названия, начинается с верхнего уровня, где изделие рассматривается как целое, затем проектируется его структура первого уровня, затем второго и т. д. Результатом проектирования на данном уровне является техническое задание для проектирования на следующем, более низком уровне.

Нисходящее проектирование всегда гарантирует выполнение требований технического задания на каждом уровне и поэтому должно бы считаться наиболее рациональным, но на каком-то уровне процесс проектирования может остановиться из-за того, что при существующих физических, технических, технологических или экономических ограничениях решение обратной задачи и соблюдение технического задания данного уровня становится невозможным. В этом случае приходится возвращаться на предыдущий уровень или даже выше, искать там другое решение своей обратной задачи, а затем опять пробовать вернуться на тот уровень, на котором процесс остановился, но уже с другим техническим заданием. Таким образом, блочно-иерархическая структура, позволяя в принципе реализовывать процесс проектирования, делает неизбежным его итерационный характер, заключающийся в возврате к повторению проектирования на предыдущих уровнях с измененными условиями.

Восходящее проектирование выполняется в обратном порядке. При этом происходит сборка отдельных узлов, а затем сборка всего изделия. Восходящее проектирование, как нетрудно увидеть, обычно гарантирует реализуемость проекта на любом уровне, но отнюдь не гарантирует соблюдения всех требований технического задания, поэтому процесс может остановиться на каком-либо уровне из-за несоблюдения требований технического задания высшего уровня. При этом необходим возврат на предыдущие низшие уровни с попыткой «собрать» структуру данного уровня из других элементов. Таким образом, и восходящее проектирование также неизбежно имеет итерационный характер.

При *смешанном проектировании* по части ветвей имеем нисходящий процесс, а по некоторой части — восходящий, которые в определенных точках встречаются. Итерационный характер такого процесса также очевиден.

Из рассмотренных процессов предпочтительней является все-таки нисходящее проектирование. На практике, особенно для сложных изделий, процесс проектирования носит обычно смешанный характер с преобладанием нисходящих потоков, а восходящее проектирование применяется к тем частям приборов, которые собираются из стандартных, хорошо отработанных деталей, элементов и узлов.

Наконец, становится ясен также эвристический характер проектирования, т. е. невозможность его полной алгоритмизации, автоматизации, поскольку ввиду сложности процесса и невозможности заранее определить полностью его ход необходимо принимать решения на основании опыта, интуиции, с привлечением творческих способностей разработчика, т. е. на базе так называемого алгоритма принятия решений.

2. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

2.1. Оптические свойства атмосферы

Атмосфера представляет смесь газов, содержащую твердые частицы, находящиеся во взвешенном состоянии. Химический состав и размеры этих частиц колеблются в широких пределах. Входящие в атмосферу газы поглощают излучения, а частицы рассеивают его. В результате этого интенсивность излучения источника ослабляется и контрастность между фоном и источником уменьшается. Воздействие атмосферы на оптическое излучение может происходить следующими тремя способами:

1. Излучение источника поглощается газами на пути его распространения.

2. Излучение источника преломляется или рассеивается взвешенными частицами, в результате чего кажется, что оно приходит из области, окружающей источник, которую называют фоном.

3. Газы и взвешенные частицы, находящиеся на пути распространения луча, могут сами излучать. Это излучение и его флуктуации могут понижать контрастность изображения.

Перед тем как перейти к детальному рассмотрению явлений рассеяния и поглощения, целесообразно рассмотреть более подробно состав земной атмосферы.

2.2. Состав атмосферы

Основными газами, образующими земную атмосферу, являются азот, кислород, водяной пар, двуокись углерода, метан, закись азота, окись углерода и озон. Отметим, что два газа: азот и кислород имеют наибольший процент содержания в атмосфере.

В интервале высот от уровня моря и до высоты 12000 м основную роль в поглощении играют молекулы двуокиси углерода и водяных паров. Концентрация водяных паров колеблется в пределах 10^{-3} — 1 % объема, и зависит от географического расположения, высоты, времени года и местных метеорологических условий. Двуокись углерода распределена более равномерно, ее концентрация изменяется от 0,03 до 0,04 %. Концентрация двуокиси углерода над массивами, покрытыми растительностью, выше, чем над океанами. Концентрация метана в атмосфере колеблется от 10^{-4} до $2 \cdot 10^{-4}$ % и равномерно изменяется с высотой.

Заись азота N_2O с концентрацией в пределах от $3 \cdot 10^{-5}$ до $4 \cdot 10^{-5}$ % и окись углерода CO с характерной концентрацией $2 \cdot 10^{-5}$ % дают в спектре полосы поглощения, если излучение воспринимается с достаточно далеких расстояний. Концентрация озона O_3 в атмосфере на высоте около 30000 м составляет более 10^{-3} , а на других высотах она значительно ниже.

На рис. 2.1 а, б, в заштрихованными участками показаны полосы поглощения излучения парами воды, углекислого газа и озона, а чис-

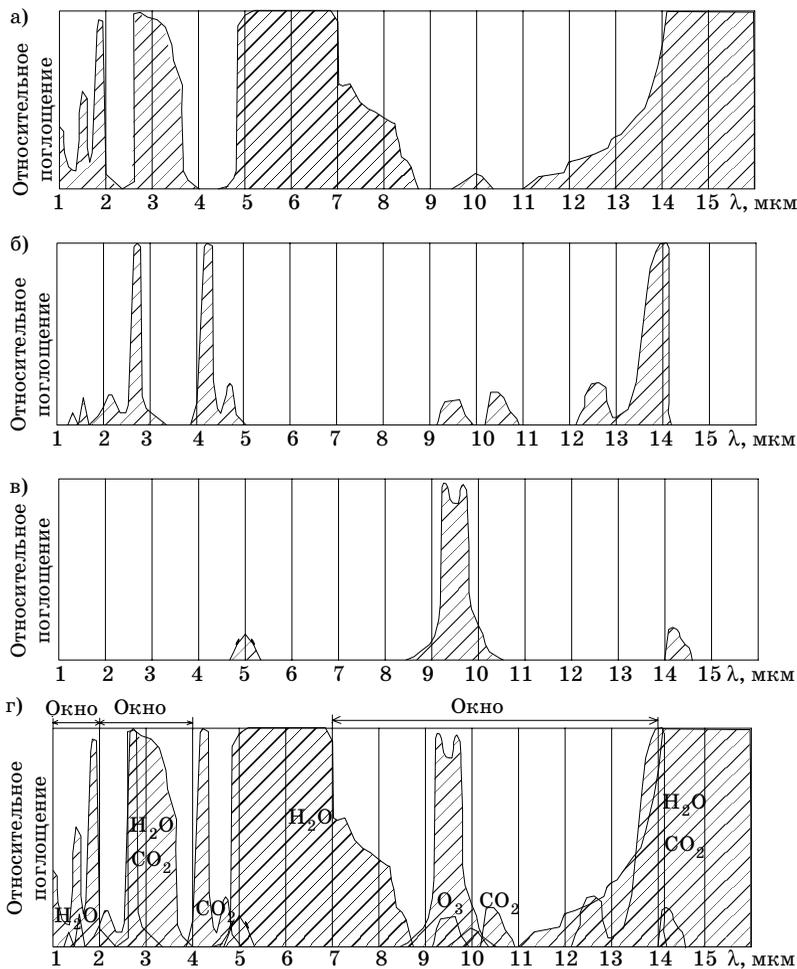


Рис. 2.1. Оптические свойства атмосферы: а — пары воды; б — поглощение двуокисью углерода; в — поглощение озоном; г — суммарная картина

тые поля соответствуют окнам пропускания в области от 1 до 15 мкм. Полосы поглощения какого-либо атмосферного газа могут частично заполнить окна пропускания другого газа. Суммарная кривая спектрального пропускания атмосферы на уровне моря показана на нижнем графике рис 2.1, ε в диапазоне от 1 до 15 мкм. На этом графике хорошо видны основные окна пропускания. Данный график соответствует средней атмосфере, состоящей из основных поглотителей, приведенных на рис. 2.1.

Хорошо видны полосы поглощения паров воды, расположенные на длинах волн 1,1; 1,38; 1,87; 2,7 и 6 мкм. Для двуокиси углерода полосы поглощения встречаются на длинах волн 2,7; 4,3 и 14,5 мкм.

Атмосфера содержит множество мелких взвешенных частиц. Они распределены случайно, имеют различный химический состав, и размеры их колеблются в пределах от 10^{-7} до 10^{-1} см. Они могут содержать пыль, частицы углерода, дым, капли вводы, частицы соли и органические включения (бактерии, микробы и т. д.), совокупность капель жидкости и твердых частиц, взвешенных в атмосфере.

Если какую-либо полосу поглощения исследовать с помощью спектрографа с высокой разрешающей способностью, то она оказывается состоящей из сотен тысяч отдельных линий поглощения (рис. 2.2). Увеличение давления и температуры по разному влияет на ширину линий поглощения. Увеличение давления приводит к заметному расширению полос поглощения и к соответствующему увеличению ослабления. По этой причине с увеличением высоты над уровнем моря поглощение атмосферой уменьшается. Увеличение температуры не очень сильно сказывается на увеличении потерь за счет поглощения атмосферой, зато приводит к увеличению потерь за счет роста коэффициента преломления в атмосфере. Изменение температуры воздуха на 1°C вызывает изменение коэффициента преломления воздуха на величину порядка 10^{-6} .

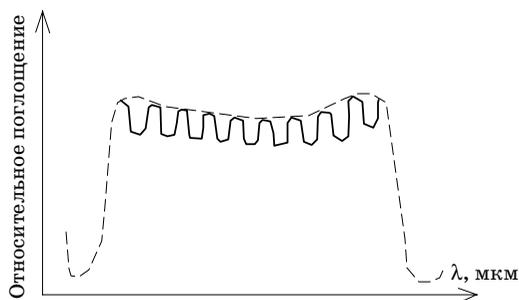


Рис. 2.2. Тонкая структура типичной полосы поглощения

Расположение спектральных линий в полосах поглощения излучения углекислым газом имеет вполне регулярный характер, а в полосах поглощения воды расположение линий носит случайный характер, причем интенсивность отдельных линий изменяется в широких пределах. Это обстоятельство, а также влияние на ширину спектральных линий давления, температуры и высоты сильно затрудняют создание математической модели для описания поглощения излучения компонентами атмосферы в заданном диапазоне длин волн. Необходимо определять поглощение в узких полосах и затем интегрировать или суммировать его в заданных пределах.

В верхних слоях атмосферы, где содержание паров воды незначительно, в качестве основных поглотителей излучения выступают окись углерода, озон и другие газы (рис. 2.3, а, б, в, г)

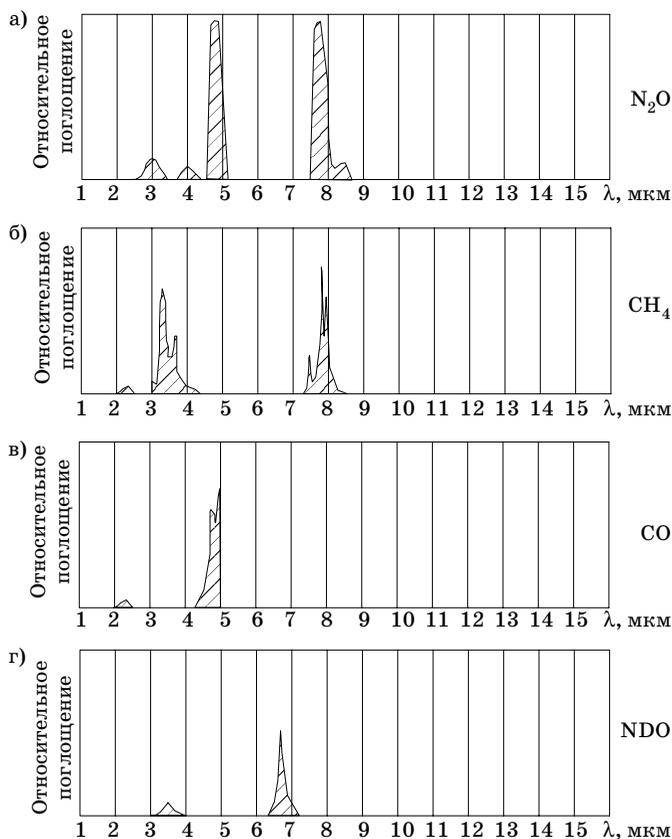


Рис. 2.3. Полосы поглощения второстепенными газами

Наиболее сильные полосы поглощения излучения этими газами в диапазоне от 1 до 9 мкм показаны на рис. 2.3. Закись азота имеет слабую полосу поглощения при 4 мкм и сильные полосы поглощения при 4,5 и 7,8 мкм. Окись углерода имеет полосу поглощения при 4,7 мкм. У метана две линии поглощения — на участке от 3,1 до 3,5 мкм и узкая полоса при 7,7 мкм. Тяжелая вода, находящаяся в верхней атмосфере, имеет линии поглощения в области от 3,5 до 4,85 мкм и полосу поглощения при 6,7 мкм. Как известно, эти атмосферные газы обладают резонансным ИК излучением в области $\lambda > 4$ мкм, обуславливая известную долю свечения неба в этой области спектра. Необходимо отметить также, что рассмотренные газы распределены в атмосфере равномерно.

2.3. Распространение лазерного излучения через атмосферу

С точки зрения лазерной локации все атмосферные эффекты можно разделить (хотя и весьма условно) на две группы. В первую группу входят те явления, которые вызывают изменение суммарной интенсивности направляющегося к цели светового потока. Во вторую — те, которые вызывают изменение «геометрических» параметров подсвечивающего пучка (его расширение и отклонение) и перераспределение энергии в зоне цели.

Среди эффектов, относящихся к первой группе, следует выделить явления рассеяния и поглощения. Эти явления обуславливаются как молекулами воздуха (молекулярное рассеяние и поглощение), так и отдельными материальными частицами (пыль, молекулы воды), взвешенными в воздухе (корпускулярное рассеяние и поглощение). Интенсивность $I(z)$ коллимированного пучка лазерного излучения на расстоянии z от коллиматора для однородного участка атмосферы связана с интенсивностью I_0 пучка на выходе выражением

$$I(z) = \tau(z)I_0, \quad (2.1)$$

где

$$\tau(z) = \exp(-(\beta_{м.р} + \beta_{к.р} + \beta_{м.п} + \beta_{к.п})), \quad (2.2)$$

а $\beta_{м.р}$, $\beta_{к.р}$, $\beta_{м.п}$, $\beta_{к.п}$ — соответственно, коэффициенты молекулярного и корпускулярного рассеяния и поглощения. Для неоднородного пути длины z формула (2.1) сохраняется, но входящие в нее функция $\tau(z)$ определяется равенством вида

$$\tau(z) = \exp(-T(z)), \quad (2.3)$$

где

$$T(z) = \int_0^z [\beta_{\text{м.р}}(z) + \beta_{\text{к.р}}(z) + \beta_{\text{м.п}}(z) + \beta_{\text{к.п}}(z)] dz$$

и представляют некоторую «оптическую длину» пути z , являющуюся функцией длины волны.

Для большинства представляющих интерес с точки зрения лазерной локации длин волн коэффициенты молекулярного и корпускулярного рассеяния, увеличиваются обратно пропорционально величине длины волны в четвертой степени

$$\beta = \frac{512\pi^5 c^4}{3\omega_0^4} R_e^2 \frac{1}{\lambda^4}, \quad (2.4)$$

где $R_e = q^2/8\pi\epsilon_0 m c_0^2$ — радиус электрона, численно равный $2,818 \times 10^{-15}$ м. Уравнение (2.4) известно как формула Рэлея.

Молекулярное (рэлеевское) рассеяние света неизбежно имеет место и оно почти не меняется во времени, но практически не препятствует прохождению света видимых и инфракрасных длин волн. Например, излучение с длиной волны 0,5 мкм, направленное вертикально с уровня моря в зенит будет ослаблено в толще атмосферы за счет рэлеевского рассеяния всего на 13 %, в дальнейшем инфракрасном диапазоне (10,6 мкм) рэлеевским рассеянием можно пренебречь.

В то же время корпускулярное рассеяние при некоторых метеорологических условиях может быть весьма значительным. В основном оно имеет место в той зоне атмосферы, где происходит ее турбулентное перемешивание. Толщина этой зоны измеряется не от уровня моря, а от поверхности Земли и составляет около 5 км. В пределах указанного слоя изменяющиеся во времени коэффициенты рассеяния (являющиеся функцией высоты) при длинах волн. Более коротких, чем радиусы частиц тесно связаны с видимостью в поверхностном слое. Например, устанавливая лазерный локатор на горе, не удастся полностью избежать влияния низковисотной дымки, поскольку ламинарные и турбулентные воздушные потоки заносят в горы с небольших высот некоторое количество аэрозолей (взвешенных частиц). Плотность аэрозолей над гористой местностью зависит не только от видимости в поверхностном слое, но также и от ветров в этом случае, от восходящих потоков воздуха и местного рельефа.

Молекулярное поглощение имеет резонансный характер, что проявляется на определенных длинах волн, соответствующих разностям между энергетическими уровнями молекул газов, присутствующих

в атмосфере. Поглощение аэрозолями обусловлено в значительной степени электрической проводимостью частиц и является почти постоянным при длинах волн, более коротких, чем радиусы частиц.

Ко второй группе «атмосферных» эффектов относятся, прежде всего, явления, связанные с турбулентным характером атмосферы. Турбулентные потоки воздуха обуславливают возникновение местных флуктуаций плотности атмосферы и, следовательно, изменение ее коэффициента преломления. Эти флуктуации имеют микромасштабное время корреляции порядка нескольких миллисекунд. Изменения коэффициента преломления вызывают изменение оптической длины пути луча. В результате в пределах лазерного пучка могут разрушиться существовавшие в нем фазовые соотношения. В силу случайного характера турбулентности коэффициент преломления вдоль всего пути распространения лазерного излучения изменяется случайным образом. Поэтому в качестве основной характеристики в данном случае выступает некоторый поперечный корреляционный размер $\rho_{\text{кор}}$. В соответствии с определением $\rho_{\text{кор}}$ — есть минимальное расстояние между двумя ближайшими лучами, которые из-за прохождения участков атмосферы с различными коэффициентами преломления оказываются некоррелированными у цели.

Приближенно величину $\rho_{\text{кор}}$ можно определить из следующей формулы:

$$\rho_{\text{кор}} = 1,438(\lambda^2 / RC_{\text{п}}^2)^{3/5}, \quad (2.5)$$

где $C_{\text{п}}^2$ — абсолютный коэффициент преломления; R — толщина турбулентного слоя.

Для вертикального прохождения лазерного излучения в космическое пространство от локатора, расположенного на высокой горе, $C_{\text{п}}^2$ может быть принято равным $1,7 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2/3$. Тогда из (2.5) находим, что для $\lambda = 0,5 \text{ мкм}$ $\rho_{\text{кор}} \approx 10 \text{ см}$, $\lambda \approx 10,3 \text{ мкм}$ $\rho_{\text{кор}} \approx 390 \text{ см}$.

При использовании длины волны $\lambda = 10,6 \text{ мкм}$ и угле возвышения, равном 45° для космических систем, затухание на всю толщину атмосферы составит от 3 до 9 дБ в условиях ясной погоды. Наличие облачности приведет к увеличению затухания волн в атмосфере. Величины затухания для $\lambda = 10,6 \text{ мкм}$ приведены в табл. 1.1.

Потери излучения при прохождении через атмосферу до объекта и обратно могут быть вычислены по следующей формуле:

$$J = J_0 e^{-2\sigma R}, \quad (2.6)$$

где $\sigma = \sigma_0 + \sigma_R + \sigma_M$; σ_0 — коэффициент поглощения; σ_R — коэффициент рассеяния Рэлея; σ_M — коэффициент аэрозольного рассеяния.

Таблица 1.1. Данные по затуханию в условиях облачности

Форма облака	Средняя высота, км	Средняя толщина, м	Затухание, дБ
Высококучевое	4	195	17,1
Слоисто-кучевое	1,5–2	350	30,7
Слоисто-дождевое	1	590	17,2
Кучевое	2	670	231,9
Грозовое	2	2100	108,2
Слоистое	0,5–1	500	32,4
Высокослоистое	5	510	30,1

Потери при распространении на горизонтальной трассе на уровне моря могут быть вычислены по следующей эмпирической формуле:

$$\sigma_{\Sigma} = \exp \left[\frac{-7,82}{V} \left(\frac{\lambda}{0,55} \right)^{-q} R \right], \quad (2.7)$$

где V — видимость, км; R — дальность действия, км; λ — длина волны, мкм.

Величина q зависит от размера и распределения рассеивающих частиц, а также от видимости, и может достигать 1,6 при очень хорошей видимости, 1,3 — при средней и $0,585V^{1/3}$ — при видимости меньше 6 км. Для наклонных трасс и больших высот условия передачи улучшаются (рис. 2.4)

В табл. 1.2 представлены величина удельного пропускания атмосферы и метеорологическая дальность видимости, а также величина балла по коду.

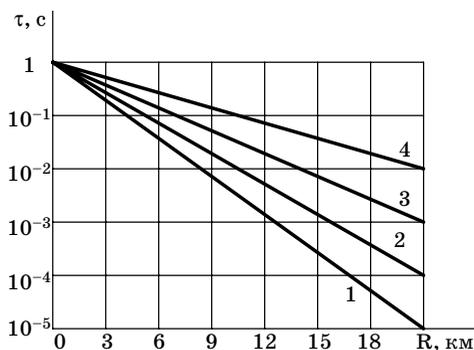


Рис. 2.4. Коэффициенты передачи для наклонных трасс и больших высот: 1 — над уровнем моря; 2 — 300 м; 3 — 1500 м; 4 — 3000 м

Таблица 1.2. Пропускание атмосферы и дальность видимости

Состояние атмосферы (видимость)	Балл по коду	Удельное пропускание, км ⁻¹	Метеорологическая дальность видимости R_m , км
Туман:			
очень сильный	0	Менее 10^{-34}	Менее 0,05
сильный	1	10^{-34} – $10^{-8,5}$	0,05–0,2
заметный	2	$10^{-8,5}$ – $10^{-3,4}$	0,2–0,5
слабый	3	$10^{-3,4}$ – $2 \cdot 10^{-2}$	0,5–1
Дымка:			
очень сильная	4	0,02–0,14	1–2
сильная	5	0,14–0,38	2–4
заметная	6	0,38–0,68	4–10
слабая	7	0,68–0,82	10–20
Хорошая видимость	8	0,82–0,92	20–50
Отличная видимость	9	0,92 и более	50 и более

Под метеорологической дальностью видимости R_m принято понимать предельную дальность видимости темных предметов с угловым размером $0,5^\circ$ стандартным наблюдателем (с пороговой контрастной чувствительностью глаза наблюдателя $V_{\min} = 0,02$) в дневное время на фоне неба.

Как показали проведенные исследования, дальность распространения оптического излучения в морской воде определяется в основном поглощением растворенных в ней веществ и рассеянием на взвешенных частицах. В некоторых пробах воды преобладало поглощение, в некоторых — рассеяние. Одновременно было установлено, что вода, подобно атмосфере, обладает различной спектральной прозрачностью. Экспериментально было установлено, что оптическое излучение в красной части спектра (что соответствует излучению рубинового лазера) более сильно поглощается морской водой, в то время как сине-зеленая часть спектра поглощается меньше и поэтому распространяется в морской воде на значительные расстояния. Отсюда следует вывод, что для применения в задачах связи и обнаружения подводных объектов целесообразно использовать такие частоты, которые лежали бы в сине-зеленой части спектра.

