

Современные оптические приборы во многих случаях определяют прогресс в развитии больших и важных направлений науки, техники и производства. Это обусловлено тем, что на современном уровне развития оптические приборы представляют весьма широкие возможности для познания окружающего мира, приема, передачи и обработки информации, а также для автоматизации управления различными объектами, физическими и технологическими процессами.

Со второй половины шестидесятых годов наблюдается новый качественный скачок в развитии оптического приборостроения, обусловленный появлением лазеров и техническими достижениями в микроэлектронике и вычислительной технике. Лазеры, позволяющие генерировать мощное высококогерентное излучение, привели к созданию совершенно новых направлений в оптическом приборостроении. Появились возможности создания устройств, базирующихся на использовании волновых свойств оптического излучения (голография, интерферометрия, Фурье-спектроскопия, оптическая обработка информации с преобразованием пространственного распределения интенсивности излучения в пространственно частотные спектры, лазерная гиометрия и анеометрия и т. д.), а также возможности создания устройств с высокой частотой модуляции излучения. Появление лазеров создало также благоприятные условия для производства оптических систем локации, дальнометрии, связи и активных систем управления и наведения различными подвижными объектами военной, гражданской и космической техники, отличающихся большой точностью работы, высокими плотностями энергии, относительно малыми габаритными размерами и высокой помехозащищенностью по сравнению с радиосистемами подобного назначения.

Успехи в микроэлектронике привели к созданию малогабаритных и малоэнергоемких, высоконадежных и относительно недорогих электронных систем большой степени интеграции со сложными алгоритмами математической и логической обработки сигналов, представленных как в аналоговой, так и в цифровой форме. Были созданы теоретические и материальные предпосылки для разработки и организации производства совершенно новых по своим возможностям преобразователей оптического излучения

в электрический сигнал. В результате появились фотопреобразователи с совершенно новыми возможностями: позиционно-чувствительные, мозаичные, твердотельные аналоги передающих телевизионных трубок, многоэлементные линейки и матрицы приборов с зарядовой связью, микроканальные аналоги электронно-оптических преобразователей. Успехам микроэлектроники обязаны своим появлением современные средства управления интенсивностью, направлением и плоскостью поляризации лазерного излучения, жидкие кристаллы и средства отображения информации.

Развитие вычислительной техники привело к созданию малогабаритных и малоэнергоемких мини- и микроЭВМ и микропроцессоров большого быстродействия и высокой надежности, которые могут включаться в состав оптических приборов, что позволяет существенно усложнить функции, решаемые этими приборами, повысить объем обрабатываемой ими информации, улучшить их качество и сервисные возможности, повысить надежность и автоматизировать управление работой.

По своей структуре и выполняемым функциям современные оптические приборы в большинстве случаев являются сложными автоматическими или автоматизированными оптико-электронными системами (ОЭС), имеющими в своем составе оптические, механические, электронные, вычислительные и электромеханические устройства, каждое из которых может выполнять весьма широкий круг задач и являться сложной подсистемой.

Все это вызывает необходимость системного подхода на всех стадиях разработки, производства и испытаний ОЭС и приборов. При этом, так как области применения таких систем и приборов практически не ограничены, должны быть созданы единые методики расчета, проектирования и испытаний для небольшого количества классов этих систем, которые в то же время охватывали бы всю возможную номенклатуру ОЭС.

Однако к настоящему времени такие всеохватывающие единые методики находятся пока в стадии становления. Имеющиеся фундаментальные работы этого направления [3, 9, 14, 32, 33, 38, 41], как правило, не охватывают всей проблемы в целом и посвящены некоторым отдельным, иногда достаточно обширным разделам.

Настоящая работа посвящена изложению таких методик применительно к линейным непрерывным, импульсным и цифровым ОЭС трех основных классов: измерительного, слеящего и информационного, охватывающих практически все типы и виды современных ОЭС.