3. РАССЕИВАЮЩИЕ СВОЙСТВА ЦЕЛЕЙ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТРАЖЕННЫХ СИГНАЛОВ В ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ

3.1. Эффективная площадь рассеяния типовых целей

При оценке отражающих свойств целей в оптическом диапазоне практически во всех случаях можно пользоваться методами геометрической оптики, так как их размеры обычно значительно больше длины волны. В оптическом диапазоне так же, как и в радиодиапазоне, можно выделить три случая рассеяния объектом падающей на него волны:

1. Зеркальное рассеяние — средние размеры шероховатостей намного меньше длины волны.

2. Диффузионное рассеяние — средние размеры шероховатостей соизмеримы с длиной волны.

3. Средние размеры шероховатостей много больше длины волны.

Как видно из приведенных выше случаев рассеяния, в качестве критерия выступает средняя высота шероховатостей. Данная величина оценивается так же, как и в радиолокации, согласно критерию Рэлея

$$h < \frac{\lambda}{8} \sin(\phi), \quad (3.1)$$

где λ — длина волны; h — высота шероховатости; ϕ — угол падения.

Отсюда следует, что поверхность или объект обладают свойствами гладкости, если $h/\lambda \rightarrow 0$ или $\phi \rightarrow 0$. При проектировании оптической системы необходимо помнить об этом, так как даже при значительных h/λ , но очень пологом угле падения, поверхность обладает свойствами гладкой, удовлетворяющей условиям зеркального отражения.

Поскольку длина волны оптического излучения мала по сравнению с длинами волн радиодиапазона, то в чистом виде в природе зеркального отражающих поверхностей, не существует. Данный вид отражения используется для создания искусственных отражателей. Поэтому рассмотрение рассеивающих свойств начнем с диффузного рассеяния.

Будем полагать, что элемент поверхности тела dS освещен равномерно и отражает световой поток диффузно по закону Ламберта, который устанавливает зависимость изменения силы света излучающей или рассеивающей поверхности от направления, в котором производится наблюдение. При этом сила света в направлении, составляющем угол ϕ с нормалью к поверхности (угол падения), $I_\phi = I_0 \cos(\phi)$, где I_0 — сила света в направлении к поверхности ($\phi = 0$). Иначе гово-

ря, сила света, наблюдаемая в нормальном направлении, максимальна, а в направлении касательной к поверхности равна нулю. Яркость площадки S в направлении ϕ равна $B = I_0/S \cos(\phi) = I_0/S$, т. е. не зависит от направления. Яркость характеризует величину светового потока, излучаемого (рассеиваемого) с единицы поверхности, видимой из точки наблюдения, в заданном направлении.

Существуют рассеивающие поверхности, энергетическая яркость которых постоянна для всех направлений, т. е. не зависит от направления наблюдения. Такие поверхности называют идеально рассеивающими поверхностями Ламберта. Используя закон Ламберта, можно записать следующее выражение для элемента плотности потока мощности сигнала, падающего на приемное устройство оптической локационной системы:

$$d\Pi_2 = k\Pi_1(\pi R^2)^{-1}(\mathbf{nr}_1)(\mathbf{r}_2\mathbf{n})dS, \quad (3.2)$$

где Π_1 — плотность потока мощности сигнала, падающего на рассеивающий объект; R — расстояние между элементом рассеивающей поверхности dS и приемным устройством; \mathbf{r}_1 — вектор, направленный на встречу падающему потоку; \mathbf{r}_2 — вектор, направленный вдоль линии наблюдения; k — коэффициент диффузного отражения.

Выражение (3.2) записано с учетом того, что падающий световой поток параллельный, и освещенность элемента dS постоянна.

Плотность потока мощности сигнала, падающего на приемную оптическую антенну, можно определить по следующему выражению:

$$\Pi_2 = k\Pi_1(\pi R^2)^{-1} \iint_S (\mathbf{nr}_1)(\mathbf{r}_2\mathbf{n})dS. \quad (3.3)$$

Формула (3.3) справедлива как для однопозиционной, так и для двухпозиционной локации. В двухпозиционном случае векторы \mathbf{r}_1 и \mathbf{r}_2 не совпадают по направлению, и область интегрирования S представляет зону пересечения освещенной части тела и части тела, которая видна из точки наблюдения. В однопозиционном случае обе области совпадают.

В качестве примера найдем величину ЭПР шара, радиусом $r_{\text{ш}}$, который рассеивает по закону Ламберта. Будем полагать, что шар освещен равномерно, причем световой поток падает вдоль оси z . Это направление определяется тремя направляющими косинусами (рис. 3.1, а): $U_{x1} = 0, U_{y1} = 0, U_{z1} = 1$, а направление наблюдения (вектор \mathbf{r}_2) — направляющими косинусами $U_{x2} = \sin\beta, U_{y2} = 0, U_{z2} = \cos\beta$. Нормаль к элементу сферы имеет направляющие косинусы $U_{xn} = \cos\xi \cos\alpha, U_{yn} = \sin\xi, U_{zn} = \cos\xi \sin\alpha$.

$$\sigma_{\text{ц}} = 4\pi R^2 \frac{\Pi_2}{\Pi_1} = 2,6(6)k\pi r_{\text{ш}}^2. \quad (3.7)$$

Сопоставление уравнения (3.7) с выражением, которое определяет эффективную площадь рассеяния шара в радиодиапазоне, показывает, что они отличаются коэффициентом $2,6(6)k$.

В качестве второго примера рассмотрим диффузионное отражение от плоского диска. Такой случай имеет место на практике, если луч отражается от протяженного объекта, размеры которого превышают поперечное сечение диаграммы направленности в плоскости цели. На объекте высвечивается круг или другая фигура, форма которой зависит от вида поперечного сечения диаграммы.

Используя аналогичный подход для однопозиционного случая, получаем

$$\Pi_2 = \left(k\Pi_1 \frac{r^2}{R^2} \right) \cos\gamma,$$

где r — радиус диска; γ — угол между направлением падения и нормалью к поверхности диска.

Таким образом, ЭПР диффузно рассеивающего диска площадью $S_{\text{д}} = \pi r^2$

$$\sigma_{\text{ц}} = 4\pi k r^2 \cos\gamma = 4k S_{\text{д}} \cos\gamma, \quad (3.8)$$

пропорциональна косинусу угла визирования γ . Выражение (3.8) характеризует ЭПР плоской диффузной поверхности любой формы с площадью $S_{\text{д}}$. Следует подчеркнуть, что в приближении Ламберта величина $\sigma_{\text{ц}}$ не зависит от длины волны. Однако на практике коэффициент k является функцией длины волны, а также поляризации падающего излучения. Коэффициент $k(\lambda)$ обычно определяют экспериментально.

Рассмотрим случай зеркального (направленного) отражения, которое в оптическом диапазоне встречается весьма часто. В случае чисто зеркального отражения расходимость луча до и после отражения одинакова. Зеркальным отражением объясняется «металлический» блеск чистой (не покрытой окислами или защитной краской) поверхности металлов, а также яркие блики при отражении света от стеклянных и водных поверхностей (при условии отсутствия ветра и волнения). В этом случае приближенную оценку зеркального коэффициента отражения R_i можно выполнить по формулам Френеля. При нормальном падении светового потока на диэлектрическую поверхность из формул Френеля следует

$$R_i = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2},$$

где n — показатель преломления материала поверхности; так, например, при отражении светового потока от стеклянной поверхности ($n = 1,5$) значение R_i составляет 0,04. Значение R_i существенно зависит от угла падения γ и поляризации падающего излучения.

Коэффициент отражения для металлов колеблется в широких пределах — от 0,3 до 0,96 в зависимости от типа металла, степени его обработки и длины волны (R_i возрастает при увеличении λ). Зеркальное отражение по своей физической природе существенно отличается от диффузного. Телесный угол рассеяния ламбертовой плоской цели составляет π . При зеркальном рассеянии угловая расходимость отраженного светового потока в $10^4 - 10^5$ раз меньше, чем при диффузном. Телесный угол рассеяния составляет в этом случае $10^{-4} - 10^{-5}$ рад. Таким образом, ЭПР зеркальных целей на несколько порядков превышает ЭПР диффузных целей. Зеркальное отражение используется при создании искусственных оптических отражателей.

Рассмотренный метод определения характеристик рассеяния тел простейшей формы пригоден в случае, когда отражение является диффузным и подчиняется закону Ламберта. Используя аналогичный подход, можно найти выражения для ЭПР цилиндра, конуса и других осесимметричных тел, что в принципе позволит рассчитать их диаграммы рассеяния. На практике большинство объектов имеет сложную форму и их ЭПР не поддается расчету. Реальные цели, как правило, не являются ни ламбертовыми диффузными отражателями, ни рассеивателями зеркального типа, а представляют собой их комбинацию. Дело в том, что при освещении объекта когерентным излучением диаграмма рассеяния существенно отличается от диффузной диаграммы рассеяния по Ламберту, которая формируется при некогерентном облучении. По этой причине целесообразно определять диаграммы рассеяния экспериментально, используя метод физического моделирования.

3.2. Поляризационные характеристики целей

Явление поляризации. Как известно, поляризация определяет закон изменения направления и величины вектора электрического (или магнитного) поля в данной точке пространства во времени (например, за период колебания несущей частоты). Различают линей-

ную, круговую и эллиптическую поляризации. При линейной поляризации вектор электрического поля (вместе с перпендикулярно расположенным вектором магнитного поля), изменяясь с частотой поля, остается параллельным самому себе (в зависимости от ориентации относительно горизонтальной поверхности Земли линейная поляризация называется горизонтальной или вертикальной). При круговой поляризации электрический вектор вращается с частотой поля, так что его конец описывает в пространстве винтовую линию, а проекция вектора на плоскость, перпендикулярную направлению распространения, описывает за один период колебаний окружность. Эллиптическая поляризация отличается тем, что эта окружность превращается в эллипс, так как величина вектора при вращении изменяется. В зависимости от направления вращения вектора электрического поля для наблюдателя, смотрящего вдоль направления распространения волны (т. е. с тыльной стороны антенны) по или против часовой стрелки, различают правую или левую круговую эллиптическую, или круговую поляризацию (иногда, особенно в физике, считают, что наблюдатель смотрит в направлении источника излучения). Необходимо отметить, что любую поляризацию можно считать эллиптической, так как для линейной поляризации отношение осей эллипса равно нулю, а для круговой — единице.

Эллиптически поляризованная волна может быть представлена множеством способов с использованием разложения по двум ортогональным единичным (в общем случае комплексным) векторам, образующим так называемый поляризационный базис. В качестве базисных векторов широко применяются

декартовы и круговые.

Декартовы базисы — векторы \mathbf{i}_x и \mathbf{i}_y (рис. 3.2) характеризуют линейные поляризации вдоль осей x и y .

Соответственно, комплексный вектор электрического поля раскладывается на горизонтально и вертикально поляризованные векторы

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_r + \mathbf{E}_b = \mathbf{E}_r \mathbf{i}_x + \mathbf{E}_b \mathbf{i}_y. \quad (3.9)$$

Если фазовый сдвиг между \mathbf{E}_r и \mathbf{E}_b равен 0, то волна поляризована линейно. Для других значений фазового сдвига волна поляризована эл-

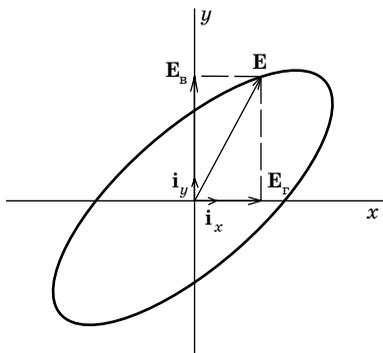


Рис. 3.2. Разложение эллиптически поляризованной волны на декартовы базисные векторы

липтически, а если $\mathbf{E}_r = \mathbf{E}_b$ и фазовый сдвиг равен $\pi/2$, то имеет место круговая поляризация. Если же \mathbf{E}_r и \mathbf{E}_b — случайные функции времени, то при их неполной корреляции говорят о частичной поляризации (соответственно, полная корреляция дает полную поляризацию).

Круговые базисные векторы включают право- и левовращающиеся \mathbf{i}_π и \mathbf{i}_λ . Каждый из них построен из линейных векторов вдоль осей x и y , имеющих амплитуды $1/\sqrt{2}$ (тогда амплитуды \mathbf{i}_π и \mathbf{i}_λ будут равны 1) и сдвинутых по фазе на $\pi/2$, т. е.

$$\mathbf{i}_\pi = (\mathbf{i}_r + j\mathbf{i}_b)/\sqrt{2}; \quad \mathbf{i}_\lambda = (\mathbf{i}_r - j\mathbf{i}_b)/\sqrt{2}. \quad (3.10)$$

В этом случае разложение комплексного вектора электрического поля при произвольной поляризации на сумму право- и левовращающегося векторов \mathbf{E}_π и \mathbf{E}_λ , т. е. двух противоположных поляризованных по кругу волн, имеет вид

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_\pi + \mathbf{E}_\lambda = \mathbf{E}_\pi \mathbf{i}_\pi + \mathbf{E}_\lambda \mathbf{i}_\lambda. \quad (3.11)$$

Сопоставление (3.9), (3.10) и (3.11) позволяет получить

$$\mathbf{E}_\pi = (\mathbf{E}_r - j\mathbf{E}_b)/\sqrt{2}; \quad \mathbf{E}_\lambda = (\mathbf{E}_r + j\mathbf{E}_b)/\sqrt{2} \quad (3.12)$$

или в матричном виде

$$\begin{pmatrix} \dot{\mathbf{E}}_\pi \\ \dot{\mathbf{E}}_\lambda \end{pmatrix} = \|T\| \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{E}}_r \\ \dot{\mathbf{E}}_b \end{pmatrix}, \quad (3.13)$$

где $\|T\| = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & -j \\ 1 & +j \end{pmatrix}$ — матрица преобразования.

Обратное преобразование имеет вид

$$\begin{pmatrix} \dot{\mathbf{E}}_r \\ \dot{\mathbf{E}}_b \end{pmatrix} = \|T\|^{-1} \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{E}}_\pi \\ \dot{\mathbf{E}}_\lambda \end{pmatrix}, \quad (3.14)$$

где $\|T\|^{-1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ +j & -j \end{pmatrix}$ — матрица, обратная $\|T\|$.

Матрица отражения. Поскольку в оптическом диапазоне, цели, как правило, анизотропны, т. е. ортогональные составляющие падающей волны $\mathbf{E}_{\pi, b}$ и $\mathbf{E}_{\pi, r}$ претерпевают при отражении изменения (имеет место деполаризация).

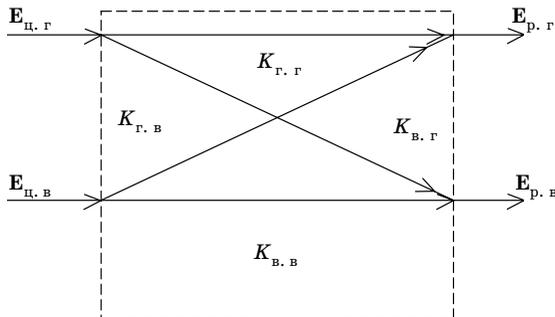


Рис. 3.3. Общая характеристика матрицы рассеяния

Горизонтальная и вертикальная составляющие поля падающей волны преобразуются при отражении в соответствующие составляющие отраженной волны, характеризуемые комплексными коэффициентами $K_{г.г}$ и $K_{в.в}$ (параллельные поляризации). Перекрестная поляризация характеризуется коэффициентами $K_{г.в}$ — для вертикально поляризованного отраженного сигнала при облучении цели горизонтально поляризованной волной и $K_{в.г}$ — для горизонтально поляризованного отраженного сигнала при облучение цели вертикально поляризованной волной. Таким образом, результирующие значения горизонтальной и вертикальной составляющих отраженной волны

$$\mathbf{E}_{р.г} = K_{г.г} \mathbf{E}_{ц.г} + K_{г.в} \mathbf{E}_{ц.в}, \quad \mathbf{E}_{р.в} = K_{в.г} \mathbf{E}_{ц.г} + K_{в.в} \mathbf{E}_{ц.в} \quad (3.15)$$

или в матричной форме

$$\begin{pmatrix} \mathbf{E}_{р.г} \\ \mathbf{E}_{р.в} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{г.г} & K_{г.в} \\ K_{в.г} & K_{в.в} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{E}_{ц.г} \\ \mathbf{E}_{ц.в} \end{pmatrix}. \quad (3.16)$$

Эта матрица, именуемая поляризационной матрицей отражения, наглядно характеризуется (рис. 3.3), причем для однопозиционной локации перекрестные элементы матрицы отражения, как следует из известной теоремы взаимности, одинаковы, т. е. $K_{г.в} = K_{в.г}$.

4. РАСЧЕТ И ВЫБОР ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

4.1. Энергетические расчеты оптико-электронных приборов

Цель и порядок энергетического расчета

Целью энергетического расчета обычно является определение соотношений между полезным сигналом и шумами (помехами) и нахождение на основе этих соотношений важнейших параметров ОЭП. К таким параметрам относятся: отношение сигнал/шум в различных точках схемы ОЭП, параметры обнаружения, точностные параметры, пороговые или эквивалентные шуму параметры, дальность действия и ряд др. Отдельную группу составляют конструктивные параметры ОЭП: диаметр входного зрачка, фокусное расстояние, относительное отверстие и угловое поле объектива, параметры сканирующей системы, источника и приемника излучения и многие другие, которые могут быть найдены в процессе энергетического расчета прибора.

Общая методика энергетического расчета ОЭП состоит из следующих этапов:

— составление рабочего (основного энергетического) уравнения или неравенства, устанавливающего в общем виде связь между полезным сигналом, помехами и шумами и являющегося обобщенным описанием алгоритма работы ОЭП с учетом особенностей структуры ОЭП и критерия качества его работы;

— представление входящих в это уравнение значений полезного сигнала, шумов и помех в виде функций параметров и характеристик излучателя, передающей системы, наблюдаемого объекта, среды распространения оптического сигнала, приемной системы;

— решение полученного в развернутой форме рабочего уравнения относительно одного или совокупности нескольких параметров входящих в него конструктивных параметров или заданного критерия качества (выходного параметра ОЭП);

— выбор и расчет остальных параметров и проведение проверочного расчета, имеющего целью проверку выполнения условия, сформулированного или заданного на первом этапе расчета.

Необходимо отметить, что при разработке некоторых видов ОЭ, имеющих длительный срок эксплуатации или хранящихся долгое время до начала эксплуатации, перечисленные выше традиционные этапы энергетического расчета приходится дополнять этапом влия-

ния дестабилизирующих факторов внешней среды и погрешностей настройки.

Перечисленные этапы реализуются в обобщенной модели ОЭП (рис. 4.1).

Параметры и характеристики, с которыми приходится иметь дело, могут быть разделены на три группы:

— не зависящие от разработчика, например параметры и характеристики наблюдаемого объекта или излучателя, а также среды распространения сигнала;

— критерии качества ОЭП и некоторые конструктивные параметры, определяемые техническим заданием, например отношение сигнал/шум, погрешность измерений, габаритные размеры, масса, угловое поле объектива;

— конструктивные параметры, которыми разработчик может варьировать, подбирая оптимальные сочетания ряда параметров и характеристик прибора; к ним относятся, например габаритные параметры объектива, параметры приемника или электронного тракта и др.

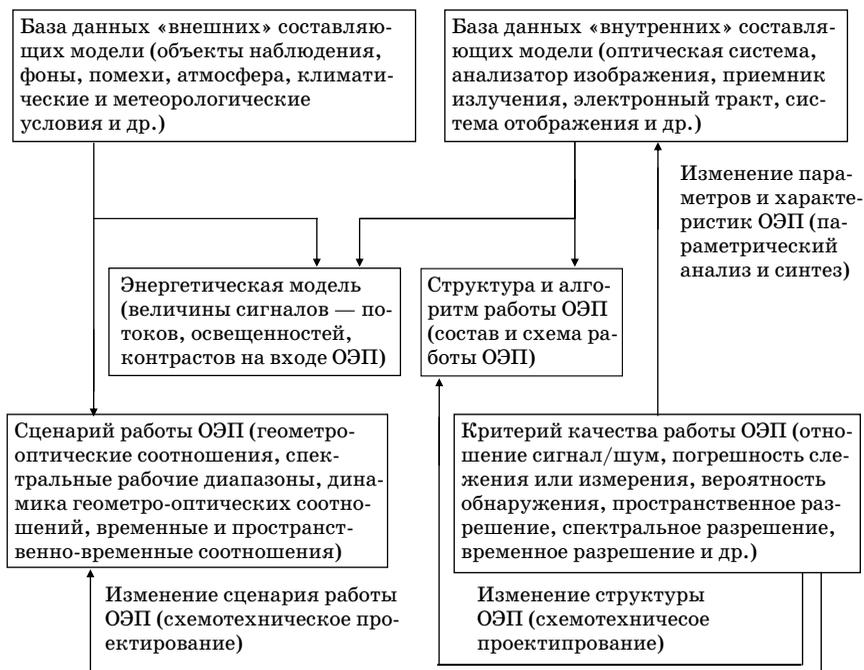


Рис. 4.1. Структура обобщенной модели ОЭС и уровни проектирования

Представляя ОЭП в виде многопараметрической системы, можно применять общие методы оптимизации для выбора таких конструктивных параметров, которые обеспечивают заданное значение критерия качества ОЭП. В достаточно общем случае задача оптимизации сводится к отысканию максимумов и минимумов отдельных параметров.

Выбор сценария работы и энергетической модели ОЭП

Сценарии работы ОЭП отличаются огромным разнообразием в связи с широким распространением и самыми различными условиями работы этих приборов. Поэтому создание достаточно обобщенной модели (субмодели) сценария работы ОЭП представляется затруднительным, если не невозможным. В специальной литературе рассматриваются отдельные, часто встречающиеся сценарии работы ОЭП конкретного назначения, например приборов ночного видения или систем обнаружения летательных аппаратов. Но и в этих случаях число факторов, которые описывают геометро-оптический, спектральные, энергетические, динамические и другие свойства отдельных элементов, определяющих сценарий работы ОЭП или оказывается чрезмерно большим, либо не поддается определению. Поэтому на практике приходится ограничиваться некоторыми упрощенными сценариями, например, представлять излучатели в виде простейших геометрических фигур или пользоваться усредненными коэффициентами пропускания атмосферы, или рассматривать работу ОЭП и всей системы в статике и т. д.

Несколько проще во многих случаях выбрать или составить энергетическую модель (субмодель) ОЭП. Рассмотрим достаточно простой, но часто встречающийся на практике сценарий работы ОЭП, когда в угловое поле прибора попадают одновременно сигналы (потoki излучения) от наблюдаемого объекта, от фона и помех, находящихся в угловом поле ОЭП, а также от среды распространения, например атмосферы.

Сигналы от излучателей могут создаваться за счет собственного и отраженного или рассеянного излучения. Структура оптического сигнала, поступающего на вход ОЭП, т. е. энергетическая субмодель ОЭП, может быть представлена в виде совокупности отдельных составляющих яркости (рис. 4.2), обусловленных следующими факторами: L_1 — собственным излучением наблюдаемого объекта; L_2 — отраженным (рассеянным) от объекта излучением, созданным поме-

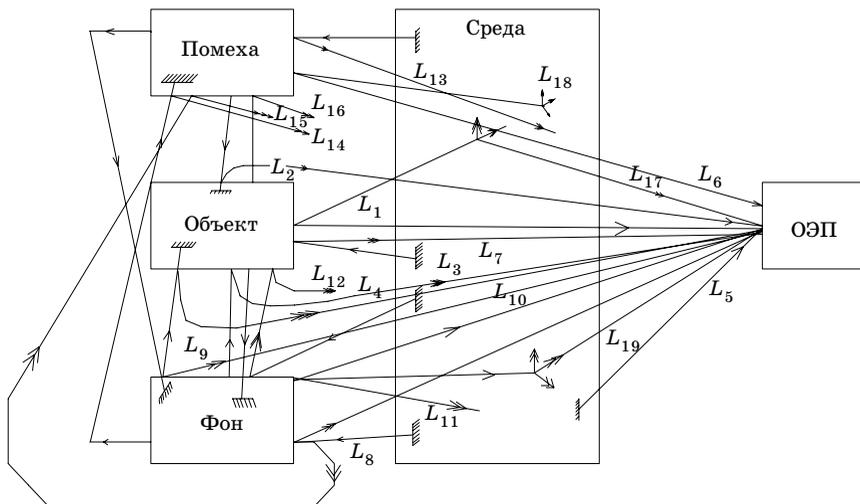


Рис. 4.2. Структура оптического сигнала, поступающего на вход ОЭП

хой; L_3 — отраженным (рассеянным) от объекта излучением, созданным фоном; L_4 — излучением объекта, созданным переотраженным (рассеянным) от фона излучением помехи; L_5 — излучением среды; L_6 — собственным излучением помехи; L_7 — отраженным (рассеянным) от объекта излучением среды; L_8 — отраженным (рассеянным) от фона излучением среды; L_9 — отраженным от фона (рассеянным) излучением помехи; L_{10} — собственным излучением фона; L_{11} — отраженным от фона (рассеянным) излучением помехи; L_{12} — излучением объекта, созданным переотраженным и рассеянным поверхностью фона излучением среды; L_{13} — отраженным от помехи (рассеянным) излучением среды; L_{14} — отраженным от помехи (рассеянным) излучением фона; L_{15} — излучением помех, созданным переотраженным и рассеянным поверхностью фона излучением среды; L_{16} — отраженным от помехи излучением объекта; L_{17} — рассеянным в среде излучением объекта; L_{18} — рассеянным в среде излучением помехи; L_{19} — рассеянным в среде излучением фона.

В качестве примера можно рассмотреть ОЭП наземного базирования, предназначенный для наблюдения объекта, находящегося в нижних слоях атмосферы на достаточно большом удалении. Одним из наиболее неблагоприятных случаев работы этого ОЭП является тот, когда помехой будет Солнце, а фоновое излучение создается как подстилающей поверхностью (наземный ландшафт), так и нижней кромкой облачности. Последнее обстоятельство может увеличить число

составляющих L по сравнению со случаем, приведенным на рис. 4.1. Без учета специфики конкретного ОЭП и условий его работы (рабочего диапазона спектра, времени суток, характера облачности и подстилающей поверхности, углового поля ОЭП и ряда других факторов) структура оптического сигнала, приходящего на вход прибора, т. е. энергетическая субмодель, для этого случая будет определяться следующими составляющими: L_1 — собственным излучением наблюдаемого объекта; L_2 — отраженным (рассеянным) от объекта излучением, созданным Солнцем; $L_3^{об}$ — отраженным от объекта (или рассеянным) излучением, созданным собственным излучением облачности; $L_3^{п.п}$ — отраженным (или рассеянным) от объекта излучением, созданным собственным излучением подстилающей поверхности; $L_4^{п.п}$ — излучением объекта, созданным переотраженным (рассеянным) от подстилающей поверхности излучением Солнца; L_5 — собственным излучением среды (атмосферы); L_6 — излучением Солнца, попадающим в угловое поле ОЭП; L_7 — отраженным от объекта (рассеянным) излучением атмосферы; $L_8^{об}$ — отраженным от облачности (рассеянным) излучением атмосферы; $L_8^{п.п}$ — отраженным от подстилающей поверхности (рассеянным) излучением атмосферы; $L_9^{п.п}$ — отраженным от подстилающей поверхности (рассеянным) излучением Солнца; $L_9^{об}$ — отраженным от облачности (рассеянным) излучением Солнца; $L_{10}^{об}$ — собственным излучением облачности; $L_{10}^{п.п}$ — собственным излучением подстилающей поверхности; $L_{11}^{п.п}$ — отраженным от подстилающей поверхности (рассеянным) излучением объекта; $L_{11}^{об}$ — отраженным от облачности (рассеянным) излучением объекта; $L_{12}^{об}$ — излучением объекта, созданным переотраженным (рассеянным) от облачности; L_{17} — рассеянным в атмосфере излучением объекта; L_{18} — рассеянным в атмосфере излучением Солнца; $L_{19}^{п.п}$ — рассеянным в атмосфере излучением подстилающей поверхности; $L_{19}^{об}$ — рассеянным в атмосфере излучением облачности; L_{20} — отраженным от облачности (рассеянным) излучением подстилающей поверхности; L_{21} — отраженным от подстилающей поверхности (рассеянным) излучением облачности.

По сравнению с ранее рассмотренной структурой (рис 4.1) здесь отсутствуют составляющие $L_{13} - L_{16}$, так как бессмысленно говорить о вкладе этих составляющих по сравнению с собственным излучением Солнца, а составляющие $L_3, L_4, L_8, L_9, L_{10}, L_{11}, L_{12}$ и L_{19} , в свою очередь, подразделяются на две части каждая. Кроме того, здесь появились две новые составляющие — L_{20} и L_{21} , учитывающие «энергетическое взаимодействие» двух рассматриваемых фоновых излучателей.

Довольно часто приходится рассматривать и более сложную структуру. Например, при работе ОЭП космического базирования, наблюдающего различные объекты на земной поверхности, фонами одновременно могут являться наземный ландшафт, водная поверхность и верхний край облачности, а помехами — Солнце, блики вводных поверхностей и др.

Пользуясь структурной схемой, приведенной на рис. 4.1, т. е. составляя энергетическую модель (субмодель) ОЭП, можно найти величины яркостей (поток, освещенностей) на входе прибора для конкретных условий его работы. При этом с помощью компьютерного моделирования возможно выделить те составляющие входного сигнала, которые вносят наибольший вклад в его суммарное значение, и в дальнейших расчетах учитывать только их. Таким образом можно учесть, что для конкретных условий работы ОЭП определенные излучатели (объекты, помехи, фоны) являются источниками только одного вида излучения либо собственного, либо отраженного или рассеянного.

Например, рассмотрим случай, когда сигнал, содержащий информацию о появлении в угловом поле ОЭП обнаруживаемого объекта с яркостью $L_{об}$, определяется разностью освещенностей $\Delta E_{вх}$ на входном зрачке ОЭП для случаев (моментов) появления объекта и его отсутствия в угловом поле прибора $\Delta\Omega_{ОЭП}$, т. е.

$$\Delta E_{вх} = (\tau_{с.об} L_{об} + L_{с.об} - \tau_{с.ф} L_{ф} - L_{с.ф}) \Delta\Omega_{об},$$

где $\tau_{с.об}$ $\tau_{с.ф}$ — коэффициенты пропускания среды на трассах «объект-фон» и «фон-ОЭП» соответственно; $L_{с.об}$ $L_{с.ф}$ — яркости атмосферы на этих трассах; $\Delta\Omega_{об}$ — угловое поле, занимаемое объектом (видимый угловой размер объекта), причем $\Delta_{об} < \Delta\Omega_{ОЭП}$.

Для дневных условий работы ОЭП при наличии Солнца за пределами $\Delta\Omega_{ОЭП}$ суммарная яркость $L_{об}$ для рассматриваемого выше примера может определяться в случае наличия в $\Delta\Omega_{ОЭП}$ объекта и фона — подстилающей поверхности как

$$L_{об} = L_1 + L_2 + L_3^{п.п} + L_4^{п.п} + L_7 + L_{12}^{п.п},$$

а суммарная яркость фона при отсутствии объекта в угловом поле ОЭП как

$$L_{ф} = L_8^{п.п} + L_9^{п.п} + L_{10}^{п.п} + L_{18} + L_{19}^{п.п}.$$

Для ночных условий работы ОЭП в отсутствии достаточно мощных излучающих помех или при работе в диапазоне длин волн свыше

5 мкм, где доля отраженного (рассеянного) солнечного излучения, как правило, несравнимо меньше собственного (теплого) излучения объектов и фонов, в нашем примере

$$L_{об} = L_1 + L_3^{п.п} + L_7 + L_{12}^{п.п},$$

$$L_{\Phi} = L_8^{п.п} + L_{10}^{п.п} + L_{19}^{п.п}.$$

При переходе от яркостей L к потокам Φ и освещенностям E на входе ОЭП необходимо учитывать спектральные и пространственные соотношения, а также пропускание среды распространения на тех трассах, которые проходит каждая составляющая оптического сигнала, поступающего на вход системы.

Величина монохроматического потока $\Phi_{\lambda i}$, соответствующего i -й составляющей оптического сигнала, определяется следующим образом:

$$\Phi_{\lambda i} = \Phi_i(\lambda) = \tau_{ci} L_i(\lambda) \Delta\Omega_i A_{вх}.$$

Принимая в качестве основного энергетического, уравнение соотношения будет

$$\Delta\Phi(\lambda) \geq \mu_{\Phi} \Phi_{п. ОЭП}(\lambda),$$

где μ_{Φ} — требуемое отношение сигнал/шум на входе ОЭП; $\Phi_{п. ОЭП}(\lambda)$ — порог чувствительности ОЭП.

Можно в это выражение подставить развернутые выражения для $L_{об}(\lambda)$ $L_{\Phi}(\lambda)$ и рассмотреть в качестве предварительного условия функционирования ОЭП выполнение этого неравенства.

Для составления рабочего уравнения ОЭП в целом необходимо определить эффективные значения потоков $\Phi_{\lambda i}$ или соответствующих им освещенностей $E_{вх i}$ на выходе приемника излучения, т. е. учесть спектральный коэффициент пропускания оптической системы $\tau_0(\lambda)$ и спектральную чувствительность приемника $s(\lambda)$ путем умножения $\Phi_i(\lambda)$ на $\tau_0(\lambda)$ и на $s(\lambda)$. Полученные таким образом электрические сигналы на выходе приемника следует «провести» через все звенья ОЭП, т. е. учесть передаточные функции этих звеньев, до выхода структурной схемы прибора, где обычно и определяется показатель (критерий) качества работы всего ОЭП. Сопоставляя вычисленное значение показателя качества с заданным или требуемым, можно вести параметрический анализ и синтез или изменять условия работы или структуры прибора, т. е. возвращаться к системотехническому этапу проектирования.

Расчет основных габаритных параметров приемной оптической системы

Важнейшими габаритными параметрами приемной оптической системы ОЭП являются диаметр входного зрачка объектива D , его фокусное расстояние f и диафрагменное число $K = f/D$, а также угловое поле $2\omega_v$. Их значения во многом определяют уровни полезного сигнала, приходящего на вход ОЭП, а также помех и шумов, т. е. от выбора данных параметров зависит значение отношения сигнал/шум μ . Поскольку это отношение определяет и другие критерии качества ОЭП, наиболее часто расчет D , f , K и ω_v целесообразно вести из условия обеспечения требуемого значения μ . Отношение сигнал/шум на выходе приемника излучения в общем виде описывается уравнением

$$\mu_{\text{и}} = k_{\text{м}} \int_0^{\infty} \Phi_{\text{с}}(\lambda) \tau_0(\lambda) s_{VfT}(\lambda) d\lambda / \sigma_{\text{ш. вых}}, \quad (4.1)$$

где $k_{\text{м}}$ — коэффициент, учитывающий потери мощности сигнала за счет модуляции и других преобразований сигнала в электронном тракте; $\Phi_{\text{с}}(\lambda)$ — поток, приходящий на входной зрачок приемной оптической системы как функция длины волны излучения λ ; $\tau_0(\lambda)$ — спектральный коэффициент пропускания приемной оптической системы; $s_{VfT}(\lambda)$ — спектральная характеристика вольтовой чувствительности приемника излучения на частоте модуляции f_T , принятой при паспортизации приемника; $\sigma_{\text{ш. вых}}$ — среднее квадратическое значение шумов и помех, приведенное к выходу приемника излучения. Значения $\Phi_{\text{с}}(\lambda)$ часто рассчитывают по следующим формулам: для удаленного точечного излучателя

$$\Phi_{\text{с}}(\lambda) = \tau_{\text{с}}(\lambda) I(\lambda) A_{\text{вх}} / l^2, \quad (4.2)$$

для удаленного «площадного» излучателя, т. е. излучателя, перекрывающего лишь часть углового поля ОЭП,

$$\Phi_{\text{с}}(\lambda) = \tau_{\text{с}}(\lambda) L(\lambda) \Delta A A_{\text{вх}} / l^2, \quad (4.3)$$

для протяженного излучателя, т. е. излучателя, перекрывающего все угловое поле ОЭП,

$$\Phi_{\text{с}}(\lambda) = \tau_{\text{с}}(\lambda) L(\lambda) q A_{\text{вх}} / f^2 \approx \tau_{\text{с}}(\lambda) L(\lambda) A_{\text{вх}} \Delta \Omega. \quad (4.4)$$

В этих формулах $\tau_{\text{с}}(\lambda)$ — спектральный коэффициент пропускания среды распространения оптического сигнала; $I(\lambda)$, $L(\lambda)$ — спект-

ральные плотности силы излучения и яркости источника полезного сигнала; $A_{\text{вх}}$ — площадь входного зрачка; l — расстояние от ОЭП до излучателя; ΔA — видимая площадь излучателя; q — площадь полевой диафрагмы оптической системы; $\Delta\Omega$ — телесное угловое поле объектива приемной системы.

Уравнение (4.1) определяет номинальное значение отношения сигнал/шум без учета действия дестабилизирующих факторов, приводящих, например, к изменению вольтовой чувствительности в условиях хранения и эксплуатации. Обычно в техническом описании на фотоприемник приводятся данные о предельных уходях вольтовой чувствительности. Используя эти данные, можно с помощью уравнения (4.1) определить предельные значения $\mu_{\text{и}}$.

При преобладании внутренних шумов — шумов приемника излучения — выражение (4.1) можно привести к виду

$$\mu_{\text{и}} = k_{\text{м}} k_f \int_0^{\infty} \Phi_{\text{с}}(\lambda) \tau_0(\lambda) D_{fT}^*(\lambda) d\lambda / \sqrt{A \Delta f_{\text{э}}}. \quad (4.5)$$

Здесь k_f — коэффициент, учитывающий различие в спектральных плотностях мощности шума приемника на рабочей частоте модуляции и на частоте f_T ; $D_{fT}^*(\lambda)$ — спектральная характеристика обнаружительной способности приемника на частоте f_T ; A — площадь чувствительного слоя приемника излучения; $\Delta f_{\text{э}}$ — эквивалентная полоса шумов электронного тракта.

При преобладании помех, создаваемых излучением протяженного неоднородного («пестрого») фона со средним квадратическим значением яркости $\sigma_{\text{ЛФ}}$, отношение амплитуды полезного сигнала к среднеквадратическому значению сигнала помехи:

$$\mu_{\text{и}} = \frac{k_{\text{м}} \int_0^{\infty} \Phi_{\text{с}}(\lambda) \tau_0(\lambda) s_{VfT}(\lambda) d\lambda}{A_{\text{вх}} \Delta\Omega \int_0^{\infty} \sigma_{\text{ЛФ}}(\lambda) \tau_{\text{с}}(\lambda) s_{VfT}(\lambda) d\lambda}. \quad (4.6)$$

Здесь принято, что среднее квадратическое значение промодулированного потока, приходящего от фона на вход ОЭП и создающего в полосе пропускания $\Delta f_{\text{э}}$ ОЭП сигнал помехи, равно

$$\sigma_{\text{Ф}}(\lambda) = \sigma_{\text{ЛФ}}(\lambda) \tau_{\text{с}}(\lambda) A_{\text{вх}} \Delta\Omega.$$

При малых угловых полях $2\omega_{\text{у}}$ и квадратной форме чувствительной площадки приемника, в которую вписывается пучок лучей с сечением в виде круга диаметром $l_{\text{п}}$, площадь этого участка можно определить как

$$A = l_{\pi}^2 = (2DK \operatorname{tg} \omega_y)^2 = (4/\pi) D^2 K^2 \Delta \Omega, \quad (4.7)$$

где телесный угол мгновенного углового поля $\Delta \Omega = (\pi/4)(2 \operatorname{tg} \omega_y)^2$, $K = f'/D$. При круглой форме входного зрачка объектива $A_{\text{вх}} = \pi D^2/4$.

Приведенные уравнения позволяют найти предварительно значения D , f' и $2\omega_y$. Например, для случая работы ОЭП по протяженному излучателю и преобладании внутренних шумов после подстановки в (4.5) формулы (4.4) и учета (4.7) получим уравнение, решая которое относительно D , находим

$$D = \frac{8\mu_{\text{и}} K \sqrt{\Delta f_{\text{э}}}}{k_{\text{м}} k_f \pi^2 \operatorname{tg} \omega_y \int_0^{\infty} \tau_{\text{с}}(\lambda) \tau_0(\lambda) L_{\text{с}}(\lambda) D_{f'}^*(\lambda) d\lambda}. \quad (4.8)$$

Аналогичным образом можно получить выражения для расчета значений $2\omega_y$ и K (или $f' = DK$).

В качестве исходных данных для расчета на практике часто приходится использовать известные заранее массивы параметров и значений функций, входящих в выражения (4.1)–(4.8), а также задавать значения некоторых из этих массивов. Целесообразно результаты расчетов получить в виде графиков или номограмм. При этом иногда удобно нормировать значение искомого или искомых параметров относительно значения $\mu_{\text{и}}$. Это позволяет поместить интересующую разработчика информацию на одном графике или номограмме, например в виде зависимости $D/\mu_{\text{и}} = f(K, 2\omega_y)$. Нормирование позволяет расширить диапазон варьирования параметрами D и $\mu_{\text{и}}$ практически неограниченно при одном и том же числе комбинаций параметров $2\omega_y$ и K . С помощью полученных графиков можно быстро и с достаточной точностью определить рациональные сочетания основных конструктивных параметров ОЭП.

Расчет и выбор параметров источников и приемников излучения на основе энергетических соотношений

Общая схема расчета и выбора параметров источников и приемников излучения на основе обеспечения требуемых энергетических соотношений между полезным сигналом и шумами (или помехами) остается такой же, что и при расчете габаритных параметров системы, т. е. подчиняется обобщенной методике энергетического расчета.

Обычно вначале выбирается спектральный диапазон работы всего ОЭП, если он не обусловлен техническим заданием. Этот диапазон

обуславливает выбор надлежащих источника и приемника излучения (из числа имеющихся в распоряжении разработчика) по их спектральным характеристикам. Для выбора оптимального спектрального диапазона часто основное рабочее (энергетическое) уравнение ОЭП, составленное для заданного выходного параметра прибора, решается при нескольких значениях границ этого диапазона, а затем по критерию максимума или допустимого значения выходного параметра выбираются конкретные границы, т. е. величина $\Delta\lambda$. Поскольку в рабочее уравнение входят параметры источника и приемника излучения, такой выбор спектрального диапазона является предварительным (априорным). Он может быть уточнен после выбора и расчета параметров источника, оптической системы и приемника излучения.

Рассмотрим, как можно рассчитать некоторые параметры и характеристики источника излучения (а в более общем случае — этой передающей оптической системы, в состав которой входит источник) при работе ОЭП активным методом.

Пусть в передающей системе с коэффициентом пропускания $\tau_{01}(\lambda)$, площадь выходного зрачка которой равна A_1 , используется источник с яркостью $L(\lambda)$ и эта система находится на достаточно большом расстоянии l_1 от облучаемого (подсвечиваемого) ею объекта. Тогда полезный сигнал Φ_c , определяемый как доля потока, отраженного от объекта, которая достигнет входного зрачка приемной системы площадью $A_{\text{вх}}$, будет описываться следующим выражением:

$$\Phi_c = k_\alpha A_1 A_2 A_{\text{вх}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda) \tau_{c1}^{l_1}(\lambda) \tau_{c2}^{l_2}(\lambda) \rho(\lambda) d\lambda / l_1^2 l_2^2, \quad (4.9)$$

где k_α — коэффициент, учитывающий характер отражения от поверхности подсвечиваемого объекта и закон изменения яркости этого объекта по углу α (например, для диффузионного ламбертова отражателя $k_\alpha = 1/\pi$); A_2 — видимая из входного зрачка приемной системы площадь отражающей поверхности подсвечиваемого объекта; $\lambda_1, \dots, \lambda_2$ — спектральный диапазон работы приемной оптико-электронной системы; $\tau_{c1}(\lambda)$ и $\tau_{c2}(\lambda)$ — спектральное пропускание среды на пути l_1 от передающей системы к объекту и на пути l_2 от объекта к приемной системе; $\rho(\lambda)$ — спектральный коэффициент отражения поверхности объекта.

Подставляя (4.9) в рабочее уравнение ОЭП, например вида (4.5), можно провести сопоставление эффективности использования в ОЭП источников с различным спектральным составом $L(\lambda)$ и выбрать наиболее приемлемый из них. Во многих практических случаях, когда

в диапазоне $\lambda_1, \dots, \lambda_2$ функции, входящие в подынтегральное выражение (4.9), правомерно заменить на постоянные значения L, τ_{c1}, τ_{c2} и ρ , заметно упрощается нахождение рациональных сочетаний между L, A_1 и другими конструктивными параметрами всей системы.

При расчетах подобного рода важно помнить, что определение энергетических и спектральных параметров и характеристик отнюдь не исчерпывает всей задачи по выбору источника излучения, а дает лишь исходные предпосылки для оценки имеющихся в распоряжении разработчика источников на основе анализа большой совокупности их конструктивных и технико-экономических показателей.

Как следует из выражений (4.5), (4.6), основными параметрами и характеристиками приемника излучения, определяемыми из энергетического расчета ОЭП и используемыми при выборе приемника или для сопоставления различных приемников, являются спектральные характеристики вольтовой чувствительности s_V или обнаружительной способности D^* , спектральный диапазон работы $\lambda_1, \dots, \lambda_2$, площадь чувствительного слоя приемника A , значение коэффициента k_f и эквивалентная полоса шумов Δf_s .

Выбор и расчет основных параметров сканирующей системы

Методика расчета и выбора отдельных параметров сканирующих систем зависит от особенностей конкретных ОЭП и условий их работы. В то же время анализ многочисленной литературы, посвященной сканирующим системам, показывает, что достаточной общностью обладает следующий порядок их предварительного расчета:

- выбирают вид и траекторию сканирования, при этом часто необходимо учитывать возможные искажения этой траектории;
- из энергетического расчета и конструктивных соображений находят основные габаритные размеры объектива ($D, D/f'$);
- по заданным значениям углового разрешения с учетом требований к помехозащищенности выбирают или рассчитывают мгновенное угловое поле $\Delta\Omega$;
- для заданных значений поля обзора (размера кадра) и скорости сканирования определяют необходимую ширину полосы пропускания для электронного тракта;
- рассчитывают КПД сканирования η_c , выбирают тип или конструкцию сканирующего узла, проводят расчет и оценку возможных расфокусировок и других причин ухудшения качества изображения,

динамических свойств сканирующей системы и других технико-экономических характеристик;

— проводят проверочный энергетический расчет.

В качестве примера рассмотрим часто встречающийся случай строчно-прямолинейного сканирования поля обзора с размером B со скоростью v_c в направлении сканирования, когда просмотр поля в направлении, перпендикулярном к строкам, осуществляется путем перемещения мгновенного углового поля сканирующей системы со скоростью v (рис. 4.3). Такой системой может быть, например система со сканированием плоским зеркалом, помещенным в карданов подвес, причем скорость прокачки зеркала в одном направлении v_c гораздо больше скорости прокачки зеркала v в другом, ортогональном направлении, или система, установленная на летательном аппарате, перемещающимся с относительной скоростью v . Строчное сканирование может осуществляться либо оптико-механической, либо фотоэлектронной системой.