В отличие от широко известных работ Л. П. Лазарева [28], М. М. Мирошникова [36], Ю. Г. Якушенкова [57], посвященных изложению теоретических основ оптико-электронных приборов (ОЭП), в настоящей книге все процессы преобразования сигналов в ОЭС рассматриваются на основе единого математического аппа-

рата и в той естественной последовательности от излучения в пространстве предметов до выхода, которая имеет место в реальных системах. Ряд вопросов, изложенных в данной книге (оптимизация параметров систем информационного типа по минимуму потерь информации, оценка помехоустойчивости различных способов модуляции, преобразование сигналов в импульсных и цифровых ОЭС), в упомянутых работах не рассматривался. В отличие от книги Г. М. Мосягина и В. Б. Немтинова [37] в настоящей работе значительное место уделено преобразованию сигналов в ОЭС при работе в режиме обнаружения, а также в импульсных и в цифровых ОЭС. В отличие от ранее изданных автором работ [29, 43], в данной книге значительно больше внимания уделяется вопросам преобразования когерентного излучения и использования его для решения математических задач и задач пространственной фильтрации. Все это позволяет надеяться, что данная работа явится полезным дополнением к существующей научно-технической литературе по теории и расчету ОЭС.

Хотя предполагается, что настоящим учебником будут пользоваться студенты старших курсов оптических специальностей, уже изучившие такие дисциплины, как высшая математика, физика, прикладная теория информации, физическая и геометрическая оптика, теория управления и др., автор, полагая, что книгой будут пользоваться и инженерно-технические работники оптико-электронного приборостроения, счел необходимым в соответствующих разделах изложить математические основы способов описания сигналов и их преобразования в непрерывных, импульсных и цифровых линейных системах, а также отдельные, необходимые для глубокого усвоения, вопросы физической оптики, теории статистических решений и теории статистических оценок. Автор старался изложить эти вопросы достаточно доступно, однако строго и на современном уровне, а также иллюстрировать их наглядными примерами из области расчета и проектирования ОЭС. Это позволит пользоваться данной книгой широкому кругу читателей, не имеющих специальной подготовки по смежным дисциплинам, используемым при рассмотрении вопросов теории ОЭС.

Автор с благодарностью примет все критические замечания, которые вызовет данная книга.

В настоящее время практически невозможно найти области в науке, технике и в производстве, в которых не находили бы применения автоматические и автоматизированные оптические приборы и системы, используемые либо для измерения количественных характеристик и параметров физических и технологических процессов, либо для управления подвижными объектами, физическими и технологическими процессами, либо для сбора, передачи и обработки информации.

Широкое применение таких приборов и систем обусловлено теми достоинствами, которыми обладает электромагнитное излучение оптического диапазона спектра как источник, носитель и переносчик информации. К числу основных достоинств относятся:

1. Практически все процессы и явления, наблюдаемые в природе и в производственной деятельности, сопровождаются электромагнитным излучением, которое либо генерируется в результате внутренних преобразований энергии, либо является следствием отражения, рассеяния и преобразования излучения, приходящего от посторонних источников.

2. Использование электромагнитного излучения в качестве источника и носителя информации о протекающих процессах, как правило, не сопровождается энергетическим вмешательством в ход самих процессов, что позволяет получить их объективные характеристики и параметры.

3. Электромагнитное излучение как источник и носитель информации обладает непревзойденной емкостью и пропускной способностью. Это обусловлено тем, что полезная информация об исследуемых процессах и явлениях может содержаться в амплитуде, частоте и фазе электромагнитных волн в весьма широком диапазоне спектра, в положении плоскости поляризации, в пространственной и временной структуре поля излучения. Это позволяет создавать многопараметрические и многоканальные системы как для сбора, передачи и обработки информации, так и для управления сложными процессами и объектами.

4. Скорость распространения электромагнитного излучения имеет максимально возможное в природе значение, что потенциально обеспечивает максимальное быстроедействие устройств

и систем, в которых используется это излучение в качестве источника и переносчика первичной информации.

5. Пространственная плотность электромагнитного излучения оптического диапазона спектра значительно выше, чем в радиодиапазоне. Это позволяет делать приемную часть оптических систем существенно меньших габаритных размеров, чем в радиосистемах при одинаковых энергетических характеристиках.

6. При достигнутом уровне теории, техники и технологии сложных автоматических систем управления и обработки информации, преобразователей электромагнитного излучения в электрический сигнал (фотоприемников), вычислительной техники и электроники все системы, в которых в качестве носителя первичной информации используется оптическое излучение, достаточно просто и при относительно небольших затратах поддаются автоматизации. При этом в силу свойств оптического излучения, отмеченных выше, такие системы могут решать очень сложные multifunctional задачи с высокими характеристиками точности, быстродействия, надежности, пропускной способности и практически неограниченными возможностями математической и логической обработки информации. В частности, применение встроенных ЭВМ и микропроцессоров, включаемых в состав оптических приборов, позволяет создавать оптические системы, обладающие характеристиками зрительного аппарата живых организмов с его возможностями восприятия и анализа зрительных образов, а также принятия решений.

Все перечисленные достоинства электромагнитного излучения оптического диапазона способствовали и способствуют тому, что автоматические и автоматизированные оптические приборы с преобразованием излучения в электрический сигнал и с последующей обработкой его в электронном тракте, которые являются по сути сложными оптико-электронными системами, находят самое широкое применение и при выполнении исследований, и для управления различными подвижными объектами, оборудованием, физическими и технологическими процессами, и для сбора, обработки и передачи информации.

Широкий круг областей применения оптико-электронных систем (ОЭС) и решаемых с их помощью задач научного, управленческого и производственного характера привели к тому, что в настоящее время практически невозможно перечислить все типы и виды этих систем, выпускаемых серийно или в виде отдельных уникальных образцов. Однако анализ и классификация имеющихся и перспективных образцов ОЭС позволяют сделать следующие выводы.

1. В общем случае состав функциональных элементов ОЭС и последовательность обработки и преобразования сигналов в них могут быть представлены функциональной схемой, изображенной на рис. В.1. В эту схему входят элементы, описание которых приводится ниже.

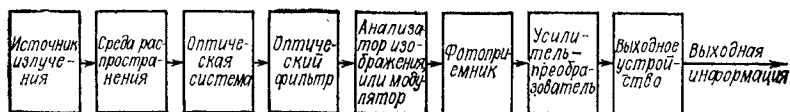


Рис. В.1. Функциональная схема оптико-электронной системы (ОЭС)

а) *Источник излучения.* Такими источниками могут быть физические процессы или явления, протекающие в пространстве предметов и генерирующие собственное излучение, или внешние как естественные, так и специально организованные источники. Однако и при наличии внешних источников пространство предметов можно также рассматривать излучателем, генерирующим отраженное излучение.

Обычно пространство предметов представляет собой некоторое информационное многопараметрическое поле, информационными параметрами которого являются пространственная (в общем случае трехмерная) и временная структуры яркости и спектрального состава излучения, распределения амплитуд, фаз, степени и пространственной ориентации поляризации. Характеристики и параметры информационного поля могут описываться детерминированными и случайными функциями.

б) *Среда распространения.* Через эту среду излучение проходит от пространства предметов до приемной части ОЭС. Ею могут быть вакуум, газы (в том числе атмосфера), жидкости и твердые тела. При прохождении через среды информационные характеристики и параметры излучения претерпевают изменения, связанные с рассеянием, поглощением, преломлением, изменением степени и ориентации поляризации и скорости распространения. В вакууме и твердых телах эти изменения в основном носят детерминированный характер, а в газах и жидкостях, как правило, и детерминированный, и случайный.