В качестве основного энергетического уравнения выберем условие

$$E_{об} - E_{ф} \geq \mu \Delta E_{п}, \quad (4.10)$$

где $E_{об}$ и $E_{ф}$ — эффективные облученности входного зрачка ОЭП, создаваемые наблюдаемым объектом и фоном, на котором он находится; μ — требуемое для работы ОЭП отношение сигнал/шум; $\Delta E_{п}$ — пороговая чувствительность ОЭП, приведенная ко входу, которую можно представить в следующем виде:

$$E_{п} = \sqrt{A \Delta f_s} / (\eta_{ОЭП} A_{вх} D^*). \quad (4.11)$$

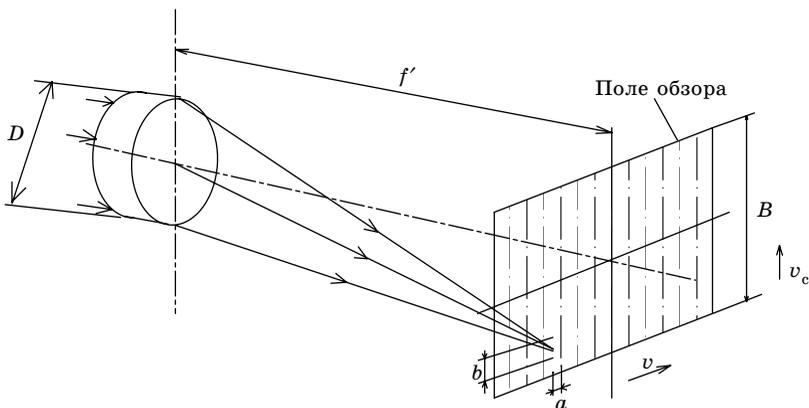


Рис. 4.3. Схема строчно-прямолинейного сканирования поля обзора

Здесь A — площадь чувствительного слоя приемника; $\Delta f_{\text{э}}$ — эквивалентная полоса шумов; $\eta_{\text{ОЭП}}$ — КПД системы первичной обработки информации, учитывающей потери мощности сигнала в этой системе ОЭП; $A_{\text{вх}}$ — площадь входного зрачка; D^* — обнаружительная способность приемника излучения, пересчитанная к конкретным условиям работы ОЭП.

Очевидно, что для просмотра поля обзора без пропусков и перекрытия отдельных строк время для сканирования одной строки должно удовлетворять равенству

$$T_c = a/v,$$

где a ширина строки, которую можно выбирать, исходя из заданного пространственного разрешения по направлению перемещения ОЭП.

Собственно частота сканирования

$$f_c = 1/T_c = v/a. \quad (4.12)$$

Время наблюдения приемником (или одним элементом его чувствительного слоя) одного элемента разложения размером b вдоль направления сканирования составляет

$$\tau_{\text{э}} = \eta_c T_c / n_1 = \eta_c / (f_c n_1) = \eta_c b / (f_c B), \quad (4.13)$$

где $n_1 = B/b$ — число элементов разложения в одной строке.

Ширина полосы пропускания частот электронного тракта ОЭП Δf связана с τ_c соотношением

$$\Delta f = k_{\Delta f} / \tau_{\text{э}},$$

где $k_{\Delta f}$ — коэффициент, зависящий от формы импульсов, образующихся на входе приемника и требований к точности их воспроизведения: обычно $k_{\Delta f} = 0,5 - 4,0$.

Подставляя в (4.10) значение $\Delta E_{\text{п}}$ из (4.11) и принимая $\Delta f_{\text{э}} = \Delta f$, с учетом (4.12) и (4.13), легко получить «развернутую» форму основного энергетического уравнения в следующем виде:

$$E_{\text{об}} - E_{\text{ф}} \geq \mu \sqrt{A v B k_{\Delta f}} / (\eta_{\text{ОЭП}} A_{\text{вх}} D^* \sqrt{\eta_c b a}). \quad (4.14)$$

Значения $E_{\text{об}}$ и $E_{\text{ф}}$ могут быть найдены с помощью формул вида (4.2 – 4.4), поскольку $E = \Phi_c / A_{\text{вх}}$. При необходимости нетрудно представить $E_{\text{об}}$, $E_{\text{ф}}$, а также D^* в виде функций длины волны излучения λ , т. е. перейти к спектральному представлению оптических сигналов.

Выражения вида (4.14) позволяют рассчитать ряд параметров сканирующей системы и, в первую очередь, значение требуемого КПД сканирования η_c . Это дает возможность разработчику оценить целесообразность применения того или иного типа сканирующей системы или той, или иной ее конструкции, для которых известны достижимые на момент разработки значения η_c . Очевидно, что анализ таких выражений позволяет определить рациональные для конкретных условий соотношения между параметрами оптической системы, приемника и сканирующей системы.

Часто для уменьшения полосы частот Δf , т. е. для улучшения энергетического порога чувствительности ОЭП, в таких системах используется не одноэлементный, а многоэлементный приемник, состоящий из N элементов размером a , расположенных вдоль направления скорости v (линейка приемников). В этом случае частота f_c может быть уменьшена в N раз, а следовательно, во столько же раз уменьшится и Δf .

Энергетический расчет тепловизионной системы

При проектировании тепловизионных систем следует учитывать, что они одновременно должны обладать хорошим температурным и достаточно высоким пространственным разрешением. В простейших системах обнаружения на сравнительно низких пространственных частотах температурное разрешение может быть оценено с помощью эквивалентной шуму разности температур $\Delta T_{\text{п}}$ — разности температур двух излучателей, например наблюдаемого объекта и окружающего его фона, при которой разность сигналов, создаваемых этими излучателями, равна уровню шума.

Если изображение объекта с температурой T перекрывает всю полевую диафрагму оптической системы и преобладают шумы приемника излучения, имеющего площадь чувствительного слоя A , то

$$\Delta T_{\text{п}} = \frac{4T^2 \sqrt{A\Delta f}}{q(D/f')^2 \varepsilon c_2 k_m k_f} \left[\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{M(\lambda, T)}{\lambda} \tau_c(\lambda) \tau_o(\lambda) D_{f_t}^*(\lambda) d\lambda \right]^{-1}. \quad (4.15)$$

Здесь A — площадь чувствительного слоя приемника излучения; Δf — полоса пропускания шумов системы первичной обработки информации; q — площадь полевой диафрагмы; D/f' — относительное отверстие объектива; ε — излучательная способность наблюдаемого объекта, принимаемая для спектрального диапазона системы $\lambda_1, \dots, \lambda_2$

постоянной; c_2 — постоянная закона Планка, $c_2 = 1,43879 \cdot 10^{-2}$ м · К; $M(\lambda, T)$ — функция Планка для температуры T ; $\tau_c(\lambda)$ и $\tau_o(\lambda)$ — спектральное пропускание среды (на пути от объекта до входного зрачка) и оптической системы соответственно; $D_{\text{т}}^*(\lambda)$ — обнаружительная способность приемника.

Учитывая, что на разрешающую способность всего тепловизионного ОЭП влияет не только система первичной обработки информации, но и следующие за ней электронный тракт и система отображения (визуализации), качество таких ОЭП часто оценивают минимальной разрешаемой разностью температур $\Delta T_{\text{разр}}$. Существует ряд формул для описания зависимости $\Delta T_{\text{разр}}$ от пространственной частоты f_x по направлению сканирования x , например

$$\Delta T_{\text{разр}}(f_x) = 3 \frac{\Delta T_{\text{п}}}{G_{\text{ОЭП}}(f_x)} \left(\frac{\Delta \beta_y f_x \rho_{\text{ш.п}}}{F_k t_{\text{гл}}} \right)^{1/2}, \quad (4.16)$$

где $\Delta \beta_y$ — угловой размер элемента приемника излучения по вертикали, т. е. в направлении по оси y , перпендикулярном траектории сканирования; $G_{\text{ОЭП}}(f_x)$ — частотная характеристика всей системы «ОЭП-наблюдатель»; F_k — частота кадров; $t_{\text{гл}}$ — время, которое человек-наблюдатель затрачивает на восприятие и осмысление визуального сигнала; $\rho_{\text{ш.п}}$ — так называемый коэффициент ширины полосы, определяемый как

$$\rho_{\text{ш.п}} = \frac{\int_0^{\infty} \Phi_{\text{ш}}(f_x) |K_{\text{э}}(f_x) K_{\text{с.о}}(f_x) K_{\text{гл}}(f_x) \text{sinc}(f_x / 2f'_{\text{т.о}})|^2 df_x}{\Delta f_{\text{э}}},$$

где $\Phi_{\text{ш}}(f_x)$ — спектральная плотность мощности шума на выходе приемника излучения; $K_{\text{э}}(f_x)$, $K_{\text{с.о}}(f_x)$ и $K_{\text{гл}}(f_x)$ — передаточные функции (частотные характеристики) электронного тракта, системы отображения, например дисплея, и глаза наблюдателя соответственно; $\text{sinc}(f_x / 2f'_{\text{т.о}}) = \sin(\pi f_x / 2f'_{\text{т.о}}) / (\pi f_x / 2f'_{\text{т.о}})$ — частотная характеристика, учитывающая узкополосную пространственную фильтрацию периодической структуры (мира), состоящей из прямоугольных полос с основной частотой $f'_{\text{т.о}}$, осуществляемую в зрительном аппарате наблюдателя, мрад^{-1} ; $f'_{\text{т.о}} = f_{\text{т.о}} V_x$ — частота, Гц. Соответствующая основной пространственной частоте мира $f_{\text{т.о}}$, мрад^{-1} ; V_x — частота сканирования по оси x , мрад/с ; $\Delta f_{\text{э}}$ — эквивалентная шумовая полоса всей системы, Гц.

Определение $\Delta T_{\text{разр}}$ обычно ведут по стандартной трех- или четырехполосной мире с прямоугольным законом изменения яркости по-

лос и отношением их высоты к ширине 7:1. Разность температур или яркостей штрихов миры должна обеспечивать необходимое для разрешения пороговое отношение сигнал/шум (обычно 2,0–2,5).

Для обеспечения 50% -ной вероятности распознавания штрихов такой миры требуемое отношение сигнал/шум иногда принимают равным 2,25. При этом и при $t_{\text{гл}} = 0,5$ с, $F_{\text{к}} = 30$ кадров/с

$$\Delta T_{\text{разр}} \approx 1,3\alpha_d f_x \Delta T_{\text{п}} / G_{\text{ОЭП}}(f_x),$$

где α_d — мгновенное угловое поле объектива по оси x (угловой размер чувствительной площадки приемника излучения).

Как правило, тепловизионная система должна решать задачу как обнаружения излучающего объекта, так и его распознавания. Типичный график зависимости вероятности выполнения этих задач от значений нормализованной пространственной частоты $f_p = s f_x / l_{\text{об}}$ приведен на рис. 4.4. Здесь s определяет размер объекта или его элемента, который необходимо разрешить, f_x — предельное значение пространственной частоты, при которой обеспечивается $\Delta T_{\text{разр}}$, $l_{\text{об}}$ — дальность обнаружения или распознавания объекта.

Определение дальности $l_{\text{об}}$ может быть первым этапом энергетического расчета тепловизионной системы. Для этого можно построить на одном графике (рис. 4.4) зависимость $\Delta T_{\text{разр}}$ в виде функции $l_{\text{об}}$, а также зависимость изменения сигнала $\Delta T_{\text{вх}}$ — абсолютного температурного контраста на входе ОЭП от дальности $l_{\text{об}}$ трассы в среде с коэффициентом ослабления α , т. е. функцию вида: $\Delta T_{\text{вх}} = \Delta T_{\text{об}} \exp(-\alpha l)$, где $\Delta T_{\text{об}}$ — перепад температур между объектом и фоном или перепад температуры между различаемыми элементами объекта (абсолютный температурный контраст). Пересечение графиков этих зависимостей дает точку, определяющую $l_{\text{об}}$.

Основная трудность расчета на этом этапе связана с определением частотной характеристики $G_{\text{ОЭП}}(f_x)$ всего комплекса, входящей в выражение для $\Delta T_{\text{разр}}(f_x)$. Часто пользуются линейным приближением, по-

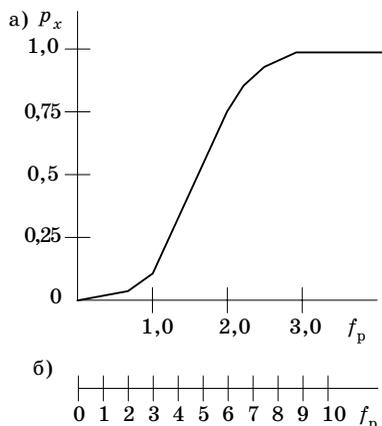


Рис. 4.4. График зависимости: а — вероятности обнаружения; б — распознавания от нормализованной пространственной частоты

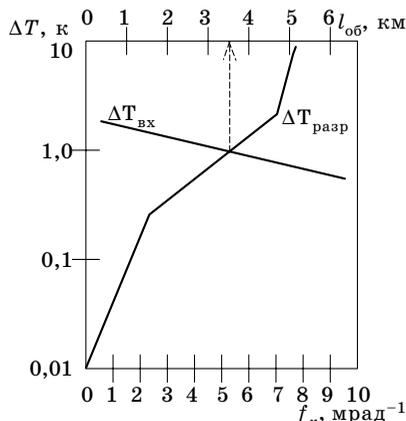


Рис. 4.5. К определению дальности обнаружения

лучая $G_{ОЭП}(f_x)$ как произведение частотных характеристик (передаточных функций) оптической системы, приемника излучения, электронного тракта, человека-наблюдателя и среды (атмосферы).

Следующим этапом расчета может быть определение основных габаритных параметров объектива тепловизионного ОЭП. Входящее в (4.15), а следовательно и в (4.16), значение относительного отверстия объектива D/f' может быть определено из этих формул для значения пространственной частоты f_x , соответствующей $l_{об}$ (рис. 4.5).

Для обеспечения требуемого качества изображения можно сравнить полученное из энергетического расчета значение D/f' со значением относительного отверстия, рассчитанным по следующей упрощенной методике.

Минимальный угловой размер $\Delta\beta_{min}$, который должен разрешать объектив, определяется размером s объекта или его элемента и дальностью $l_{об}$, т. е.

$$\Delta\beta_{min} \leq s/l_{об}. \quad (4.17)$$

Определяя предел углового разрешения объектива как

$$\Delta\beta_p = 2,44\lambda k_{аб}/D, \quad (4.18)$$

где λ — граничная (наибольшая) длина волны в рабочем спектральном диапазоне; $k_{аб}$ — коэффициент, учитывающий наличие aberrаций в системе ($k_{аб} > 1$), и решая совместно последние два уравнения при условии $\Delta\beta_{min} \geq \Delta\beta_p$, получим

$$D \geq \frac{2,44\lambda k_{аб} l_{об}}{8}. \quad (4.19)$$

Если задаться размером элемента чувствительного слоя приемника $d_{п.и}$ в качестве элемента разрешения, т. е. считать, что

$$\Delta\beta_{min} = d_{п.и}/f',$$

где f' — фокусное расстояние объектива, то вместо последней формулы (4.19) с учетом (4.17) можно записать

$$D \geq \frac{2,44\lambda k_{аб} l_{об.}}{d_{п.и}}$$

Отсюда с учетом принимаемого обычно ограничения $D/f' \leq 1$ получим

$$1 \geq \frac{D}{f'} \geq \frac{2,44\lambda k_{аб}}{d_{п.и}}$$

Энергетический расчет автоколлиматора

Рассмотрим пример энергетического расчета автоколлиматора, предназначенного для измерения угловых разворотов отражателя в одной плоскости (рис. 4.6) и работающего в лабораторных или цеховых условиях. Предположим, что необходимо определить требуемую яркость источника излучения для этого прибора, если выбранный приемник излучения имеет порог чувствительности $\Phi_{п}$.

Поток излучения, выходящий из объектива автоколлиматора, может быть найден по формуле

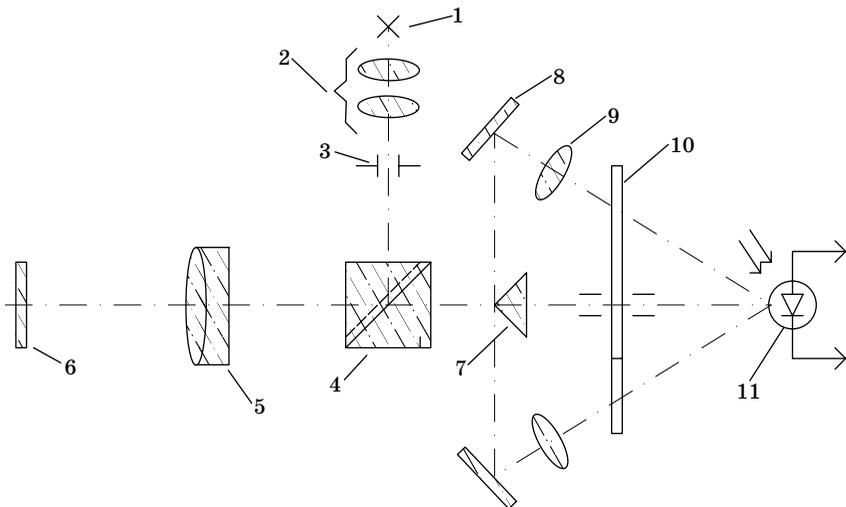


Рис. 4.6. Схема фотоэлектрического автоколлимационного угломера: 1 — источник излучения; 2 — конденсатор; 3 — марка-щель; 4 — светоделительный кубик; 5 — объектив; 6 — отражатель; 7 — призма-анализатор; 8 — зеркало; 9 — конденсатор; 10 — модулирующий диск; 11 — фотоприемник

$$\Phi = \pi \tau A L \sin^2 \sigma',$$

где τ — коэффициент пропускания проекционного канала автоколлиматора; A — площадь марки-щели; L — яркость излучения в плоскости марки; σ' — апертурный угол объектива в пространстве изображений.

Яркость излучения в плоскости марки-щели определяется выражением

$$L = L_{\text{изл}} \tau_{\text{к}},$$

где $L_{\text{изл}}$ — яркость источника излучения; $\tau_{\text{к}}$ — коэффициент пропускания конденсатора 2.

Таким образом,

$$\Phi = \pi \tau_{\text{к}} A L_{\text{изл}} \sin^2 \sigma'.$$

Поток излучения, выходящий из объектива, попадает на отражатель 6 и возвращается затем к объективу 5, который формирует в фокальной плоскости приемного канала автоколлимационное изображение марки-щели. Так как из-за конечных размеров щели пучок лучей на выходе объектива обладает расходимостью, а размеры отражателя, как правило, меньше размеров сечения пучка, в системе имеются дополнительные потери энергии.

Помимо этого, часть энергии может теряться из-за виньетирования отраженного пучка на входном зрачке объектива автоколлиматора при повороте отражателя. Очевидно также, что часть энергии будет потеряна при прохождении оптических компонентов приемного канала автоколлиматора.

Потери энергии за счет влияния среды сказываются обычно лишь при работе автоколлиматоров на большие расстояния, в полевых условиях, и в нашем случае ими можно пренебречь.

С учетом сказанного поток излучения, приходящий в плоскость изображения, будет определяться выражением

$$\Phi' = \pi \tau_{\text{к}} \tau^* \tau_{\text{р}} \tau_{\text{в}} A L_{\text{изл}} \sin^2 \sigma', \quad (4.20)$$

где τ^* — коэффициент пропускания приемного канала автоколлиматора; $\tau_{\text{р}}$ — коэффициент, учитывающий потери за счет расходимости пучка лучей; $\tau_{\text{в}}$ — коэффициент, учитывающий потери из-за виньетирования пучка на входном зрачке объектива.

Величину $\tau_{\text{р}}$ при условии равномерного распределения потока в пределах угла расходимости пучка лучей на выходе объектива 5 можно найти по формуле

$$\tau_p = \frac{xy}{XY},$$

где x и y — размеры отражающей поверхности в плоскости, перпендикулярной оптической оси автоколлиматора; X и Y — размеры сечения пучка лучей в той же плоскости (рис. 4.7).

Если пренебречь влиянием aberrаций объектива, что вполне допустимо, так как в автоколлиматорах обычно используются высококачественные объективы, значения X и Y можно найти из геометрических соотношений в соответствии с рис. 4.7, где направление хода лучей от объектива к отражателю в отличие от рис. 4.6 принято слева направо, а отражатель условно показан в виде зеркала с размерами x и y

$$X = D + \frac{dl}{f'_{06}} Y = D + \frac{cl}{f'_{06}},$$

где d и c — размеры марки-щели \mathcal{Z} (рис. 4.5), установленной в проекционном канале автоколлиматора; f'_{06} — фокусное расстояние объектива автоколлиматора; l — удаление отражателя от объектива; D — световой диаметр объектива.

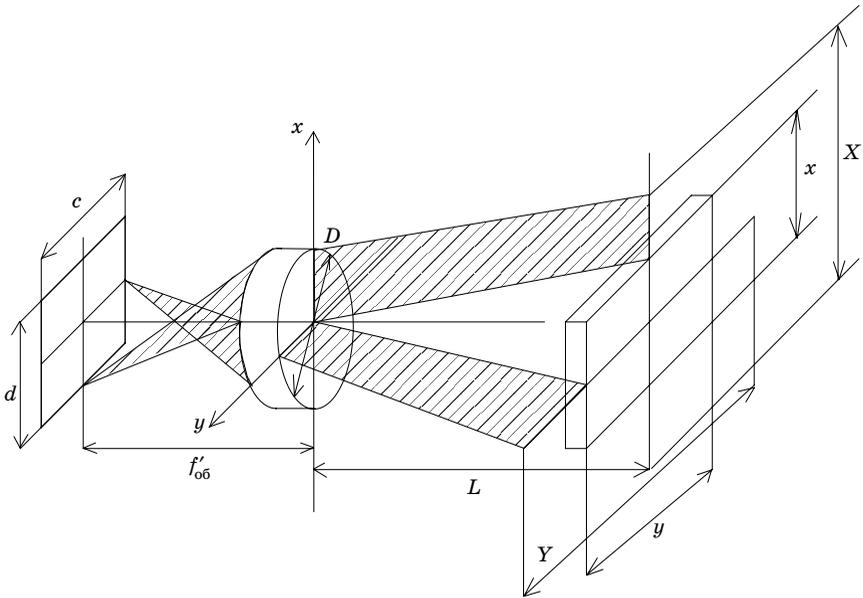


Рис. 4.7. Схема формирования расходящихся пучков в проекционном канале автоколлиматора

Коэффициент τ_B определяется для максимального угла разворота отражателя в том случае, если часть отраженного пучка находится за пределами светового диаметра объектива. В соответствии с рис. 4.8 величина может быть с достаточной для практики точностью оценена по формуле

$$\tau_B \approx \frac{b}{Y'} = \frac{Y'/2 - 2\alpha l / \rho' + D/2}{Y'}$$

где b — перекрытие отраженного светового пучка и светового диаметра объектива; $Y' = y + cl/f'_{об}$ — размер сечения отраженного пучка в плоскости разворота отражателя в месте расположения объектива автоколлиматора; α — угол разворота отражателя; $\rho' = 43438'$.