в) *Оптическая система.* Такие системы осуществляют функции первичной обработки информации. При использовании некогерентного излучения функциями оптических систем могут являться формирование изображения, диспергирование излучения по спектральному составу и степени поляризации, расщепление, суммирование и изменение направления распространения потока излучения. При использовании когерентного излучения с помощью оптических систем можно решать весьма сложные задачи по логической и математической обработке информации (интегрирование, дифференцирование, пространственная фильтрация, распознавание образов, преобразование Фурье и т. д.).

г) *Оптический фильтр.* Избирательно пропускает проходящий поток излучения по спектральному составу (по длине волны) в целях улучшения отношения по мощности и энергии между потоками от источников полезного сигнала и от мешающих фонов.

д) *Анализатор изображения, или модулятор.* Преобразует распределение освещенности в пространстве изображений или

распределение яркости в пространстве предметов во временную последовательность проходящего через него потока излучения. Такое преобразование может осуществляться с различными целями: для анализа структуры пространственного и временного распределения энергии излучения в поле излучения, для определения положения отдельных источников (носителей полезного сигнала) в пространстве предметов, для пространственной фильтрации источников полезного сигнала на фоне окружающего поля излучения, для кодирования и декодирования источников полезного сигнала в системах связи и локации, для создания благоприятных условий выделения полезных сигналов из помех в электронном тракте преобразования и усиления.

Если до анализаторов изображения (и модуляторов) информация, содержащаяся в электромагнитном поле, является функцией нескольких переменных (координат, длины волны, степени поляризации, времени), то на их выходе вся информация определяется потоком излучения и может быть полностью задана в виде функции единственной переменной — времени. Иными словами, до анализаторов изображения (и модуляторов) сигналы в ОЭС являются многомерными (зависящими от нескольких аргументов), а после них — одномерными (зависящими от одного аргумента — времени). Эти сигналы и до, и после анализаторов изображения, как правило, представляют собой либо случайные процессы, либо смеси детерминированных и случайных процессов.

е) *Фотоприемник*. В этом устройстве осуществляется преобразование излучения в электрический сигнал. Фотоприемники являются весьма важными элементами ОЭС, определяющими и название этих систем, как оптико-электронных, и их основные характеристики и параметры, такие, как пороговая чувствительность и обнаружительная способность.

В настоящее время существует большое количество типов фотоприемников, отличающихся и физическими принципами работы, и спектральной чувствительностью, и составом элементов, и конструктивным исполнением. Правильный выбор фотоприемников в соответствии с назначением и условиями применения ОЭС представляет одну из важнейших и сложных задач при проектировании ОЭС. Характерной их особенностью является то, что преобразование в них энергии электромагнитного излучения в электрический сигнал носит статистический характер и всегда сопровождается генерацией помех. Поэтому на выходе фотоприемников сигналы всегда описываются случайными функциями.

ж) *Усилитель-преобразователь*. В этом устройстве осуществляется усиление и обработка электрического сигнала. Содержание и последовательность обработки сигналов в нем зависят от конкретного типа ОЭС и решаемых ими задач. Как правило, в этих устройствах осуществляется усиление сигнала по амплитуде и мощности, фильтрация полезного сигнала от помех, решение задач обнаружения и селекции, декодирование, решение спе-

циальных задач, вытекающих из функционального назначения ОЭС. Схемы этих устройств могут быть весьма сложными и включать отдельные электронные и полупроводниковые элементы, многофункциональные микросхемы, большие интегральные схемы, микропроцессоры и даже микроЭВМ. В некоторых случаях в состав систем обработки и усиления могут входить и электро-механические устройства, такие, например, как магнитные и электро-механические усилители и счетно-решающие устройства. Проектирование систем обработки и усиления сигналов представляет сложную и ответственную задачу, так как эти устройства во многом определяют характеристики и параметры ОЭС в целом.

3) *Выходное устройство.* Выполняемые функции и вид этих устройств определяются назначением ОЭС. Это может быть: индикаторное устройство (аналоговое или цифровое); видеоконтрольное устройство, воспроизводящее распределение интенсивности и спектра излучения в пространстве предметов; устройство записи информации в целях ее хранения и последующего анализа или передачи; преобразователь для формирования сигнала в последующую систему управления; исполнительное устройство в виде электро-механического, гидравлического или пневматического привода и т. д.