Если отраженные пучки не выходят за пределы входного зрачка объектива, то $\tau_B = 1$. Коэффициент пропускания оптических компонентов прибора, работающего в видимом диапазоне оптического спектра, приближенно может быть определен по формуле

$$\tau_0 = \tau \tau^* \tau_K = 0,96^{N_K} \cdot 0,94^{N_\Phi} \cdot 0,99^{N_n} \cdot 0,99^d \cdot 0,9^{N_c} \cdot 0,85^{N_a} \cdot 0,5^{N_\lambda}$$

где N_K — число непросветленных поверхностей «воздух-крон»; N_Φ — число непросветленных поверхностей «воздух-флинт»; N_n — число просветленных поверхностей; d — суммарная длина хода осевого луча в стекле оптических деталей, см; N_c — число посеребренных поверх-

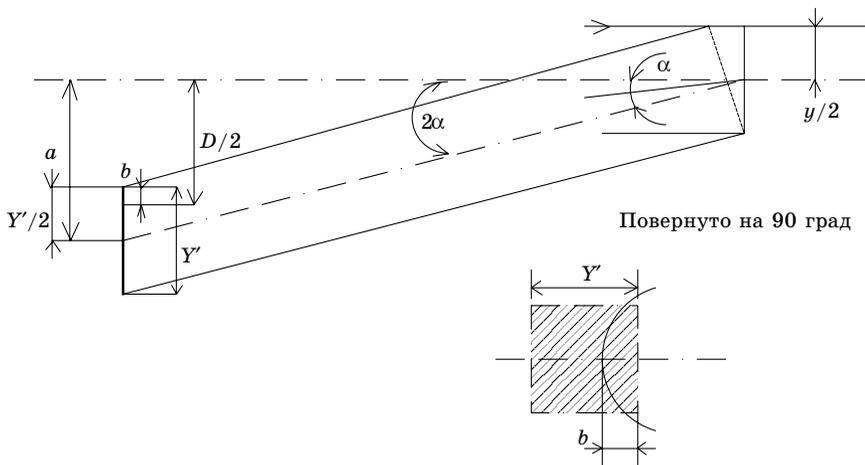


Рис. 4.8. Схема формирования отраженных пучков в плоскости входного зрачка автоколлиматора

ностей; N_a — число алюминированных отражающих деталей; N_d — число светоделительных поверхностей с коэффициентом пропускания каждой 0,5.

Вычисление коэффициента пропускания τ_0 удобно проводить, пользуясь типовой таблицей по формуле (пример табл. 4.1)

$$\tau_0 = \prod_{i=1}^n \tau_{ni} \tau_{pi}.$$

В фокальной плоскости приемного канала автоколлиматора установлен анализатор изображения, при помощи которого может быть определено смещение автоколлимационного изображения с оптической оси и, таким образом, угловой разворот отражателя. Анализатор изображения может быть охарактеризован относительной чувствительностью (погрешностью), которая определяется выражением

$$K_a \approx \Delta\alpha / \alpha_d,$$

где $\Delta\alpha$ — погрешность измерения углового рассогласования; α_d — линейный диапазон статической характеристики преобразования анализатора.

Если анализатор изображения выбран, т. е. известно значение K_a , а также требуемое отношение сигнал/шум μ , значение потока излучения в плоскости анализа Φ_a может быть определено по формуле

$$\Phi_a = \Phi_n \mu K_a.$$

Таблица 4.1. Вычисление коэффициента пропускания оптических компонентов ОЭП

№ позиции деталей на оптической схеме	Наименование детали	Марка стекла	Число поверхностей (в том числе просветленных)	Длина хода луча в стекле, см	Коэффициент пропускания стекла, τ_n	Коэффициент пропускания за счет отражения на границах «стекло-воздух», τ_p
1	Линза	К8	2	1,2	0,99	$0,96 \times 0,96$
2	Линза	Ф-1	2(2)	0,9	0,99	$0,99 \times 0,99$
3	Призма	БК-10	2(2)	5,2	0,99	$0,99 \times 0,99 \times 0,96$
...						
...						
...						

Так как $\Phi_a = \Phi'$, то следовательно с учетом (4.20)

$$\pi\tau_0\tau_p\tau_bAL_{\text{изл}}\sin^2\sigma' = \Phi_{\text{п}}\mu/K_a.$$

Отсюда следует

$$L_{\text{изл}} = \frac{\Phi_{\text{п}}\mu}{\pi\tau_0\tau_p\tau_bK_aA\sin^2\sigma'}.$$

4.2. Особенности габаритного расчета приемных оптических систем оптико-электронных приборов

В подразд. 4.1 были рассмотрены достаточно общие методики энергетических расчетов. Одной из основных целей расчетов такого рода является получение исходных данных для проведения габаритных расчетов оптической системы прибора. Поскольку в своих основных положениях методики габаритных (как и абберационных) расчетов остаются общими для оптических и оптико-электронных приборов самого различного назначения и подробно изучаются в соответствующих учебных курсах, здесь рассмотрим лишь некоторые особенности расчета приемных оптических систем ОЭП.

Как было показано, площадь входного зрачка $A_{\text{вх}}$ или его диаметр D могут быть найдены из энергетического расчета. Составив рабочее (основное энергетическое) уравнение ОЭП и представив входящие в него величины в виде функций конструктивных параметров, в том числе $A_{\text{вх}}$ или D , из решения этого уравнения можно найти их значения. Например, при работе ОЭП по точечному излучателю без учета фона и помех минимальное значение диаметра входного зрачка можно получить с помощью формулы

$$D_{\text{min}} = 2l \sqrt{\mu_{\text{ф}}\Phi_{\text{п. ОЭП}} / \left(\pi \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_c(\lambda)I(\lambda)d\lambda \right)},$$

где l — дальность до излучающего объекта; $\mu_{\text{ф}}$ — требуемое отношение сигнал/шум на входе прибора; $\Phi_{\text{п. ОЭП}}$ — порог чувствительности прибора; $\tau_c(\lambda)$ спектральное пропускание среды; $I(\lambda)$ — спектральная плотность силы излучения объекта. Если рабочее уравнение решается относительно другого параметра системы, то диаметр D может быть выбран, например из конструктивных соображений. В процессе энергетического расчета значение D может корректироваться.

При определении минимального значения фокусного расстояния объектива приемной системы часто исходят из того, что погрешность определения малого линейного перемещения Δx в плоскости изображения соответствует допустимой погрешности измерения (слежения, наведения) в угловой мере $\Delta\alpha$, т. е. $\Delta\alpha \geq \Delta x \rho / f'_{об\ min}$, откуда $f'_{об\ min} = \Delta x \rho / \Delta\alpha$. Значения Δx и $\Delta\alpha$ определяются возможностями выбранного типа анализатора.

С учетом того, что Δx для анализаторов различных типов имеет значение от десятых долей до единиц микрометра, объективы таких систем, как правило, должны быть длиннофокусными. Например, при $\Delta x = 1$ мкм и $\Delta\alpha = 0,5''$ в соответствии с формулой $f'_{об\ min} = \Delta x \rho / \Delta\alpha$ имеем $f'_{об\ min} = 400$ мм. Вместе с тем, как известно, любой анализатор характеризуется относительной погрешностью измерения $\delta = \Delta\alpha / \alpha$, причем для многих анализаторов δ изменяется в пределах $1/200 - 1/2000$. Приняв $K_d = 1/\delta$, получим, что диапазон измеряемых рассогласований $\alpha = K_d \Delta\alpha$, где $K_d = 200 - 2000$. Если $K_d = 1000$, то для нашего случая $\alpha \leq 500'' \approx 8,4'$.

Диапазон измеряемых рассогласований может быть увеличен за счет использования компенсаторов. Для наиболее точных компенсаторов — $K_d \leq 5000$.

Угловое поле приемной системы ОЭП может быть задано ТЗ на прибор. Оно также может быть рассчитано на основании анализа энергетических соотношений между полезным сигналом и помехами. Невозможность обеспечить требуемые энергетические соотношения в заданном угловом поле $2\omega_{обз}$ (поле обзора) приводит к необходимости его сканирования меньшим полем (мгновенным полем оптической системы $2\omega_M$).

Из изложенного видно, что угловое поле высокоточного ОЭП, как правило, невелико.

В некоторых случаях угловое поле будет определяться размерами чувствительной площадки приемника излучения, если последний устанавливается в плоскости изображения или вблизи нее (рис. 4.9, а). При этом размеры углового поля по различным направлениям могут быть неодинаковыми (например, по вертикали и горизонтали). Это может потребовать уточнения фокусного расстояния, если угловое поле задано, либо уточнения углового поля, если фокусное расстояние изменять нельзя, с помощью формулы $2l_{ч.п} = 2f'_{об} \operatorname{tg} \omega$, где $2l_{ч.п}$ — размер чувствительной площадки.

Определив $f'_{об}$, D и 2ω , необходимо выбрать тип объектива, который целесообразно использовать в данном случае, и уточнить реальные значения этих параметров с учетом получаемого диафрагменно-го числа объектива $f'_{об}/D$.

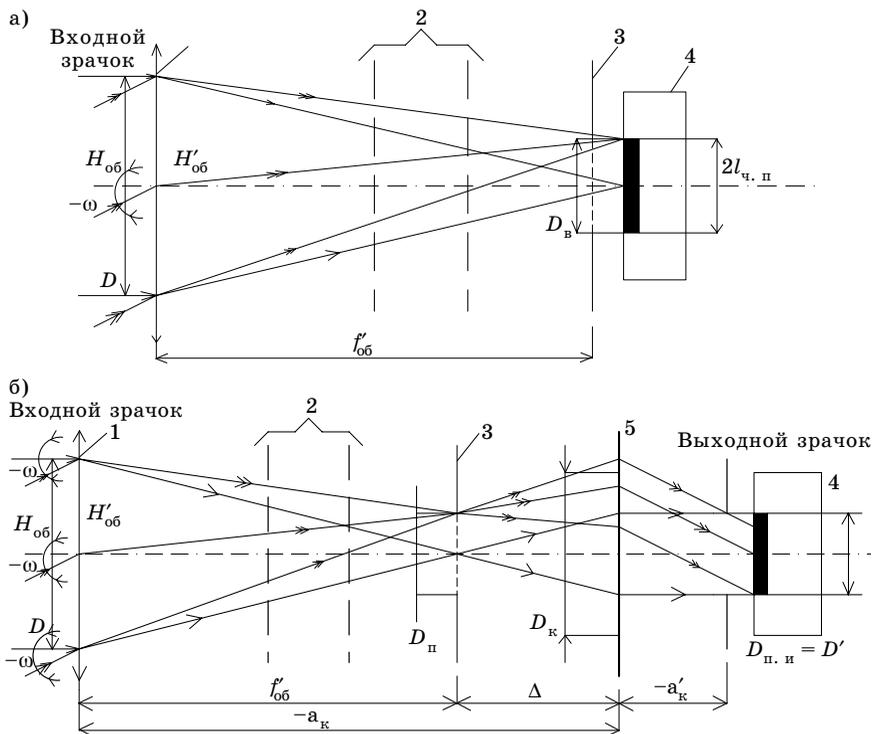


Рис. 4.9. Схема приемной оптической системы с приемником излучения: 1 — объектив; 2 — зона расположения дополнительных оптических элементов; 3 — полевая диафрагма; 4 — приемник излучения; 5 — конденсатор

Здесь необходимо иметь в виду, что необходимость обеспечения большого относительного отверстия объектива приводит к трудностям исправления aberrаций и, как следствие, усложнению конструктивной схемы объектива. То же самое можно сказать и об увеличении углового поля.

Усложнение конструкции объектива связано с увеличением числа компонентов и ухудшением его пропускания. Поэтому иногда имеет смысл несколько увеличить фокусное расстояние объектива или за счет корректировки параметров, входящих в рабочее уравнение ОЭП, несколько уменьшив диаметр входного зрачка. Увеличение фокусного расстояния не должно увеличивать общие габаритные размеры ОЭП. Это послужило одной из причин достаточно широкого использования в ОЭП зеркальных и зеркально-линзовых объективов или телеобъективов.

После уточнения $f'_{об}$, D и 2ω обычно проводят расчет габаритных параметров других элементов оптической системы, прежде всего — размеров полевой диафрагмы. Если полевая диафрагма круглая, то ее диаметр находят по формуле $D_{п} = 2f'_{об} \operatorname{tg} \omega \approx 2f'_{об} \omega / \rho$.

Для схемы представленной на рисунке 4.9, б, проводится расчет параметров конденсатора. Как уже указывалось выше, диаметр D' выходного зрачка оптической системы должен соответствовать диаметру чувствительной площадки приемника $D_{п.и}$. Поэтому увеличение конденсатора в соответствии с рис. 4.8, б можно найти по формуле

$$\beta_{к} = -D'/D = -a'_к/a_{к}.$$

Из простых геометрических соотношений (рис. 4.9, б) и с учетом формулы Гаусса $1/a'_к - 1/a_{к} = 1/f'_к$ получим

$$a'_к = a_{к} f'_к / (a_{к} + f'_к),$$

где $a_{к} = -(f'_{об} + \Delta)$; $f'_к$ — фокусное расстояние конденсатора.

Следовательно, $\beta_{к} = -f'_к / (f'_{об} - f'_к + \Delta)$. Расстояние между плоскостью изображения и конденсатором обычно выбирают из конструктивных соображений. При этом необходимо соблюдать условие $f'_к \leq \Delta$, так как при $f'_к > \Delta$ пучок на выходе конденсатора расширяется, что противоречит самому смыслу применения конденсатора.

Фокусное расстояние конденсатора $f'_к = D'(f'_{об} + \Delta) / (D + D')$.

Диаметр конденсатора:

$$D_{к} = 2 \left(\frac{D_{п}}{2} + \Delta \frac{D_{п} + D}{2f'_{об}} \right) = 2(f'_{об} + \Delta) \operatorname{tg} \omega + \Delta \frac{D}{f'_{об}}.$$

Для телецентрического хода лучей $\Delta = f'_к$ и

$$D' = D f'_к / f'_{об}; \quad a'_к = f'_к (f'_{об} + f'_к); \quad f'_к = f'_{об} D_{п.и} / D.$$

Угол охвата конденсатора в пространстве изображения:

$$2\sigma'_к = 2 \operatorname{arctg} \frac{D_{к}}{2a'_к} = 2 \operatorname{arctg} \left[\frac{D_{к}}{f'_к} \left(1 - \frac{f'_к}{f'_{об} + \Delta} \right) \right].$$

Определив $\beta_{к}$ и $2\sigma'_к$, можно выбрать схему конденсатора и провести расчет конструктивных параметров его компонентов по любой из общепринятых методик.

При расчете угла охвата конденсатора следует учитывать угловую характеристику чувствительности приемника излучения, т. е. зависимость чувствительности от угла падения лучей на площадку при-

емника. У многих приемников излучения чувствительность заметно падает при увеличении этого угла, в связи с чем может возникнуть необходимость вместо конденсаторов или совместно с ними использовать иммерсионные приемники излучения или волоконно-оптические элементы.

Расчет габаритных параметров других элементов, которые могут входить в состав приемной оптической системы (призм, зеркал, оптических элементов компенсаторов, светофильтров и др.), выполняется на основе построения световых трубок и расчета геометрических размеров этих элементов при условии отсутствия виньетирования. При этом для движущихся элементов расчет световых размеров проводится при тех положениях, в которых их габаритные размеры являются наибольшими.

Если в приемной оптической системе применяется модулятор, то выбор места его установки определяется прежде всего типом модулятора. Наиболее широко используемые механические модуляторы следует помещать в наиболее узких сечениях световых трубок. Часто модуляторы устанавливаются непосредственно в плоскости изображения, т. е. они служат одновременно и анализаторами. Однако в некоторых случаях требуется специальное перераспределение пучков излучения для установки модулятора, например в схеме с амплитудным анализатором изображения и поочередным пропусканием излучения на приемник излучения.

Для повышения помехозащищенности в ОЭП могут применяться бленды, обеспечивающие уменьшение или устранение влияния рассеянного излучения, возникающего при наличии источников боковых помех, находящихся за пределами углового поля прибора.

4.3. Расчет и выбор динамических параметров оптико-электронных приборов

Сравнительная оценка и выбор вида модуляции оптического сигнала

К числу важнейших динамических параметров ОЭП относятся:

— частота выдачи информации о наблюдаемом или контролируемом поле объектов или отдельном объекте, в качестве которой может выступать частота сигналов управления f_y в оптико-электронных следящих системах или частота сканирования f_c просматриваемого поля — величина, обратная периоду сканирования $T_c = 1/f_c$;

- частота модуляции полезного сигнала;
- полоса пропускания электронного тракта.

Динамические параметры могут быть определены или выбраны с учетом требований ТЗ, условий работы ОЭП и ряда других факторов. Часто их можно рассчитать или определить по известным частотным, импульсным и переходным характеристикам всего ОЭП или отдельных его звеньев, а также по известным спектрам полезного сигнала, шумов и помех. Во многом эти параметры ОЭП зависят от выбранного вида обработки сигнала, в первую очередь, от вида его модуляции.

Модуляция сигнала в ОЭП позволяет выделить его из смеси сигнала с шумами и помехами. В ряде ОЭП модуляция предназначена для кодирования полезной информации об измеряемых или отслеживаемых параметрах объекта.

Выбор вида модуляции определяется, прежде всего, ее назначением. Если, например, необходимо лишь обнаружить источник полезного сигнала на фоне помех, то при активном методе работы ОЭП часто можно использовать однократную амплитудную модуляцию полезного сигнала с частотой, заметно отличающейся от частот гармоник сигнала помех. Однако при такой модуляции амплитуда сигнала зависит от изменений яркости источника, пропускания среды, чувствительности приемника и других «амплитудных» параметров системы. Для компенсации этих изменений нужно усложнять систему, например, вводя в ее состав цепь автоматической регулировки яркости излучателя или автоматическую регулировку усиления (АРУ) в приемном тракте. Но если по изменению амплитуды сигнала требуется определить параметры источника, например его координаты, ввод АРУ или других подобных средств для системы с однократной амплитудной модуляцией недопустим.

Поэтому в таких случаях часто приходится применять двухкратную амплитудную или частотную модуляцию, где модуляция на несущей частоте f_n служит для фильтрации полезного сигнала от шумов и помех, а модуляция на частоте управления f_y (на огибающей частоте, частоте сканирования) используется для определения параметров (например, координат) источника сигнала. При этом по сравнению с однократной амплитудной модуляцией увеличивается ширина спектра сигнала. Используя не весь спектр полезного сигнала, а лишь его часть, мы, естественно, теряем энергию сигнала. Эти потери зависят от вида модуляции и полосы пропускания системы. Решая рабочее уравнение ОЭП относительно коэффициента k_M , учитывая эти потери, можно ориентировочно установить требуемое

значение этого коэффициента, после чего выбрать соответствующий ему вид модуляции. Аналогично может быть рассчитана полоса пропускания электронного тракта $\Delta f = \Delta f_0$ или рациональное сочетание k_m и Δf . Основная трудность здесь состоит в неопределенности (незнания на первом этапе расчета) ряда параметров и факторов, определяющих вид энергетического уравнения.

Наиболее сложной является задача выбора вида модуляции в случае работы ОЭП пассивным методом. В ОЭП с узким полем зрения, где в качестве модулятора используется растр, который одновременно служит и анализатором, при пассивном методе работы часто используют узкополосную модуляцию — амплитудную (АМ) или амплитудно-импульсную (АИМ) с малой скважностью импульсов. Это обусловлено тем, что при небольших размерах углового поля можно использовать растр с достаточно однородной структурой по полю (например, шахматный), так как при малом угловом поле качества изображения незначительно изменяется в пределах этого поля и достаточно оптимальное согласование размеров изображения излучателя и рисунка раstra достигается для всех зон поля (т. е. раstra).

В растрах, используемых при создании частотно-модулированных сигналов, труднее обеспечить условие оптимальной пространственной фильтрации, т. е. хотя бы в первом приближении достичь равенства размера изображения источника и ячейки раstra по всему полю.

Если по условиям работы ОЭП приходится сканировать широкое поле обзора для обнаружения малоразмерного излучателя или слежения за ним, то по условиям оптимальной фильтрации полезного сигнала обычно применяют анализаторы, создающие импульсы большой скважности. При такой времяимпульсной (ВИМ) или частотной модуляции (ЧМ) сигнал имеет гораздо более широкий спектр, чем в системах с узким полем зрения. Требования к полосе пропускания ОЭП имеют определяющее значение, особенно при выборе времяимпульсной модуляции. Полосу пропускания при ВИМ и ЧМ стремятся, с одной стороны, расширить с целью увеличить k_m за счет пропускания большего числа гармоник в спектре полезного сигнала, а с другой — сузить, чтобы уменьшить мощность шумов. Увеличение полосы пропускания вследствие широкого спектра сигнала является главным недостатком систем с ВИМ. В то же время важно отметить такие их достоинства, как возможность использования пространственной фильтрации, снижение уровня фоновой засветки на приемнике излучения, возможность использования методов фильтрации импульсных сигналов, принятых в электронике.

Следует учитывать, что в конструктивном и технологическом отношении растры, используемые в системах ЧМ, сложнее, чем растры для систем с АМ. В системах с ЧМ трудно совместить функции модулятора и пространственного фильтра в одном растре, что часто удается для систем с АМ, АИМ и ВИМ.

При значительных входных сигналах в ОЭП с ЧМ и ВИМ можно получить большее отношение сигнал/шум на выходе прибора, чем в системах с АМ. Однако при малых сигналах и использовании большого «разноса» несущей и управляющей частот (высокая несущая f_n и низкая управляющая f_y) лучшую пороговую чувствительность можно получить при АМ.

Для ОЭП, работающих активным методом, большинство из приведенных выше положений действительно. В таких приборах легче обеспечить требуемое отношение сигнал/шум, поэтому здесь часто применяется АМ как более простая с точки зрения ее осуществления в большинстве конструкций ОЭП.

В высокоточных измерительных ОЭП находит применение также фазовая (ФФМ) и поляризационная модуляция (модуляция по плоскости поляризации). При использовании модуляции этих видов, особенно ФМ, удастся исключить или заметно ослабить влияние изменений амплитуды полезного сигнала на точность измерения или слежения вследствие действия ряда, трудно контролируемых факторов (изменения яркости источника и пропускания среды, нестабильности параметров ОЭП и других «амплитудных» факторов).

Выбор рабочих частот модуляции

На выбор рабочих частот модуляции оказывают влияние те же факторы, что и на выбор вида модуляции. Для принятого способа анализа углового поля прибора или способа его сканирования важно установить требования к частоте, с которой производится анализ или сканирование. Обычно эти требования содержатся в ТЗ на прибор или задаются динамикой всего измерительного или следящего комплекса, в который входит ОЭП.

Информация о пространственном положении наблюдаемого излучателя должна выдаваться ОЭП с частотой, отвечающей требованиям этого комплекса. При заданных угловом поле и скорости его просмотра (или угловой скорости перемещения линии визирования) в большинстве практических случаев можно определить необходимую частоту его просмотра, которая находится обычно в строгом со-

ответствии с частотой управления f_y . В простейшем случае, когда растр анализатора имеет один пространственный период (вращающийся полудиск, сканирующая щель), эти частоты равны. Для повышения всего комплекса целесообразно увеличивать f_y , при этом также уменьшается влияние низкочастотных внутренних шумов и помех, например виброшумов.

Если в ОЭП используется модуляция на несущей частоте f_n , то для увеличения отношения f_n/f_y , о чем будет сказано ниже, чрезмерное увеличение f_y нецелесообразно. Нежелательно увеличение f_y и по той причине, что ширина полосы пропускания по несущей Δf_n прямо пропорциональна f_y . Наконец, увеличение f_y часто приводит к снижению устойчивости работы ОЭП в динамическом режиме.

Применительно к сканирующим ОЭП значения частот сканирования f_c могут быть определены из энергетического расчета.

После выбора частоты управления разработчик может приступить к выбору несущей частоты f_n . Частота модуляции полезного сигнала всегда должна быть больше ширины полосы пропускания частот, которую он занимает. Иными словами, несущая частота f_n должна превышать ширину спектра сигнала. Одним из важнейших требований, которым должно удовлетворять выбираемое значение f_n , является обеспечение необходимого для качественной работы ОЭП «разноса» частот f_n и f_y , т. е. отношения $m = f_n/f_y$. Для ОЭП значение m , а следовательно, и значение f_n при выбранной или заданной частоте управления (сканирования) f_y зависит от ряда факторов.

В приборах и следящих системах, где важно обеспечить малые фазовые погрешности (например, в фазовых измерительных ОЭП или в ОЭП с амплитудно-фазовыми анализаторами типа вращающегося полудиска), необходимым значением m определяют с помощью их фазово-частотных характеристик. Это значение для ОЭП с ВИМ обычно находят из условия надежного формирования или правильного воспроизведения сигнала рассогласования, т. е. сигнала на частоте f_y и, как правило, достаточно выбрать $m = 5 - 6$.

В тех случаях, когда модуляция по несущей частоте используется для переноса спектра полезного сигнала в область частот, где составляющие спектров помех и шумов малы, для выбора f_n необходимо знать прежде всего эти спектры.

Как правило, спектры внешних фоновых помех при переходе к их временному представлению, т. е. к спектрам Хинчина—Винера на выходе приемника излучения, имеют явно выраженный низкочастотный характер. Внутренние шумы также имеют низкочастотный спектр. Поэтому целесообразно нижний предел значений f_n или ос-

новых гармоник в спектре модулированного полезного сигнала, например гармоники $f_n - f_y$ в спектре двухкратной АИМ при скважности импульсов $N = 2$, выбирать большим, чем те значения частот в спектре шума или те гармоники в спектре помехи, на которых мощность шумов или помех сравнима с мощностью полезного сигнала.

Угловое поле прибора определяет размер всего раstra модулятора, и от размера этого поля во многом зависит выбор частоты сканирования поля, т. е. частоты управления. Разрешающая способность оптической системы определяет минимально возможный размер элемента раstra, служащего для создания модуляции на несущей частоте в ОЭП с АМ.

Таким образом, соотношение между частотой управления f_y и несущей частотой f_n в системах с АМ зависит и от того, как много элементов (периодов) раstra размещается по всей его площади.

В ОЭП с ЧМ значение несущей f_n иногда выбирается таким, чтобы девиация этой частоты Δf_n заметно превышала частоту управления и сканирования f_y , т. е. $\Delta f_n \gg f_y$.

Максимальное значение частоты модуляции или верхней границы рабочего участка спектра модулированного полезного сигнала обычно ограничивается инерционностью приемника, а в системах с АМ и АИМ также размерами элемента раstra, т. е. разрешающей способностью оптической системы.

Выбор и расчет полосы пропускания электронного тракта

Определение полосы пропускания имеет очень большое значение при разработке ОЭП. Эта величина зависит от спектров полезного сигнала, шумов и помех, а также от требований, предъявляемых к динамике процессов обнаружения излучателя, слежения за ним или измерения его параметров, которые осуществляются с помощью ОЭП.

Ширину полосы пропускания Δf электронного тракта можно предварительно рассчитать исходя из рабочего уравнения ОЭП, например формулы (4.5) и (4.15). Сопоставляя полученное в результате такого расчета значение полосы со спектром сигнала, выбирают или проверяют правильность выбора вида модуляции и рабочих частот. Иногда эту полосу находят в соответствии с допустимым значением коэффициента потерь при модуляции k_m .

Для многих практических применений, когда критерием качества работы ОЭП является средняя квадратическая погрешность измерения или слежения, пользуются значением эквивалентной шумовой

полосы пропускания Δf_3 , которое рассчитывают, пользуясь формулами для средней квадратической погрешности σ , обусловленной внутренними шумами ОЭП со спектральной плотностью $\varphi_{\text{ш}}$, например

$$\sigma = \left[\varphi_{\text{ш}} / (2Q_c \Delta f_3^2) \right]^{1/2} \text{ или } \sigma = \sqrt{\varphi_{\text{ш}} \Delta f_3} / (K_1 K_3),$$

где Q_c — энергия сигнала; K_1 и K_3 — коэффициенты передачи системы первичной обработки информации и цепи обратной связи соответственно.

Для ряда ОЭП, например с времяимпульсным методом анализа поля изображений, ширину спектра сигнала, а следовательно, и необходимую полосу пропускания электронного тракта ориентировочно находят по отношению порога чувствительности по углу $\Delta\rho$ к размеру анализируемого (сканируемого) поля ρ , т. е. $\Delta f \approx f \Delta\rho / \rho$, где f — частота анализа (сканирования) поля размером ρ .

Еще одним из возможных путей расчета ширины полосы пропускания частот является получение верхнего ее предела из условия экстремума функции, определяющей критерий качества ОЭП. Например, представляя отношение сигнал/шум μ на выходе ОЭП можно продифференцировать полученное выражение по частоте f и найти из решения уравнения $d\mu/df = 0$ значение частоты, определяющей верхний предел f_2 полосы пропускания частот. Выбирая значение нижнего предела f_1 в соответствии с указанными выше рекомендациями, методом последовательного приближения можно найти оптимальное значение полосы пропускания $\Delta f = f_2 - f_1$.

В ряде случаев при выборе полосы пропускания необходимо учитывать нестабильность частот модуляции, вызываемую несовершенством отдельных элементов прибора, например нестабильностью частоты вращения или скорости сканирования раstra модулятора. Так, в системах с двукратной амплитудной модуляцией, когда основная энергия сигнала переносится на частотах $f_{\text{н}}$ и $f_{\text{н}} \pm f_{\text{у}}$, ширину полосы пропускания по несущей обычно выбирают несколько большей, чем $\Delta f = 2f_{\text{у}}$.

Ширина полосы пропускания по частоте управления или сканирования часто указывается в ТЗ на прибор. Она обратно пропорциональна постоянной времени ОЭП или времени просмотра поля обзора сканирующей системой или анализатором изображений, т. е. периоду сканирования. Как уже отмечалось, эту ширину полосы часто выбирают или рассчитывают из условий устойчивости следящей системы в динамическом режиме.

В системах с импульсной модуляцией, где спектр сигнала гораздо шире спектра сигнала при амплитудной модуляции, наиболее часто решаются две задачи: первая состоит в определении некоторого достаточно приближенного среднего положения импульса, т. е. положения излучателя в угловом поле прибора, вторая — в точном определении фронта импульса или его максимума, соответствующего координате излучателя. Первый случай свойственен оптико-электронным системам, предназначенным прежде всего для обнаружения излучателя, второй — точным измерительным системам.

Как уже отмечалось, произведение длительности импульса τ на ширину полосы частот Δf , занимаемой его спектром, — величина постоянная, т. е. $\tau\Delta f = k_{\Delta f} = \text{const}$. Для систем, где решается первая из указанных выше задач, для импульсов, форма которых близка к прямоугольной, $k_{\Delta f}$ часто принимается равным $\sim 0,5$, т. е. $\Delta f = 0,5/\tau$. Для высокоточных систем, где важна форма импульса, следует сохранить большое число гармоник его спектра, и значение, $k_{\Delta f}$ выбирают достаточно большим, например $k_{\Delta f} = 4$ и $\Delta f = 4/\tau$.

При использовании ЧМ ширина полосы пропускания Δf пропорциональна индексу модуляции β . Но значение β , в свою очередь, пропорционально размеру просматриваемого (анализируемого) поля, т. е. ширина полосы пропускания увеличивается по мере увеличения этого поля. Поэтому если в качестве исходного параметра задана полоса Δf , то приходится, соответственно, с этой полосой ограничивать поле обзора, например угловое поле сканирующей системы.

На практике под шириной спектра при ЧМ подразумевают полосу частот, ограниченную гармониками, амплитуды которых не превышают 1–10 % максимальной амплитуды спектра. Ширину спектра ЧМ при выбранной или заданной частоте сканирования или управления $f_c \ll \Delta f$ можно рассчитать по формуле

$$2\Delta f = 2\beta f_c, \quad (4.21)$$

где β — определяется порядком n функции Бесселя, описывающей предельную боковую n -ю гармонику сигнала, модулированного по частоте. С помощью таблиц функций Бесселя можно рассчитать порядок n , соответствующей выбранному допуску на амплитуды используемых гармоник. Если амплитуды гармоник превышают 10 % -ный уровень максимальной амплитуды спектра, то

$$n = 1,07\beta + 2, \quad (4.22)$$

при 1 % -ном допуске

$$n = 1,125\beta + 3. \quad (4.23)$$

Порядок n_m , соответствующий максимальной гармонике, определяется по формуле, предложенной А. М. Заездным: $n_m = 0,94\beta - 1$. Подставляя в (4.21) значения β из формул (4.22) или (4.23), можно получить необходимую ширину полосы пропускания. Например, для (4.22)

$$2\Delta f = 1,87f_c n - 3,744f_c. \quad (4.24)$$

В ряде систем с фазовой модуляцией ширина спектра зависит как от девиации фазы $\Delta\varphi$, так и от частоты f_c . Поэтому спектр сигнала в этих системах меняется почти в тех же пределах, что и частота f_c .

В некоторых измерительных и следящих ОЭП модуляция начальной фазы сигнала осуществляется за счет перемещения изображения излучателя относительно раstra модулятора. При этом ширина полосы частот Δf определяется скоростью этого перемещения и его диапазоном. Если скорость перемещения мала, то Δf также невелика и может определяться возможной паразитной девиацией несущей частоты, вызванной несовершенством модулятора или электронного тракта.

На выбор частоты импульсов и полосы пропускания импульсных ОЭП активного типа, предназначенных для определения координат удаленных движущихся объектов, оказывают влияние такие факторы, как конечное время распространения сигнала до объекта и обратно, движение объекта, необходимость получения несколько сигналов (импульсов) от объекта за один цикл измерений, диаграмма направленности передающей оптической системы, постоянная времени приемника излучения и ряд других.

При малой угловой скорости сканирования α по полю или при малой относительной угловой скорости движения объекта длительность импульса от объекта, соответствующая угловой ширине диаграммы направленности излучения θ , $\tau_{\text{и}} = \theta/\alpha$. Так как иногда скорость α бывает достаточно большой, то следует учитывать уменьшение $\tau_{\text{и}}$ вследствие запаздывания, связанного с прохождением излучения до объекта и обратно, т. е. $\tau_{\text{и}} = \theta/\alpha - 2l/c$, где l — расстояние до объекта; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Если известна угловая скорость объекта ω , то можно выбрать α так, чтобы за время одного цикла сканирования поля объект не сместился более чем на $1/n_0$ ширины диаграммы направленности θ , т. е.

$$(1/n_0)(\theta/\omega) \geq 2\omega_{\text{обз}}/\alpha,$$

где $2\omega_{\text{обз}}$ — угловое поле обзора. В предельном случае:

$$\tau_{\text{и}} = \theta^2 / (2n_0\omega\omega_{\text{обз}}) - 2l/c; \Delta f = k_{\Delta f} / \tau_{\text{и}}.$$

4.4. Точностные расчеты оптико-электронных приборов

Основные этапы точностных расчетов

Точностные расчеты ОЭП и их отдельных узлов можно разделить на две группы: проектные (точностный синтез) и проверочные (точностный анализ). Расчеты, относящиеся к первой группе, проводят в начале проектирования прибора. Они позволяют установить рациональную структуру ОЭП, а также некоторые исходные данные для назначения допусков на погрешности отдельных его узлов и элементов.

Одним из самых первых этапов точностного расчета, предшествующих первоначальному расчету допусков, может быть расчет потенциальной точности ОЭП, которая зависит лишь от вида полезного сигнала и внешних шумов и помех, имеющих место на входе ОЭП. Поскольку потенциальная точность не зависит от конструктивных, технологических и методических погрешностей, присущих реальному прибору, значение определяющей ее погрешности может быть тем пределом, к которому следует стремиться разработчику. Если значение этой погрешности превышает допуск, установленный ТЗ, то следует рассмотреть возможность изменения параметров полезного сигнала, уменьшения влияния внешних шумов и помех, а в ряде случаев и возможность изменения требований ТЗ.

На следующем этапе расчета целесообразны выбор модели общей погрешности и предварительное распределение ее значения между отдельными составляющими. Например, если методическая погрешность не зависит от конструкции прибора и параметров отдельных его элементов и может быть выбрана в соответствии с принципом действия ОЭП и достигнутыми на момент разработки знаниями об условиях его работы, а инструментальная погрешность может быть задана на основании опыта разработки аналогичных приборов, то для данной модели можно принять

$$\sigma_{dyy}^2 + \sigma_{ш}^2 = \sigma_{\Sigma}^2 - (\sigma_{м}^2 + \sigma_{и}^2).$$

Затем, представляя составляющие σ_{dyy}^2 и $\sigma_{ш}^2$ в виде функций параметров ОЭП и его звеньев, можно провести оптимизацию их параметров по минимуму сумму $\sigma_{dyy}^2 + \sigma_{ш}^2$. Зависимости σ_{dyy}^2 и $\sigma_{ш}^2$ от параметров ОЭП и основы методики такой оптимизации приведены в [2, 3]. В общем виде эта методика сводится к решению системы k уравнений, представляющих собой приравненные нулю частные про-

изводные функции $\sigma_{\text{дву}}^2 + \sigma_{\text{ш}}^2 = f(a_1, a_2, \dots, a_k)$ по каждому из k параметров a_1, a_2, \dots, a_k , например по площади входного зрачка, угловому полю, чувствительности приемника, коэффициенту усиления электронного тракта, полосе пропускания частот и другие примеры подобных расчетов содержатся в [2].

Иногда, учитывая тот факт, что в состав ОЭП включаются и типовые звенья с известными частотными характеристиками (передаточными функциями), на этом этапе проектирования можно выполнить отдельный расчет динамической погрешности. Методику такого расчета рассмотрим ниже.

Определив первоначальные значения (допуски) методической и динамической, а часто и шумовой составляющих общей погрешности, можно перейти к расчету допусков на первичные инструментальные погрешности отдельных узлов и элементов ОЭП. Здесь также вначале можно задаться некоторым распределением отдельных составляющих инструментальной погрешности, а затем выполнить проверочный расчет.

Влияние большего числа факторов эксплуатационного, конструктивного, технологического, экономического и другого характера, которые трудно или невозможно учесть на первых этапах разработки ОЭП, обычно не позволяет получить в результате упомянутых выше расчетов окончательные значения рациональных параметров ОЭП и допусков на эти значения. Поэтому после отдельных этапов точностного расчета проводят соответствующую корректировку (принципа и метода работы, структурной схемы прибора, элементной базы, допусков на первичные погрешности и т. д.), после которой обязателен проверочный расчет.

Достаточно общая схема отдельных этапов или всего точностного расчета, аналогичная приведенной в [1], имеет вид, приведенный на рис. 4.10.

Если точностный расчет проводится на начальной стадии проектирования, когда не выбрана окончательно структура прибора и невозможно определить его характеристику преобразования и передаточную функцию, приходится достаточно произвольно назначать допуски на погрешности отдельных узлов ОЭП. Эти допуски обычно включают в себя большинство составляющих общей погрешности, поэтому для их расчета можно использовать модели погрешностей, приведенные выше. После проведения точностных расчетов отдельных узлов нужно оценить общую погрешность всего прибора, а при необходимости перераспределить допуски на погрешность между отдельными узлами, между отдельными составляющими в принятых

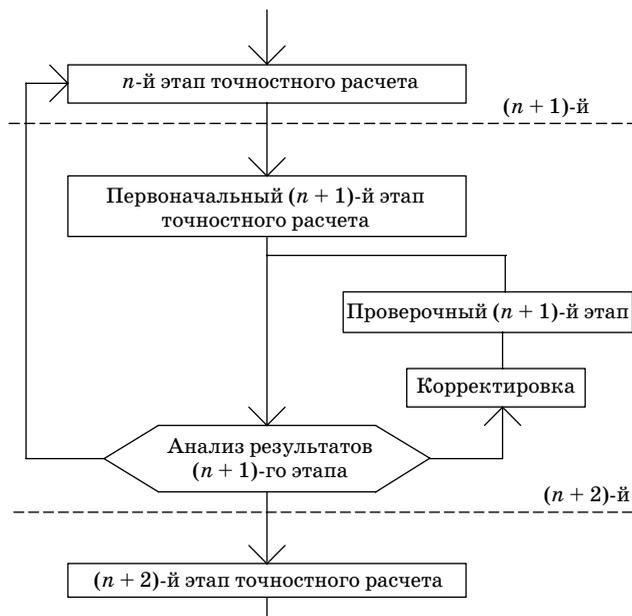


Рис. 4.10. *Схема алгоритма точностного расчета*

моделях погрешностей узлов и прибора в целом, т. е. продолжить итерационный процесс параметрического синтеза — определения рациональных параметров прибора, его узлов и деталей, исходя из требований к точности.

Расчет и минимизация динамической и шумовой погрешностей

Предельная точность многих современных ОЭП определяется в первую очередь, шумами, а также внутренними и особенно внешними помехами, которые носят ярко выраженный случайный характер. Это объясняется как совершенствованием элементной базы современных ОЭП и развитием методов их расчета и конструирования, так и усложнением условий, в которых приходится работать многим ОЭП. Типичными примерами ОЭП подобного рода являются оптико-электронные угломеры (пеленгаторы) и дальномеры (локаторы), работающие в сложных атмосферных условиях, вызывающих мерцание и дрожание изображений, или при наличии случайных изменений пространственного положения (по углу и по дальности) отслеживаемого объекта.

Другой заметной составляющей общей погрешности многих ОЭП является динамическая погрешность. Расчет динамической погрешности ОЭП может быть проведен, если известны передаточные функции (частотные характеристики) отдельных звеньев его структурной схемы, а следовательно, и прибора в целом.

В общем случае спектральная плотность динамической погрешности воспроизведения некоторого входного сигнала со спектром $X(j\omega)$ на выходе линейной системы с частотной характеристикой $G_s(j\omega)$ определяется как

$$\Delta_{\text{д. вых}}(j\omega) = [G_s(j\omega) - 1]X(j\omega).$$

Эта же погрешность, приведенная ко входу, будет

$$\Delta_{\text{д. вх}}(j\omega) = [G_s(j\omega) / K_{\text{общ}} - 1]X(j\omega),$$

где $K_{\text{общ}}$ — статистический общий коэффициент преобразования системы (при $\omega = 0$).

Если входное рассогласование (измеряемая величина) является стационарным центрированным случайным процессом со спектральной плотностью $S(\omega)$, то математическое ожидание динамической погрешности равно нулю, а ее дисперсия

$$D[\Delta_{\text{д}}] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |G_s(j\omega) / K_{\text{общ}} - 1|^2 S(\omega) d\omega.$$

Если входное рассогласование является мгновенным значением гармонического сигнала $A_{\text{м}} e^{j\omega t}$, то динамическая погрешность измерения этого значения

$$\Delta_{\text{д}}(t) = |G_s(j\omega) / K_{\text{общ}} - 1| A_{\text{м}} e^{j\omega t},$$

ее математическое ожидание равно нулю, а дисперсия

$$D[\Delta_{\text{д}}] = \left(A_{\text{м}}^2 / 2 \right) |G_s(j\omega) / K_{\text{общ}} - 1|^2.$$

Рассмотрим в качестве примера достаточно типичную для многих ОЭП структурную схему системы автоматического слежения (сопровождения) по углу α (направлению), показанную на рис. 4.11. Определим выражение для минимального значения дисперсии случайной погрешности слежения, складывающейся из шумовой и динамической составляющих, а также условия ее минимизации и соответствующее этим условиям значение общего коэффициента передачи $K_{\text{общ}}$ (добротности по скорости) системы.

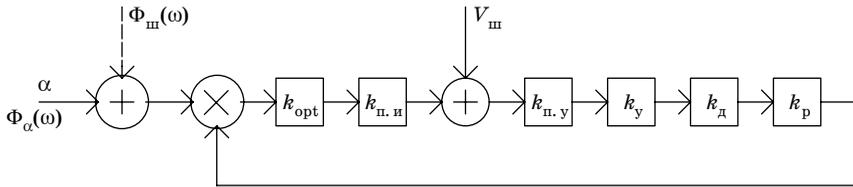


Рис. 4.11. Структурная схема ОЭП автоматического слежения (спро-
вождения) по углу

Общий коэффициент передачи $K_{общ}$ находим как произведение коэффициентов передачи отдельных звеньев, а именно: оптической системы с анализатором, приемника излучения, предусилителя, которые можно представить в виде безынерционных (постоянные времени этих звеньев гораздо меньше постоянных времени последующих узлов ОЭП) с коэффициентами передачи k_{opt} , $k_{п.и}$, $k_{п.у}$, соответственно, образующих систему первичной обработки информации; усилителя мощности — аperiodического звена первого порядка с частотной характеристикой $K_y(j\omega) = k_y / (1 + j\omega T_y)$, где k_y — коэффициент усиления по напряжению; T_y — постоянная времени усилителя мощности; исполнительного устройства, содержащего двигатель — инерционное интегрирующее звено с частотной характеристикой $K_d(j\omega) = k_d [j\omega(1 + j\omega T_d)]$, где k_d — коэффициент передачи двигателя по скорости; T_d — электромеханическая постоянная времени двигателя и редуктора с коэффициентом передачи $k_p = 1/i$, где i — передаточное отношение редуктора.

Таким образом, $K_{общ} = k_{opt} k_{п.и} k_{п.у} k_y k_d k_p$.

Основными составляющими общей погрешности в такой системе примем:

— динамическую погрешность от случайного входного сигнала — случайного изменения углового положения или угловой скорости наблюдаемого объекта, имеющего спектральную плотность мощности $\Phi_\alpha(\omega)$, приведенную ко входу ОЭП и измеряемую в радианах в квадрате на секунду в квадрате $[\text{рад}^2/\text{с}^2]$, и дисперсию $D_{d.п}$;

— погрешность, вызываемую шумами отдельных элементов ОЭП, в первую очередь, приемника излучения $V_{ш}$.

Обозначим приведенную ко входу ОЭП спектральную плотность мощность шумов через $\Phi_{ш}(\omega)$, а дисперсию через $D_{ш}$.

Дисперсия первой составляющей в такой системе определяется как

$$D_1 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi_\alpha(\omega) |H_{ом}(j\omega)|^2 d\omega,$$

где $H_{\text{ош}}(j\omega) = \frac{j\omega(1+j\omega T_y)(1+j\omega T_d)}{K_{\text{общ}} + j\omega + \omega^2(T_y + T_d) - j\omega^3 T_y T_d}$ — частотная характеристика замкнутой системы для погрешности по входному воздействию.

Дисперсия второй составляющей:

$$D_2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi_{\text{ш}}(\omega) |H_v(j\omega)|^2 d\omega,$$

где $H_v(j\omega) = K_{\text{общ}}(j\omega)/(1 + K_{\text{общ}}(j\omega))$ — частотная характеристика замкнутой системы, причем для нашего примера частотная характеристика разомкнутой системы

$$K_{\text{общ}}(j\omega) = k_{\text{опт}} k_{\text{п.и}} k_{\text{п.у}} \frac{k_y}{(1+j\omega T_y)} \frac{k_d}{j\omega(1+j\omega T_d)} k_p,$$

$$H_v(j\omega) = \frac{K_{\text{общ}}}{K_{\text{общ}} + j\omega + \omega^2(T_y + T_d) - j\omega^3 T_y T_d}.$$

Значение общего коэффициента передачи $K_{\text{общ}}$ должно быть меньше некоторого критического значения $K_{\text{общ.кр}}$, при котором замкнутая система теряет устойчивость, т. е. должно обеспечиваться условие $K_{\text{общ}} < 1/T_y + 1/T_d = K_{\text{общ.кр}}$.

Допуская на этом этапе проектирования, что всю разомкнутую систему можно представить в виде идеального интегрирующего звена с частотной характеристикой $K_{\text{общ}}(j\omega)/(j\omega)$, т. е. $T_y = T_d = 0$, дисперсия D_1 упрощенно можно представить в виде $D_1 = D_{d \text{ у.п}} / K_{\text{общ}}^2$.