2. По характеру выполняемых функций все ОЭС можно классифицировать на три типа: информационные, измерительные и следящие.

а) *Информационные ОЭС.* Предназначены они для сбора, обработки, воспроизведения на видеоконтрольном устройстве информации о микроструктуре яркостных полей излучения в различных участках спектра. К этому типу ОЭС относятся: тепловизионные приборы для съемки тепловых карт местности, для медицинской диагностики по распределению температуры кожного покрова и для контроля исправности электронных схем по тепловому рельефу в инфракрасной области спектра; лазерные локаторы; телевизионные устройства, входящие в состав систем технического зрения и систем распознавания объектов и образов и т. д. Эти ОЭС должны с максимальной подробностью и точностью преобразовывать излучение всех деталей объектов и окружающего фона в заданном участке спектра в электрический сигнал, по которому затем может быть восстановлено изображение в видимом участке спектра на видеоконтрольном устройстве или произведен анализ характеристик микроструктуры поля излучения и фонов в целях их идентификации, опознавания или нахождения статистических характеристик распределения яркостного поля. Функциональная схема приемной части ОЭС этого типа изображена на рис. В.2.

Синхронизирующий сигнал, вырабатываемый в блоке развертки изображения, предназначен для привязки пространственного распределения яркости излучения просматриваемого эле-

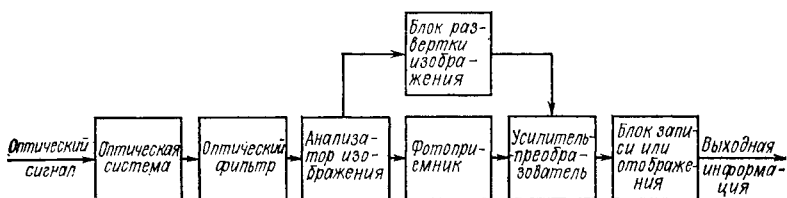


Рис. В.2. Функциональная схема приемной части ОЭС информационного тип

ментарного участка поля обзора и координат этого поля и времени что необходимо для последующей обработки или восстановления изображения.

б) *ОЭС измерительного типа.* Предназначаются для измерения некоторых характеристик и параметров, связанных с излучением отдельных объектов или процессов: координат, размеров, дальности и скорости движения объектов в некоторой системе отсчетов; взаимной ориентации объектов; интегральной и спектральной энергетической плотности, спектрального состава, степени и ориентации поляризации излучения и т. д. Информация о размерах измеряемых характеристик и параметров может быть отображена на индикаторном устройстве, записана в запоминающем устройстве для последующего анализа или, наконец, преобразована в сигнал, удобный для управления подвижными объектами, физическими и технологическими процессами. К этому типу приборов относятся: лазерные дальномеры; измерители радиальной скорости и анемометры; лазерные измерители угловой скорости и углов поворота объектов (лазерные гироскопы); денситометры; вся многочисленная группа спектральных и оптико-физических приборов (спектрофотометры, Фурье-спектрометры, интерферометры, поляриметры и т. д.); приборы для измерения температур и тепловых потоков; приборы для измерения взаимной ориентации объектов и их деформации и т. д. Функциональная схема приемной части таких ОЭС изображена на рис. В.3.