Если приведенный ко входу внутренний шум является белым, т. е. $\Phi_{\text{ш}}(\omega) = \Phi_{\text{ш}} = \text{const}$, то дисперсия D_2 может быть представлена как

$$D_2 = \Phi_{\text{ш}} \Delta f = \Phi_{\text{ш}} \Delta f_{\text{и}} \left[1 - K_{\text{общ}} / K_{\text{общ.кр}} \right]^{-1},$$

где Δf — полоса пропускания реальной системы; $\Delta f_{\text{и}}$ — полоса пропускания идеализированной системы, которая меньше Δf вследствие наличия в системе апериодических звеньев; $\Delta f_{\text{и}} = K_{\text{общ}}/2$.

Полная дисперсия погрешности слежения

$$D_{\Sigma} = D_1 + D_2 \approx D_{d \text{ у.п}} / K_{\text{общ}}^2 + K_{\text{общ}} \Phi_{\text{ш}} / 2. \quad (4.25)$$

Для нахождения оптимального значения $K_{\text{общ.опт}}$ нужно продифференцировать (4.25) по $K_{\text{общ}}$ и приравнять производную нулю. Решая полученное уравнение вида

$$-D_{d_{y.п}} / K_{общ}^3 + \Phi_{ш} / 2 = 0,$$

получим $K_{общ\ opt} = \sqrt[3]{4D_{d_{y.п}} \Phi_{ш}^{-1}}$. При этом минимальное значение полной погрешности слежения

$$D_{\Sigma\ min} = 1,5 \sqrt[3]{\Phi_{ш}^2 D_{d_{y.п}} / 2}.$$

Аналогичен путь определения оптимального коэффициента передачи оптико-электронного следящего локатора — системы автоматического сопровождения по дальности l (рис. 4.12, а). В ее состав входят: приемопередающее устройство (безынерционное звено с коэффициентом передачи $k_{п.п}$); временной дискриминатор (апериодическое звено первого порядка) с частотной характеристикой $K_{в.д} = k_{в.д} (1 + j\omega T_{в.д})^{-1}$ и постоянной времени $T_{в.д}$; сглаживающий фильтр (интегратор) с частотной характеристикой $K_{сгл}(j\omega) = k_{сгл}(j\omega)$; исполнительное устройство (безынерционное звено с коэффициентом передачи $k_{и}$).

Пересчитанная ко входу внутренняя помеха может быть представлена в виде белого шума со спектральной плотностью $\Phi_{ш}$ ($\text{м}^2 \cdot \text{Гц}^{-1}$). Здесь также можно принять, что дисперсия динамической погрешности $D_1 = D_v / K_{общ}^2$, где D_n — дисперсия скорости движения наблюдаемого объекта, соответствующая спектру мощности скорости $\Phi_v(\omega)$.

Дисперсия погрешности от действия помех $D_2 = \Phi_{ш} K_{общ} / 2$. Суммарная дисперсия $D_{\Sigma} = D_1 + D_2 \approx D_v / K_{общ}^2 + 0,5 / (\Phi_{ш} K_{общ})$.

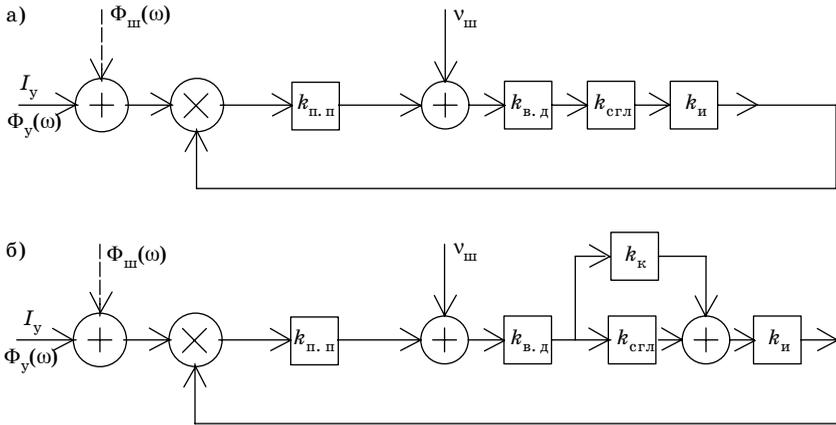


Рис. 4.12. Структурные схемы ОЭП автоматического сопровождения по дальности

Исследуя это выражение на минимум, получим, что он имеет место при $K_{\text{общ опт}} = \sqrt[3]{4D_{\text{в}}/\Phi_{\text{ш}}}$. Минимум дисперсии погрешности определения дальности

$$D_{\Sigma \text{ min}} = 1,5\sqrt[3]{D_{\text{в}}\Phi_{\text{ш}}^2/2}. \quad (4.26)$$

Иногда для уменьшения погрешности в систему автоматического сопровождения по дальности вводят второй интегратор, включаемый последовательно с первым и имеющим тот же коэффициент передачи $k_{\text{сгл}}$. Чтобы обеспечить устойчивую работу всей системы, параллельно первому интегратору включают безынерционное звено с коэффициентом передачи $k_{\text{к}}$ (рис. 4.12, б). Для обеспечения минимума полосы пропускания белого шума постоянная времени образующего при этом параллельного соединения двух звеньев $\tau = k_{\text{к}}/k_{\text{сгл}}$ должна быть равна $1/\sqrt{K'_{\text{общ}}}$, где общий коэффициент передачи (добротность по ускорению, с^{-2}) $K'_{\text{общ}} = k_{\text{п.п}}k_{\text{в.д}}k_{\text{сгл}}^2k_{\text{и}}$. При этом минимальное значение эквивалентной полосы пропускания белого шума

$$\Delta f_{\text{э min}} = 1/\tau = \sqrt{K'_{\text{общ}}},$$

а дисперсия погрешности, обусловленная шумами,

$$D_2 = \Phi_{\text{ш}}\Delta f_{\text{э min}} = \Phi_{\text{ш}}\sqrt{K'_{\text{общ}}}.$$

Дисперсия динамической погрешности в этом случае может быть определена как

$$D_1 \approx D_{\text{в}}/K''_{\text{общ}}{}^2,$$

где $D_{\text{в}}$ — дисперсия ускорения наблюдаемого объекта, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-4}$.

Дисперсия полной погрешности

$$D_{\Sigma} = D_1 + D_2 = D_{\text{в}}/K''_{\text{общ}}{}^2 + \Phi_{\text{ш}}\sqrt{K''_{\text{общ}}}.$$

Дифференцируя это выражение по $K''_{\text{общ}}$, получим условие экстремума

$$-2D_{\text{в}}/K''_{\text{общ}}{}^3 + \Phi_{\text{ш}}/(2\sqrt{K''_{\text{общ}}}) = 0,$$

оптимальное значение $K''_{\text{общ}}$

$$K''_{\text{общ опт}} = (4D_{\text{в}}/\Phi_{\text{ш}})^{2/5},$$

а минимум дисперсии полной погрешности

$$D_{\Sigma \text{ min}} = \frac{5}{4}\sqrt[5]{4D_{\text{в}}\Phi_{\text{ш}}^4}. \quad (4.27)$$

Отсюда можно рассчитать постоянную времени $\tau = 1/\sqrt{K_{\text{общ. опт}}}$, после чего необходимо проверить выполнение условия устойчивости схемы $\tau > T_{\text{в. д.}}$, где $T_{\text{в. д.}}$ — постоянная времени временного дискриминатора.

Целесообразность ввода второго интегратора может быть определена, если сравнивать выражения $D_{\Sigma \text{ min}}$ для схем с одним и двумя интеграторами, т. е. (4.26) и (4.27). Приравняв эти выражения друг к другу, получим уравнение, из которого можно найти граничное значение $D_{\text{в}} = 0,565\sqrt[3]{D_{\text{в}}^5 / \Phi_{\text{ш}}^2}$. Если заданное значение $D_{\text{в}} > D_{\text{в гр}}$, то следует использовать схему с одним интегратором, в противном случае — с двумя.

В заключение отметим связь между точностным и динамическим расчетом. Из приведенных выше формул следует, что точностные параметры рассмотренных ОЭП тесно связаны с такими динамическими параметрами, как полоса пропускания частот Δf и постоянная времени всей системы τ . Поэтому в ряде случаев эти параметры определяют из точностного расчета, а лишь затем проводят расчет остальных динамических параметров ОЭП.

Расчет инструментальных погрешностей

Классификация составляющих инструментальной (конструкторско-технологической) погрешности может быть достаточно разнообразной. В качестве основных составляющих обычно выделяют погрешности, вызванные неточностью изготовления и сборки деталей и узлов, и погрешности, определяемые влиянием условий эксплуатации. Иногда к составляющим инструментальной погрешности относят допущения и неточности принятые при оценке преобразования всего ОЭП или отдельных его узлов (теоретические погрешности), т. е. по сути методические погрешности.

Погрешности изготовления и сборки (технологические погрешности) и погрешности вследствие влияния эксплуатационных условий (эксплуатационные погрешности) обычно называют первичными. Они могут носить как случайный, так и систематический характер. Систематические первичные погрешности в процессе работы прибора могут оставаться постоянными либо закономерно изменяться в зависимости от изменения какого-либо параметра прибора или условий его работы. Примерами источников систематических первичных погрешностей в ОЭП являются: отклонения от заданной схемы осевых систем угломерных приборов (например, при эксцентри-

ситете осей), смещения нулевых положений датчиков углов и отдельных деталей вследствие нагрева и охлаждения и др.

Традиционными способами борьбы с систематическими погрешностями, как известно, является ужесточение допусков на изготовление деталей и их сборку, рациональный выбор материалов, применение таких схем и методик измерений, при которых систематические погрешности уменьшаются или вообще исключаются, предварительное эталонирование приборов и отдельных их звеньев. В последнее время, особенно в связи с использованием в составе высокочастотных ОЭП или в одном комплексе с ними микропроцессоров и других средств современной вычислительной техники, все чаще используется точностная калибровка ОЭП, включающая заблаговременное (например, на стадии испытаний приборов) определение функций влияния, т. е. зависимостей систематических погрешностей от условий эксплуатации прибора и других факторов, и ввод соответствующих поправок в характеристику преобразования непосредственно в процессе работы прибора в соответствии с условиями этой работы. Достаточно общий порядок расчета инструментальной погрешности может быть следующим.

На первом этапе определяется (задается) доля инструментальной погрешности в общей погрешности прибора. Отдельные ее составляющие, обычно систематические, могут быть уменьшены при калибровке, и дальнейший расчет ведется только для первичных инструментальных погрешностей, т. е. в модели вида $\Delta y_{\Sigma} = \Delta_{\text{м}} + \Delta_{\text{о. и}} + \Delta_{\text{доп. и}}$, где $\Delta_{\text{м}}$ — составляющая общей методической погрешности; $\Delta_{\text{о. и}}$ — основная инструментальная погрешность; $\Delta_{\text{доп. и}}$ — дополнительная инструментальная погрешность, можно рассматривать только два последних слагаемых правой части, сумму которых обозначим $\Delta_{\text{и}}$.

На втором этапе составляется выражение для функции преобразования $y = f(x, q_1, q_2, \dots, q_n, q'_1, q'_2, \dots, q'_n)$, т. е. рабочая формула единичного измерения. Устанавливается характер (систематической или случайный) и законы распределения отдельных независимых первичных погрешностей, входящих в эту рабочую формулу, с учетом допусков на значения параметров, в результате чего может быть составлена модель общей инструментальной погрешности, например

$$\Delta_{\text{и}} = \sum_{i=0}^n (\partial y / \partial q_i)_0 \Delta q_i + \sum_{k=1}^l (\partial y / \partial q'_k) \Delta q'_k, \quad (4.28)$$

здесь частные производные $\partial y / \partial q_i$, $\partial y / \partial q'_k$ — передаточные функции (коэффициенты влияния) первичных погрешностей; $\Delta q_i = q_i - q_{i0}$ — первичная инструментальная погрешность i -го конструктивного параметра; $\Delta q'_k = q'_k - q'_{k0}$ — изменения k -го влияющего фактора; индекс

«0» при частных производных указывает, что они вычислены при номинальных значениях q_{i0} и q'_{k0} , т. е. без учета погрешностей.

Следующим этапом является распределение общего допуска $\Delta_{\text{и}}$ на инструментальную погрешность между отдельными ее составляющими. Можно использовать несколько методов такого распределения, т. е. проектного точностного расчета [1].

При использовании метода равных допусков на первичные погрешности значение (допуск) отдельной составляющей (i -й первичной погрешности) рассчитывают по формуле

$$\Delta q_i = \Delta_{\text{и}} \left[\sum_{i=1}^n (\partial y / \partial q_i)_0 C_{q_i} + \sqrt{\sum_{i=1}^n (\partial y / \partial q_i)_0^2 K_{q_i}^2} \right]^{-1}, \quad (4.29)$$

где C_{q_i} — коэффициенты, учитывающие систематические составляющие случайных первичных погрешностей; K_{q_i} — коэффициенты, учитывающие вид рассеяния случайных первичных погрешностей. Значения C_{q_i} определяются не только видом закона распределения случайных погрешностей, но и смещениями центров их группирования.

Переход к средним квадратическим их значениям σ_q или дисперсиям D_q описан в литературе, где приведены типичные для точных приборов значения инструментальных погрешностей. Часто для перехода от двухстороннего поля допуска t на тот или иной параметр к средней квадратической погрешности s пользуются соотношением $\sigma = (1/6)k_q t$, где K_q — коэффициент относительного рассеяния случайных первичных погрешностей. Для гауссовского закона распределения с полем рассеяния $\pm 3\sigma$ коэффициент $K_q = 1$; для закона равной вероятности $K_q = 1,73$; для закона Релея $K_q = 1,14$; для треугольного закона Симпсона $K_q = 1,22$ и т. д.

Формулу (4.29) можно применять для имеющих одинаковую размерность первичных погрешностей. При другом методе — назначении Δq_i в соответствии с их коэффициентами влияния $(\partial y / \partial q_i)$ — величина $\Delta_{\text{и}}$ распределяется поровну между частными погрешностями. Для независимых случайных погрешностей, не имеющих систематических составляющих и распределенных по гауссовскому закону, допуск

$$\Delta q_i = \Delta_{\text{и}} / \left[(\partial y / \partial q_i)_0 \sqrt{n} \right].$$

Еще одним методом назначения допусков на первичные погрешности является минимизация затрат $z(\Delta q_i)$, связанных с обеспечением допусков при изготовлении отдельных деталей, сборке отдельных узлов и прибора в целом.

После проведения проектного точностного расчета, т. е. распределения допусков, полученные значения Δq_i корректируют, например путем учета условий конкретного производства и других факторов.

Следующим этапом является проверочный расчет допусков на первичные погрешности, т. е. суммирование полученных значений Δq_i , с их коэффициентами влияния в соответствии с принятой моделью инструментальной погрешности $\Delta_{\text{и}}$.

Наибольшее распространение на практике получили два метода суммирования отдельных составляющих общей инструментальной погрешности: 1 — суммирование абсолютных значений отдельных составляющих (расчет на «максимум-минимум», расчет при максимальном влиянии частных погрешностей); 2 — суммирование с учетом вероятного влияния отдельных составляющих.

При первом методе за модель $\Delta_{\text{и}}$ принимается сумма двух последних слагаемых

$$\Delta_{\text{и}} = \sum_{i=1}^n (\partial y / \partial q_i)_0 \Delta q_i + \sum_{k=1}^l (\partial y / \partial q'_k)_0 \Delta q'_k,$$

т. е. погрешностям Δq_i и $\Delta q'_k$ присваиваются предельные значения допусков, полученные на предыдущих этапах, и они алгебраически суммируются. Погрешности Δq_i и $\Delta q'_k$ могут быть как случайными, так и систематическими.

При выборе второго («вероятностного») метода в общем случае учитывается влияние случайных и систематических составляющих, складываемых алгебраически с учетом их коэффициентов влияния. Результирующая погрешность может быть представлена как сумма

$$\Delta_{\text{и}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\partial y / \partial q_i)_0^2 K_{qi}^2 \sigma_{qi}^2 + \sum_{i=1}^n (\partial y / \partial q_i)_0 C_{qi} \Delta_{si}},$$

где σ_{qi}^2 — дисперсия i -й случайной составляющей; Δ_{si} — значение i -й систематической составляющей; остальные обозначения были введены выше. Здесь не выделены отдельно основные и дополнительные погрешности, а составляющие погрешностей считаются независимыми и линейно суммируемыми.

Существуют и другие методы проверочного расчета. Так, по методике Ренча погрешность $\Delta_{\text{и}}$ определяется как среднее геометрическое между алгебраическим и квадратическим суммированием отдельных случайных составляющих

$$\Delta_{\text{и}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\partial y / \partial q_i)_0 \Delta q_i \sqrt{\sum_{i=1}^n [(\partial y / \partial q_i)_0 \Delta q_i]^2}}.$$

По сравнению с методом «максимум-минимум», когда нередко получают существенно завышенные значения $\Delta_{\text{и}}$, особенно при большом n , метод Ренча дает удовлетворительные результаты, если первичные погрешности Δq_i имеют систематические составляющие, равные половине поля допуска (поля рассеяния) погрешности. При больших n и незначительных систематических погрешностях метод Ренча дает очень большое завышение $\Delta_{\text{и}}$, поэтому на практике его применяют редко.

В последнее время находит применение метод статистического моделирования (метод Монте-Карло), в соответствии с которым моделируются случайные значения первичных погрешностей, распределенных в поле допуска по заданному закону с заданными вероятностными характеристиками. Затем к случайному сочетанию параметров прибора и определяется результирующая погрешность. С помощью ЭВМ проводится статистическая обработка результатов моделирования.

В этом случае, если полученный результат не удовлетворяет разработчика, необходим анализ соотношений между отдельными составляющими общей (или инструментальной) погрешности, правильности выбора параметров прибора, входящих в виде аргументов в функцию преобразования, а также допусков на эти параметры и, как следствие, коррекция либо схемы прибора, либо значений его параметров или допусков на них, т. е. расчет идет по итерационному алгоритму (см. рис. 4.10).

Часто целесообразными являются дополнительный расчет для определения максимального влияния систематических погрешностей и анализ его результатов.

В качестве примера точностного расчета измерительного устройства рассмотрим расчет системы ПИК-2 для контроля колебаний Останкинской башни. Прибор позволяет автоматически измерять плановые координаты перемещений одного из четырех сечений башни на фиксированных высотах и регистрировать значения этих координат в виде записи.

Система состоит из четырех верхних приборов-имитаторов точечного излучателя, установленных на заданных высотах, и двух нижних приборов, представляющих собой измерительные станции, одновременно и независимо друг от друга определяющие ортогональные координаты колебаний одного из четырех сечений башни.

Имитаторы точечных излучателей совершают колебания вместе со стволом башни. Излучаемый ими поток направляется к приемным объективам нижних приборов. Часть потока, попавшая во вход-

ной зрачок объектива нижнего прибора, собирается в фокальной плоскости, создавая изображения точечного излучателя.

Нижний прибор представляет собой оптико-электронную следящую систему с амплитудным анализатором изображения в виде разделительной призмы. При колебаниях башни изображение точечного излучателя перемещается, что приводит к появлению сигнала рассогласования на выходе электронного тракта. Указанный сигнал в виде управляющего напряжения подается на электродвигатель привода, перемещающий вслед за движущимся изображением разделительную призму до исчезновения рассогласования в системе. Перемещения анализатора, повторяющие в определенном масштабе перемещения точечного излучателя, измеряются с помощью соответствующего датчика. Переключение системы на регистрацию колебаний выбранного сечения башни осуществляются плоским зеркалом, установленным перед объективом.

Рабочую формулу системы можно получить из несложных геометрических соотношений (рис. 4.13, а и б). Нижние приборы системы

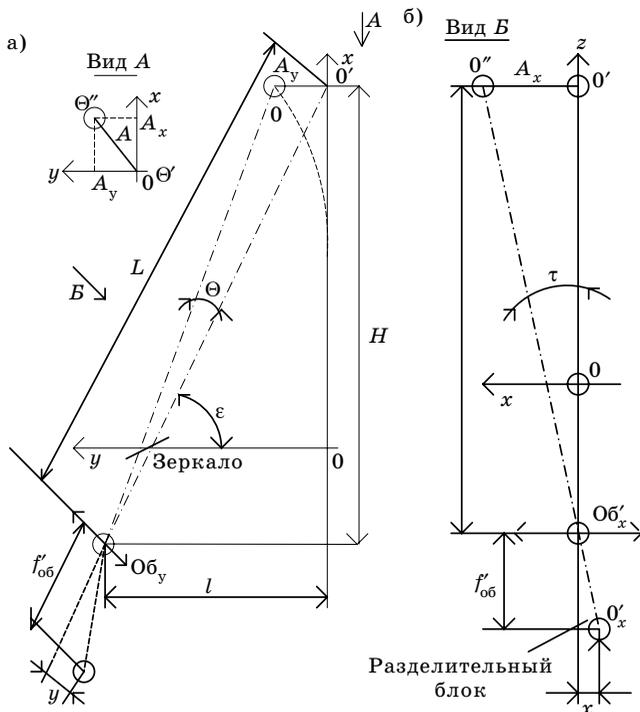


Рис. 4.13. Геометрическая схема оптико-электронной системы ПИК-2

расположены на некотором удалении l от оси башни и поэтому измерительная трасса имеет угол наклона ε к горизонтальной плоскости.

На рис. 4.13, *a* показано сечение, совпадающее с измерительной плоскостью и проходящее через ось башни и узловую точку объектива Об_у нижнего прибора. Для удобства рассмотрения соотношений показано изображение Об'_у объектива в плоском зеркале, обеспечивающем оптическую связь нижнего прибора с верхним, а также — сечение, перпендикулярное к измерительной плоскости, проходящее через прямую, соединяющую идеальное положение точечного источника O' и узловую точку приемного объектива. На рис. 4.13, *a* показано положение источника излучения в плане (вид *A*).

Так как измеряемые углы рассогласований θ и η в реальной схеме не превышают десятков угловых минут, то в силу их малости выражения для составляющих амплитуд колебаний по осям координат будут иметь вид

$$A_x = \frac{x(L - A_y \cos \varepsilon)}{f'_{\text{об}}}, \quad A_y = \frac{yL}{f'_{\text{об}} \sin \varepsilon + y \cos \varepsilon},$$

где x и y — перемещения изображения излучателя в плоскости анализа (фокальной плоскости объектива) по двум взаимно перпендикулярным направлениям; L — наклонная дальность; $f'_{\text{об}}$ — фокусные расстояния объективов; ε — угол наклона оптической оси.

Перемещения x и y регистрируются выходными самопишущими приборами как x' и y' . Следовательно, $x = x'k_{\Pi}$ и $y = y'k_{\Pi}$, где k_{Π} — коэффициент передачи канала регистрации.

С учетом этого

$$A_x = \frac{x'k_{\Pi}(L - A_y \cos \varepsilon)}{f'_{\text{об}}}, \quad A_y = \frac{y'k_{\Pi}L}{f'_{\text{об}} \sin \varepsilon + y' \cos \varepsilon k_{\Pi}}.$$

В связи с тем, что в этих выражениях аргументы не коррелированы, средние квадратические погрешности измерений каждой из составляющих определяются выражениями:

$$\frac{\sigma_{A_x}^2}{k_{\Pi}^2 k_x^2} = \sigma_{x'}^2 + \left(\frac{x'}{L}\right)^2 \sigma_L^2 + \left(\frac{x'}{f'_{\text{об}}}\right)^2 \sigma_{f'_{\text{об}}}^2 + \left(\frac{x'}{k_{\Pi}}\right)^2 \sigma_{k_{\Pi}}^2,$$

$$\frac{\sigma_{A_y}^2}{k_{\Pi}^2 k_y^2} = \sigma_{y'}^2 + \left(\frac{y'}{L}\right)^2 \sigma_L^2 + \left(\frac{y'}{k_{\Pi}}\right)^2 \sigma_{k_{\Pi}}^2 + y'^2 \text{ctg}^2 \varepsilon \sigma_{\varepsilon}^2,$$

где $k_x = L/f'_{\text{об}}$; $k_y = L/(f'_{\text{об}} \sin \varepsilon)$.

При выводе первого из этих выражений при промежуточных вычислениях в силу малости была опущена составляющая $x'k_{\Pi}A_y \cos \varepsilon / (f'_{06}L)$, так как $A_y/L \approx 10^{-3}$, $x'k_{\Pi}/f'_{06} \approx 10^{-2}$, $\cos \varepsilon \approx 0,3$.

Далее указанные соотношения можно преобразовать к более удобному виду

$$\sigma_{A_x}^2 = k_{\Pi}^2 k_x^2 x'^2 \left[\left(\frac{\sigma_{x'}}{x'} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_L}{L} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{f'_{06}}}{f'_{06}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{k_{\Pi}}}{k_{\Pi}} \right)^2 \right],$$

$$\sigma_{A_y}^2 = k_{\Pi}^2 k_y^2 y'^2 \left[\left(\frac{\sigma_{y'}}{y'} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_L}{L} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{f'_{06}}}{f'_{06}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{k_{\Pi}}}{k_{\Pi}} \right)^2 + \text{ctg}^2 \varepsilon \sigma_{\varepsilon}^2 \right].$$

Таким образом, зная конструктивные параметры геометрической схемы L , f'_{06} , ε и k_{Π} , а также относительные погрешности измерения параметров, можно найти средние квадратические погрешности измерений A_x и A_y .

Проведем числовую оценку точности системы. Относительная погрешность определения наклонной дальности при использовании топографического светодальномера средней точности может составить $\sigma_L/L = 1/1000$.

Относительная погрешность измерения x' и y' определяется точностью устройства регистрации. В системе были применены самопишущие приборы, обеспечивавшие относительную погрешность $\sigma_{x'}/x' = 1/1000$.

Относительная погрешность измерения фокусного расстояния $\sigma_{f'}/f' = 1/2000$.

Относительная погрешность измерения коэффициента передачи составила $\sigma_{k_{\Pi}}/k_{\Pi} = 1/200$.

При $L = 500$ м, $f'_{06} = 600$ мм, $\varepsilon = 70^\circ$ в диапазонах измерений угловых рассогласований $2\theta = 2\eta = \pm 40'$ имеем: $k_x = L/f'_{06} \approx 800$; $k_y = L/(f'_{06} \sin \varepsilon) \approx 890$; $x = f'_{06} \theta / \rho \approx 7,5$ мм; $y \approx 7,5$ мм.

С учетом того, что угол ε определяется с погрешностью $\sigma_{\varepsilon} \approx \pm 30'' = \pm (1,5 \cdot 10^{-4})$ рад, средние квадратические погрешности измерений обеих составляющих колебаний A_x и A_y одинаковы: $\sigma_x \approx \sigma_y \approx \pm 7,7$ мм.

Доверительные погрешности измерений при вероятности $P = 0,996$ будут

$$\overset{\circ}{\Delta} A_x \approx \overset{\circ}{\Delta} A_y \approx 3\sigma_x \approx \pm 23 \text{ мм.}$$

4.5. Расчет тепловых режимов работы оптико-электронных приборов

Расчет тепловых режимов ОЭП является необходимым как на стадии системотехнического, так и на стадии схемотехнического проектирования, поскольку эти режимы во многом определяют конструкцию всего ОЭП и, соответственно, его отдельных узлов. Выделяемая внутри ОЭП тепловая энергия поглощается его отдельными элементами, нагревая их до температуры T , отличающейся от температуры окружающей среды T_c , и вызывая перепад температур $\Delta t = T - T_c$, и передается через корпус или кожух в окружающую среду. Перепад Δt зависит от конструкции ОЭП и его узлов. В ряде случаев ОЭП работает в условиях низких температур, например в космосе. При этом температура ОЭП и их узлов может уменьшаться относительно нормальной температуры, иногда ниже допустимых значений температуры эксплуатации отдельных элементов, которые устанавливают соответствующие ТУ. Кроме того, вследствие неравномерной концентрации тепловыделяющих элементов ОЭП, наличия одностороннего внешнего излучения, например Солнца, имеют место перепады температур внутри самого прибора.

Даже незначительный перепад температур узлов ОЭП может привести к появлению термооптических аберраций, расфокусировки оптической системы, децентрировки или термодформации оптических деталей, к изменению положения элементов конструкции, ухудшению чувствительности и отношения сигнал/шум из-за увеличения фонового потока излучения, попадающего на приемник излучения и т. п. Более значительные изменения температур, превышающие допустимые для элементов конструкции диапазоны, вызывают ухудшение надежности ОЭП, а иногда и полную потерю их работоспособности.

Для обеспечения требуемых качественных показателей ОЭП необходимо проводить расчет и анализ их тепловых режимов, что позволит в процессе проектирования выбрать конструкцию всего прибора или отдельного узла, максимально удовлетворяющую допустимым отклонениям показателей от номинала.

В ряде случаев целесообразно использовать метод поэтапного моделирования тепловых режимов, при котором сначала выполняют анализ тепловой модели прибора, а потом анализируют теплообмен в его отдельных узлах и элементах. При этом в граничные условия для поверхности узлов элементов подставляют найденные на предыдущих этапах значения тепловых потоков и температур окружающих тел.

Иногда на основе результатов моделирования тепловых режимов можно перейти к синтезу термостабильной ОЭП. В этом случае на первом этапе анализа тепловых режимов ОЭП целесообразно рассматривать, например плату с установленными на ней оптической системой, узлами приемника излучения, электронного тракта и т. д., с равномерно распределенной тепловой мощностью (источниками теплоты) и путем численного решения уравнений теплопроводности, определить средние температуры платы в месте установки отдельных узлов, а на последующих этапах определить средние температуры узлов и элементов и перепады температур Δt . По найденным значениям перепадов температур Δt отдельных узлов и элементов относительно нормальной температуры можно рассчитать соответствующие изменения оптических параметров: радиусов кривизны r_i оптических поверхностей, показателей преломления n_i деталей, толщины d_i , воздушных промежутков по формулам

$$r_i = r_{20}(1 + \alpha_i \Delta t); \quad n_i = n_{20}(1 + \beta_i \Delta t); \quad d_i = d_{20}(1 + \beta_i \Delta t),$$

где r_{20} d_{20} n_{20} — соответственно, радиус кривизны, толщина и показатель преломления при нормальной температуре $t = 20$ °С; α_i — коэффициент линейного расширения материала i -х оптических или механических деталей; β_i — температурный коэффициент показателя преломления стекла i -й детали.

По измененным параметрам оптической системы можно рассчитать значения термооптических аберраций объектива ОЭП. В каждом конкретном случае можно выбрать наиболее простой способ термокомпенсации оптической системы, например за счет выбора материалов оптических и механических деталей, имеющих минимальные коэффициенты линейного расширения (кварц, пирекс, ситалл, инвар и т. п.), материалов с высокой теплопроводностью (сплавы титана), или установки компенсаторов, а иногда систем охлаждения.

В частности, для зеркальной оптической системы Кассегрена, состоящей из двух зеркал, установленных на плате и выполненных вместе с ней из одного и того же материала, например из титана, возникающая вследствие перепада температур Δt_{1-2} между зеркалами расфокусировка будет

$$\Delta = 1,125\alpha\Delta t_{1-2}f',$$

где α — коэффициент линейного расширения материала зеркал и платы; f' — эквивалентное фокусное расстояние объектива. Исходя из допустимого значения расфокусировки Δ_d по последней формуле можно определить допустимые значения перепада температур Δt_{1-2} меж-

ду двумя зеркалами. Значения Δ_d при этом можно рассчитать, например по формуле $\Delta_d \approx d_p f' / D$, где D — диаметр входного зрачка объектива, а d_p — диаметр кружка рассеяния, вызванного расфокусировкой объектива. Последний не должен превышать определенный минимальный размер (например, полупериод раstra анализатора, размер элемента многоэлементного приемника и т. п.).

В некоторых случаях необходимо учитывать градиенты температур внутри оптических деталей, приводящие к погрешности всего ОЭП. По перепадам температур Δt можно определить также смещения излучателя относительно конденсатора, фоновый поток, попадающий на приемник излучения и снижающий его чувствительность, и т. п. Кроме того, полученные в результате расчета тепловых режимов прибора перепады температур Δt для его узлов и элементов, в частности электронного блока, сравнивают с допустимыми для этих узлов и элементов диапазонами изменений температур при их эксплуатации в целях выявления необходимости их охлаждения.

Для приборов, работающих в режиме установившегося температурного поля, тепловой расчет упрощенно можно выполнить, исходя из следующего уравнения теплового баланса:

$$P_{\text{рас}} = P_{\text{под}} - P_{\text{отв}} = \Phi_{\text{т.п}} + \Phi_{\text{к}} + \Phi_{\text{из}}, \quad (4.30)$$

где $P_{\text{рас}}$, $P_{\text{под}}$, $P_{\text{отв}}$ — соответственно рассеиваемая, подводимая и отводимая электрическая мощности; $\Phi_{\text{т.п}}$, $\Phi_{\text{к}}$, $\Phi_{\text{из}}$ — тепловые потоки, отдаваемые через теплопроводность, конвекцию и излучение соответственно.

Так как в установившемся режиме подводимая к прибору электрическая энергия часто практически полностью преобразуется в тепловую энергию ($P_{\text{отв}} = 0$), то, следовательно, $P_{\text{рас}} \approx P_{\text{под}} = \Phi_{\text{т.п}} + \Phi_{\text{к}} + \Phi_{\text{из}}$.

Тепловой поток $\Phi_{\text{т.п}}$, отдаваемый путем теплопроводности однородным телом, имеющим постоянное поперечное сечение,

$$\Phi_{\text{т.п}} = \lambda S \Delta T / l, \quad (4.31)$$

где λ — коэффициент теплопроводности материала, из которого изготовлено данное тело; S — площадь поверхности, через которую осуществляется перенос теплоты, например площадь поперечного сечения тела; ΔT — разность температур между концами теплопроводящего тела; l — его длина по направлению переноса.

При передаче теплового потока через стенку вместо l в формулу (4.31) подставляют толщину стенки δ . Значения λ для ряда материалов, необходимые для оценочных расчетов, приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2. Значения λ для различных материалов

Металлы	$\lambda, \text{Вт} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$	Неметаллы	$\lambda, \text{Вт} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$
Алюминий	225	Асбест	0,18
Бронза (25 % Sn, 75 % Cu)	27	Бумага	0,13
Бронза алюминиевая (95 % Cu, 5 % Al)	82	Вода при температуре, °C	
		10	0,575
		30	0,618
		50	0,64
Железо (99,9 %)	60	Воздух при температуре, °C	
		10	0,025
		30	0,027
		50	0,028
		70	0,03
Константан	23	Гетинакс	0,26–0,29
Латунь	110	Дерево	0,1–0,3
Медь	360–390	Картон	0,18
Олово	64	Кварц	10
Ртуть	10	Масло трансформаторное	0,16
Свинец	34	Поливинилхлорид	0,16
Серебро	410–456	Полистирол	0,17
Силумин (85 % Al, 13 % Si)	160	Полиэтилен	0,51
Сталь углеродистая	45	Резина	0,17
Сталь никелевая (40 % Ni)	10	Слюда	0,36
Сталь листовая электротехническая: вдоль волокон поперек волокон	65 1	Смола эпоксидная, армированная стекловолокном	0,31
Сталь трансформаторная: вдоль волокон поперек волокон	25 0,5	Стекло кварцевое	1,45
Цинк	110	Стекло оптическое	0,80
Чугун	58	Стекловолокно	0,05
		Текстолит	0,34
		Фетр	0,05

При точных расчетах следует учитывать зависимость λ от температуры. В некоторых случаях вместо λ/l в формуле (4.31) используют коэффициент теплоотдачи α_T , который связан с коэффициентом теплопроводности соотношением $\alpha_T = \lambda/l$.

Тепловой поток (тепловая мощность), отдаваемый нагретой поверхностью за счет естественной конвекции, вычисляют по формуле $\Phi_k = \alpha_k S \Delta T$. Здесь α_k — коэффициент теплоотдачи (теплообмена) за счет конвекции между поверхностью тела и окружающей средой; S и ΔT — то же, что и в предыдущей формуле.

При тепловых расчетах приборов коэффициент α_k рассчитывают по формуле

$$\alpha_k = Nu \lambda l^{-1},$$

где Nu — обобщенный безразмерный критерий (число Нуссельта, который обычно имеет вид)

$$Nu = c Re^q Pr^m Gr^n k_{доп}.$$

В этом уравнении c, m, n, q — числовые безразмерные величины, соответствующие определенному виду и режиму движения среды и некоторому диапазону изменения определяющих параметров (их значения, полученные в результате обобщения большого объема экспериментальных данных, приведены в табл. 4.3); $k_{доп}$ — коэффициент, учитывающий влияние дополнительных факторов (направления теплового потока, кривизны канала и т. п.), значения которого можно определить по рис. 4.14 и табл. 4.3; $Re = vl/\nu$ — безразмерное число Рейнольдса; v — скорость движения среды; ν — кинематическая вязкость среды; $Pr = C_p \nu / \lambda$ — безразмерное число Прандтля; C_p — удельная теплоемкость среды при постоянном давлении; ρ — плотность среды; $Gr = g \beta l^3 \Delta T / \nu^2$ — безразмерное число Грасгофа; g — ускорение свободного падения; β — коэффициент объемного расширения среды (для газов $\beta = 3,66 \cdot 10^{-3} K^{-1}$).

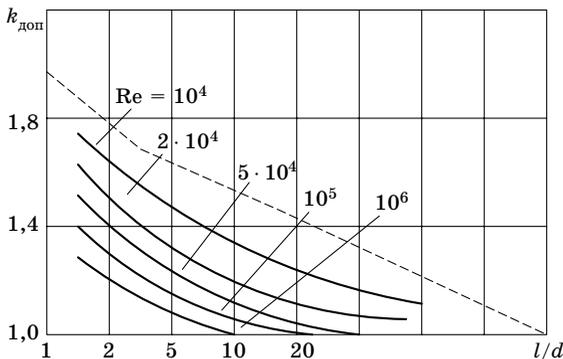


Рис. 4.14. Зависимость коэффициента $k_{доп}$ от отношения длины l к диаметру d тела при ламинарном (штриховая линия) и турбулентном (сплошные линии) режимах для различных значений Re

Таблица 4.3. Значение s , q , t , n , $k_{\text{доп}}$ для типовых случаев теплоотдачи

c	q	t	n	$k_{\text{доп}}$	Диапазон изменения определяющих критериев	Определяющий размер l и температура T
Естественная конвекция						
1,18	0	0,125	1,25	1	$1 \cdot 10^{-3} < Gr \cdot Pr < 5 \cdot 10^2$	Для вертикальных плит, цилиндров $l = h$ (высота) Для горизонтальных цилиндров $l = d$ (диаметр) Для горизонтальных плит $l = L_1$ (меньшая сторона) $T = 0,5(T_{\text{ст}} + T_c)$, где $T_{\text{ст}}$ — температура стенок и других объектов
0,54	0	0,25	0,25	1	$5 \cdot 10^2 < Gr \cdot Pr < 2 \cdot 10^7$	
0,135	0	0,33	0,33		$1 \cdot 10^{13} < Gr \cdot Pr < 2 \cdot 10^7$	
Вынужденное движение среды в каналах произвольного сечения						
0,15	0,33	0,43	0,1	$k_{\text{доп}}^q k_{\text{доп}}^l k_{\text{доп}}^q = (Pr_c / Pr_{\text{ст}})^{0,25}$ (см. рис. 4.9)	$Gr > 8 \cdot 10^5$ $Re < 2200$	$l = d_c$; $T = T_c$; $d_s = 4S/\Pi$; S — площадь поперечного сечения; Π — периметр поперечного сечения канала
0,0225	0,8	0,4	0	$(1-6) \cdot 10^5 / (Re^{1,8})$	$4 \cdot 10^3 < Re < 10^4$ $0,6 < Pr < 140$	
0,023	0,8	0,4	0	$k_{\text{доп}}^l$	$10^4 < Re < 2 \cdot 10^6$ $0,6 < Pr < 100$	
Вынужденное обтекание плоской поверхности						
0,66	0,5	0,43	0	$(Pr_c / Pr_{\text{ст}})^{0,25}$	$Re < 4 \cdot 10^4$ $0,5 < Pr < 100$ $Re > 4 \cdot 10^4$	$l = L$ $T = T_c$
0,037	0,8	0,43	0			

При вынужденной конвекции газа определяющим параметром для расчета коэффициента теплоотдачи α_k за счет конвекции является скорость движения $v = G_m / (S\rho) = G_v / S$, где G_m и G_v — соответственно, массовый и объемный расходы теплоносителя; S — свободная для прохода теплоносителя площадь поперечного сечения канала.

При расчете тепловых режимов работы ОЭП в ряде случаев можно пользоваться приближенными значениями коэффициента α_k (табл. 4.4). Коэффициенты c_1 и c_2 являются функциями различных параметров, их значения для воздуха и воды приведены в табл. 4.5. Как следует из соотношений, приведенных в табл. 4.4, плоский корпус более предпочтителен с точки зрения теплопередачи по сравнению с высоким и узким. Тепловой поток $\Phi_{из}$ для двух тел, имеющих различную температуру T_1 и T_2 , равен

$$\Phi_{из} = e_{пр} \varphi_{1,2} f(T_1, T_2) S \Delta T,$$

где $e_{пр}$ — приведенная степень черноты (коэффициент излучения); $\varphi_{1,2}$ — коэффициент облученности, показывающий, какая часть потока, излучаемого одним телом, попадает на другое, менее нагретое тело (рис. 4.15); $f(T_1, T_2)$ — функция, устанавливающая связь между значениями температуры тел при излучении. Формулу можно представить в виде

$$\Phi_{из} = \alpha_{из} S \Delta T,$$

где $\alpha_{из} = e_{пр} \varphi_{1,2} f(T_1, T_2)$ — коэффициент теплоотдачи излучением.

Таблица 4.4. Коэффициент теплоотдачи α_k различных элементов в помещении бесконечно больших размеров

Элемент	Формулы для определения α_k , Вт · м ⁻² · К ⁻¹ , при	
	$n = 0,25$ (ламинарный поток)	$n = 0,33$ (турбулентный поток)
Шар и горизонтальный цилиндр диаметром d	$C_1 (\Delta T / d)^{0,25}$	$C_2 \Delta T^{0,33}$
Вертикальные пластина и цилиндр высотой h	$C_1 (\Delta T / h)^{0,25}$	$C_2 \Delta T^{0,33}$
Горизонтальная пластина (l_{\min} — меньший размер): теплоотдача вверх теплоотдача вниз	$1,3 C_1 (\Delta T / l_{\min})^{0,25}$ $0,7 C_1 (\Delta T / l_{\min})^{0,25}$	$1,3 C_2 \Delta T^{0,33}$ $0,7 C_2 \Delta T^{0,33}$

Таблица 4.5. Коэффициенты C_1 и C_2 для воды/воздуха при различных температурах T_c

$T_c, ^\circ\text{C}$	0	20	40	60	80	100
C_1	—	105/1,38	149/1,34	178/1,31	205/1,29	227/1,27
C_2	101/1,69	198/1,61	290/1,53	363/1,45	425/1,39	480/1,33

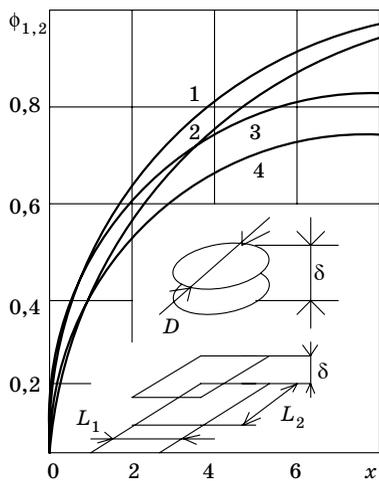


Рис 4.15. Зависимость коэффициента облученности $\phi_{1,2}$ для тел различной конфигурации от параметра x , определяемого отношениями вида $x = L/\delta$ или $x = D/\delta$

Для вычисления функции $f(T_1, T_2)$ пользуются следующей формулой:

$$f(T_1, T_2) = \sigma(T_2^4 - T_1^4) / \Delta T,$$

где σ — постоянная излучения абсолютно черного тела, равная $5,67 \times 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}, \text{ К}^{-4}$.

Исходя из приведенных выше формул для расчета тепловых потоков $\Phi_{\text{т.п}}$, $\Phi_{\text{к}}$ и $\Phi_{\text{из}}$, можно записать выражение для расчета суммарного потока, отдаваемого прибором или его узлом

$$\Phi_{\Sigma} = \Phi_{\text{т.п}} + \Phi_{\text{к}} + \Phi_{\text{из}} = \alpha S \Delta T,$$

где $\alpha = \alpha_{\text{т}} + \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{из}}$ — суммарный коэффициент теплоотдачи.

Тепловой расчет при сложном теплообмене начинают с построения эквивалентной тепловой схемы, которая должна отражать различные способы передачи теплового потока от отдельных элементов и узлов прибора.

Затем составляют уравнение теплового баланса в соответствии с формулой (4.30), которое решают относительно перепада температур между двумя элементами приборов или перепада температур Δt между прибором и окружающей средой, который называется перегревом. Решить это уравнение теплового баланса в явном виде не удастся, так как сами коэффициенты теплоотдачи зависят от температуры или перепада температур. Поэтому пользуются методом последовательных приближений. Однако в случае сложного теплообмена этот метод также не всегда позволяет найти решение. Более простыми инженерными способами уравнение теплового баланса можно решить только в простых случаях теплообмена, например при расчете теплообмена между излучателем и корпусом прибора.

Вследствие значительных методических и математических трудностей решения уравнений теплового баланса разработаны различные приближенные аналитические, численные и графоаналитические методы расчета теплообмена, а также методы аналогий, физического и математического моделирования. Среди них широкое распространение получил сравнительно простой метод аналогий между тепловыми и электрическими величинами [4].

Библиографический список

1. *Латыев С. М.* Компенсация погрешностей в оптических приборах. Л.: Машиностроение, 1985. 248 с.
2. *Порфирьев Л. Ф.* Основы теории преобразования сигналов в оптико-электронных системах. Л.: Машиностроение, 1989. 387 с.
3. *Якушенков Ю. Г.* Теория и расчет оптико-электронных приборов. М.: Логос, 1999. 480 с.
4. *Дульнев Г. Н.* Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Высш. шк., 1984. 247 с.
5. *Протопопов В. В., Устинов Н. Д.* Инфракрасные лазерные локационные системы. М.: Воениздат, 1987. 175 с.
6. *Парвалюсов Ю. Б., Солдатов В. П., Якушенков Ю. Г.* Проектирование оптико-электронных приборов: учебное пособие для студентов вузов. М.: Машиностроение, 1990. 432 с.
7. *Белов Е. Ф. и др.* Проектирование и эксплуатация лазерных приборов в судостроении: справочник. Л.: Судостроение, 1986. 336 с.
8. *Круз П., Макглоулин Л., Макквистан Р.* Основы инфракрасной техники. М.: Воен. изд-во МО СССР, 1964. 462 с.
9. *Хэкфорд Г.* Инфракрасное излучение. Л.: Энергия, 1964.
10. *Александров В. Г., Бойков В. С., Яцевич Г. Б.* Элементы и устройства систем оптической локации/ЛИАП. Л., 1983.

Учебное издание

Мишура Тамара Прохоровна
Платонов Олег Юрьевич

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ

Учебное пособие

Редактор *А. В. Семенчук*
Верстальщик *С. В. Барашкова*

Сдано в набор 13.11.06. Подписано в печать 25.12.06. Формат 60 × 84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 5,6. Уч.-изд. л. 6,02.
Тираж 100 экз. Заказ №

Редакционно-издательский центр ГУАП
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67