в) *ОЭС следящего типа.* Предназначены для автоматического сопровождения отдельных излучающих (собственным или отраженным излучением) объектов; для поддержания параметров излучения на заданном уровне и для измерения таких параметров

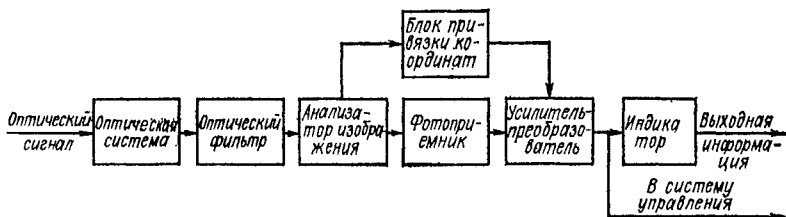


Рис. В.3. Функциональная схема приемной части ОЭС измерительного типа

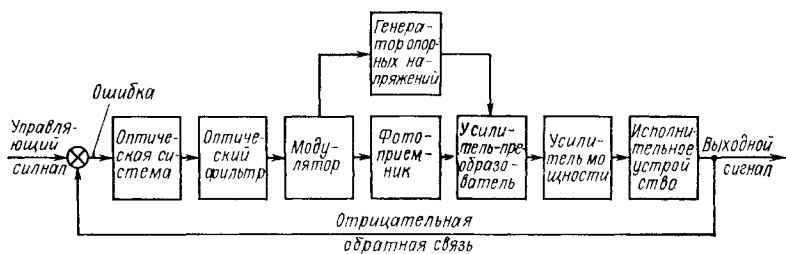


Рис. В.4. Функциональная схема приемной части ОЭС следящего типа

по компенсационной схеме. Характерной особенностью ОЭС этого типа является наличие в их функциональной схеме отрицательной обратной связи, охватывающей все или часть устройств ОЭС, позволяющей устранять рассогласование между входным и выходным значением регулируемой величины (рис. В.4). К этому типу приборов могут быть отнесены: устройства слежения за отдельными малоразмерными источниками излучения (тепловые и лазерные головки самонаведения, астрогиды больших телескопов, автоматические секстанты); устройства для механической обработки деталей по фотокопиру или по чертежу; системы для поддержания заданного режима технологических процессов по интегральному и спектральному составам излучения и т. д.

3. Практически все сигналы, содержащиеся в приходящем на вход ОЭС излучении и затем проходящие через устройства этих систем, наряду с полезной информацией включают помехи, генерируемые как излучением объектов, фонов и окружающей среды, так и элементами самой системы. Уровень этих помех, как правило, очень высок, так как по своей природе процессы генерации излучения, преобразования излучения в электрический сигнал и сам электрический сигнал вследствие формирования их потоками отдельных носителей (фотонов, электронов, «дырок») носят статистический характер. Поэтому нормальное функционирование ОЭС обеспечивается лишь оптимальными методами обработки сигналов на всех этапах их преобразования.

Для приборов информационного типа основная задача обработки заключается в максимальном подавлении помех, маскирующих детали воспроизводимой микроструктуры поля излучения, и в наиболее полном отображении этой микроструктуры на видео-контрольном или в запоминающем устройстве. В качестве критерия для оптимизации обработки структуры и параметров ОЭС информационного типа целесообразно принять количественную меру потери информации на всех этапах ее обработки, воспользовавшись для этого понятиями и методами теории информации.

В приборах измерительного и следящего типов обычно не требуется фиксировать или восстанавливать весь объем информации, содержащейся в потоке излучения обозреваемого пространства

предметов. Чаще всего здесь необходимо измерять некоторые характеристики и параметры излучения одного или нескольких источников, занимающих незначительную часть пространства предметов. Все другие источники, расположенные в этом пространстве, не содержат полезной информации и создают лишь помехи. В связи с этим основной задачей обработки сигналов в ОЭС измерительного типа является наиболее точное измерение характеристик и параметров излучения — носителя полезной информации при максимальном подавлении помех. Это может быть обеспечено лишь путем оптимальной обработки и фильтрации полезного сигнала от помех на всех этапах преобразования в ОЭС: в оптической системе, в анализаторе изображения, в фотоприемнике и в электронном тракте. Алгоритмы и процедуры обработки могут быть построены на базе современной теории статистических оценок, а оптимизация характеристик и параметров измерительных и следящих ОЭС и их элементов, реализующих оптимальную обработку и фильтрацию, может быть осуществлена на базе современной теории автоматического управления и регулирования и метрологических основ теории точности измерительных систем и комплексов.

4. В большинстве случаев для ОЭС характерны два основных режима работы: обнаружения и нормального функционирования.

При работе *в режиме обнаружения*, который может включать этапы поиска, селекции и принятия решения, как полезный сигнал, так и помехи имеют большую статистическую неопределенность, а время, отводимое на обнаружение, — ограничено. Все это требует весьма тщательного выбора критериев селекции и принятия решения, базирующихся на основе теории статистических решений и теории опознавания образов, а также построения и реализации сложных алгоритмов и схем обработки сигналов.

В режиме нормального функционирования, протекающем обычно более длительно, характеристики сигнала и помех вследствие их распознавания и накопления имеют меньшую статистическую неопределенность, что позволяет построить более оптимальную процедуру обработки, применить накопление сигнала или осуществить самонастройку обработки в соответствии с изменением условий работы. Однако при высоких требованиях к точности и быстродействию работы ОЭС и в этом режиме работы должны применяться оптимальные методы обработки сигнала, базирующиеся на современной теории статистических оценок и оптимальной фильтрации в динамических режимах работы.

5. Как отмечалось выше, используемый в ОЭС поток излучения может генерироваться самими процессами и объектами или являться следствием отражения и рассеяния энергии излучения естественных (Солнце, Луна, планеты) или специально организованных (лампы, прожекторы, лазеры) источников. В соответствии с этим ОЭС могут быть пассивными и активными. Достоинством *систем пассивного типа* является отсутствие энергетических

затрат (обычно достаточно больших) на генерацию излучения и трудность обнаружения ОЭС, работающих по собственному излучению объектов. Однако в силу малой плотности энергии собственного излучения и подчас малого отличия его спектральных характеристик от характеристик излучения окружающих фонов пассивные ОЭС обычно имеют большие габаритные размеры и относительно низкую вероятность правильной селекции и обнаружения. С этой точки зрения *ОЭС активного типа* обладают определенными преимуществами, достоинствами которых являются возможность создать необходимый энергетический уровень сигнала, поступающего на вход ОЭС, и возможность придать определенную информационную окраску организованному излучению, что может способствовать облегчению оптимальной обработки сигнала во всех режимах работы. Однако при распространении излучения от источника до объектов локации и далее до приемной части ОЭС часть этого излучения будет отражаться и рассеиваться в среде распространения, создавая мешающий фон и ограничивая дальность действия системы. Кроме того, системы активного типа достаточно легко обнаруживаются, что создает благоприятные условия организации активных помех для работы этих приборов.

Таким образом, можно сделать вывод, что современные оптико-электронные приборы представляют собой сложные автоматические системы, включающие комплекс оптических, механических, электромеханических, вычислительных и электронных устройств высокой точности. В элементах этих систем сигналы претерпевают непрерывные многофункциональные преобразования, связанные с усилением, оптимальной обработкой и обработкой, вытекающей из специфики решаемых задач. При этом основной задачей проектирования ОЭС является такой расчет и выбор структуры, параметров и конструктивных решений, при которых обеспечивается оптимальная обработка сигналов во всех режимах работы и во всем диапазоне измерения полезных сигналов, помех и возмущений, возникающих в условиях эксплуатации. Для этого при проектировании ОЭС необходимо использовать критерии и приемы оптимизации, базирующиеся на современных статистических методах. Изложению математических методов описания процессов преобразования сигналов от пространства предметов до выхода и методов расчета и оптимизации структуры и параметров как отдельных элементов, так и всей ОЭС и посвящена настоящая работа.

ГЛАВА 1. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

§ 1.1. ЛИНЕЙНЫЕ СИСТЕМЫ И МЕТОДЫ ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ

Любая динамическая система с математической точки зрения осуществляет преобразование функций некоторых независимых переменных, описывающих входной сигнал, в другие функции, представляющие выходной сигнал. В одномерных системах входные и выходные сигналы являются функциями одной независимой переменной, а в многомерных эти сигналы являются функциями, зависящими от нескольких аргументов.

Условно одномерная динамическая линейная система может быть представлена в виде элемента (прямоугольника), на вход которого подается сигнал $g(x)$, а на выходе наблюдается сигнал $y(x)$ (рис. 1.1).

В системе осуществляется преобразование одной функции в другую в соответствии с равенствами:

$$y(x) = F\{g(x)\}; \quad (1.1)$$

$$F_y\{y(x)\} = F_g\{g(x)\}, \quad (1.2)$$

где F , F_y , F_g — операторы, определяющие законы преобразования соответствующих функций.

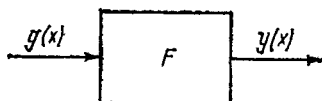
Если система является линейной, то она обладает фундаментальным свойством: выходной сигнал от совокупности входных сигналов равен сумме выходных сигналов от каждого входного сигнала, взятого в отдельности, т. е.

$$F_y\{y(x)\} = \sum_{i=1}^n F_y\{y_i(x)\} = \sum_{i=1}^n F_g\{g_i(x)\}. \quad (1.3)$$

Очень часто при исследовании динамических систем операторами F являются некоторые взвешенные суммы производных соответствующих сигналов от независимых переменных x , т. е.

$$F = a_n \frac{d^{(n)}}{dx^n} + a_{n-1} \frac{d^{(n-1)}}{dx^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{d}{dx} + a_0. \quad (1.4)$$

Рис. 1.1. Условное изображение одномерной динамической линейной системы



Если обозначить $p = d/dx$, то этот оператор условно можно записать так:

$$F = a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0.$$

Например, закон изменения выходного сигнала с помощью этого оператора запишется в виде

$$\begin{aligned} F_y \{y(x)\} &= a_n p^n y(x) + a_{n-1} p^{n-1} y(x) + \dots + a_1 p y(x) + a_0 y(x) = \\ &= (a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0) y(x). \end{aligned} \quad (1.5)$$

Аналогичным образом может быть представлена запись оператора преобразования входного сигнала $F_g \{g(x)\}$. В общем случае коэффициенты $a_n, \dots, a_0$ при производных соответствующего порядка могут зависеть от величины входного сигнала $g(x)$. У линейных систем с постоянными параметрами эти коэффициенты не зависят от входного сигнала.

Как следует из уравнений (1.1) и (1.2), при одном и том же виде операторов F характер изменения выходного сигнала $y(x)$ зависит от закона изменения входного сигнала $g(x)$. Поэтому, чтобы иметь возможность сравнивать динамические характеристики различных динамических систем между собой, в теории систем управления используют несколько типовых входных сигналов $g(x)$, которые и вызывают реакции $y(x)$, полностью определяющие свойства этих систем. Наиболее часто в качестве таких типовых входных сигналов используют импульсный, единичный ступенчатый и гармонический сигналы.

Под *импульсным* подразумевается сигнал, описываемый δ -функцией Дирака, обладающей следующими свойствами:

$$\delta(x - x_0) = \begin{cases} \infty & \text{при } x = x_0; \\ 0 & \text{при } x \neq x_0; \end{cases} \quad (1.6)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x - x_0) dx = 1; \quad (1.7)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(x) \delta(x - x_0) dx = \varphi(x_0); \quad (1.8)$$

$$\delta(ax) = \delta(x)/a. \quad (1.9)$$

Функция $w(x)$, описывающая поведение выходного сигнала $y(x)$ при подаче входного сигнала в виде δ -функции Дирака $g(x) = \delta(x - x_0)$ (рис. 1.2), называется *функцией веса*, или *импульсной характеристикой* линейной системы.

В дальнейшем для упрощения будем полагать, что $x_0 = 0$, т. е. импульсная функция приложена в начале координаты x .

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru