

И.И. Вельджанов, И.А. Малевич, С.И. Чубаров, А.К. Ясаков

СТРУКТУРНЫЕ МОДЕЛИ ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ С ВЫСОКИМ
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ
(СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД)

Многообразие эвристических схем построения лазерных систем (ЛС) вызывает значительные затруднения при определении предельных возможностей лазерных методов, особенно в задачах, где необходима статистическая обработка информации и большой объем вычислительных процедур.

Применив системный подход, развитый в [1,2] при разработке структур информационно-измерительных систем высокого разрешения, авторы рассмотрели структурные модели* основных классов ЛС с высоким пространственно-временным разрешением, широко используемые в задачах лазерной хронометрии и спектроскопии, локации и задачах дистанционного изучения оптических характеристик окружающей среды.

Предлагаемая классификация структурных моделей ЛС [3] основывается на анализе математической модели** объекта исследования, $M = F(U(t,r))$ (где $F(U)$ — оператор функционирования ЛС при регистрации пространственно-временного процесса $U(t,r)$), а также на анализе флуктуации характеристик объекта исследования $D \in D(D(t), D(\lambda))$ с учетом изменения динамического диапазона спектральных $D(\lambda)$ и временных $D(t)$ характеристик объекта.

Поскольку рассматриваются ЛС с большим объемом измерительной информации, построение структурных моделей требует определения количества и вида используемых в ЛС измерительных и вычислительных алгоритмов $\alpha = \{A_u(t), A_v(t)\}$ и, что особенно важно, тре-

* Структурная модель ЛС — формальное описание функционального построения объекта (ЛС) при помощи стандартных физически реализуемых оптико-электронных средств, составляющих основу ЛС и отражающих взаимосвязь средств в объекте.

** Математическая модель объекта исследования — формальное описание объекта или явления при помощи функциональных или логических операторных соотношений, алгебраических, интегральных, дифференциальных уравнений, которые отражают физический смысл объекта или явления.

бует определения эталонов $\Delta d \in \{\Delta_0\}$, необходимых и достаточных для достижения целей и задач, решаемых ЛС.

Независимо от типа оптической схемы ЛС (моностабильной, бистабильной, дифференциальной или интерферометрической [4]) нами выделено три основных класса ЛС: лазерные системы контроля (ЛСК), лазерные диагностические системы (ЛДС) и лазерные измерительные анализаторы (ЛИА). В качестве критерия классификации взят уровень получаемой информации об исследуемом объекте. В принципе все ЛС содержат лазерные источники излучения, системы фотодетектирования и собственно измерительные и вычислительные преобразователи исследуемых процессов, но функциональное назначение, а значит, и их реализация различны для каждого из классов ЛС.

Обобщенная структурная модель ЛСК представлена на рис.1.

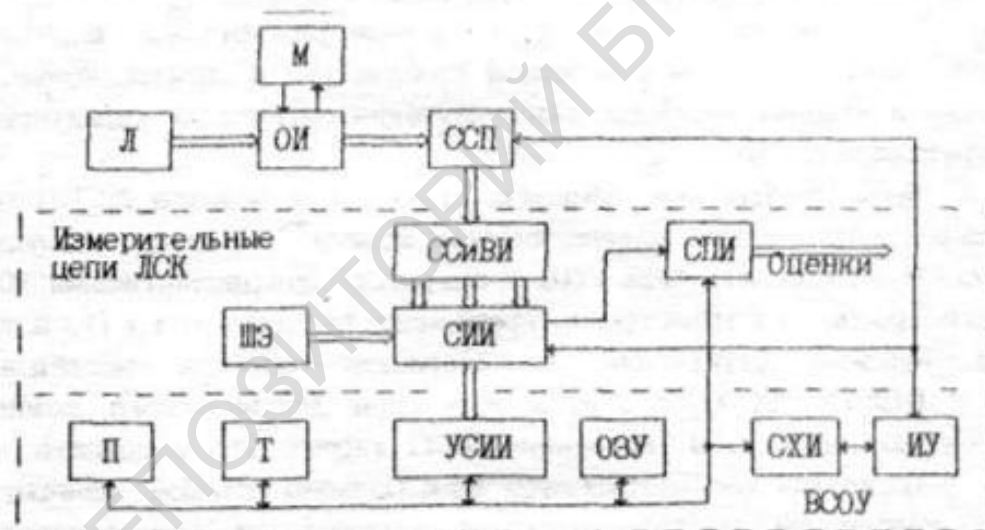


Рис.1. Обобщенная структурная модель ЛСК:

Л - лазерный источник излучения; М - математическая модель объекта исследования; ОИ - объект исследования; ССП - сенсоры светового поля; ССИВИ - средства сбора и восприятия информации; СИИ - средства измерения информации; СПИ - средства представления информации; ШЭ - шкала эталонов; ВСОУ - вычислительная система обработки и управления; П - процессор; Т - терминал; УСИИ - устройство сбора измерительной информации; СХИ - средства хранения информации; ИУ - интерфейс управления; ОЗУ - оперативное запоминающее устройство

Применение данной обобщенной модели целесообразно, когда исследуемый объект (ОИ) или явление характеризуется следующими основными признаками: математическая модель объекта исследования ап-

риорно известна и не должна изменяться в процессе функционирования ЛС, т.е. $M = \text{const}$; D – динамический диапазон рабочих параметров объекта исследования фиксирован и отсутствуют флуктуации их границ $D = [d_{\min}(t) = \text{const}; d_{\max}(t) = \text{const}]$, превышающие ширину аппаратной функции ЛСК. При данных условиях для реализации основной процедуры функционирования ЛСК требуется фиксированный набор эталонов, $\Delta\lambda = \text{const}$ при жестко определенных измерительных $A_{\lambda}(t)$ и вычислительных $A_{\nu}(t)$ алгоритмах функционирования ЛСК, т.е. $a = \text{const}$.

ЛСК в основном предназначены для контроля спектральных и временных параметров фотодетекторов излучения, параметров волоконной оптики и оценки оптических потерь в оптически прозрачных средах и оптических элементах. Для этих целей необходимы ЛС с высокой разрешающей способностью порядка 10^{-11} с и линейностью временной шкалы около 1%, но эти параметры необходимо реализовать лишь в узком временном диапазоне 10–50 нс или фиксированном спектральном диапазоне $\Delta\lambda$. Структурная модель ЛСК достаточно проста, это связано с тем, что диапазон контролируемых характеристик объекта исследования известен, а алгоритм функционирования ЛСК однозначно определен заранее. В ЛСК обычно применяются системы стабилизации одночастотных лазерных источников оптического излучения, а также используется хранение в виде кодов цифровых эквивалентов контролируемых параметров ($\Delta\lambda \Rightarrow \text{код}$), что позволяет сократить объем обрабатываемой информации до уровня простых статистических решений, различающихся по степени достоверных оценок, позволяющих произвести оценку контролируемого параметра. В качестве вычислительной системы обработки и управления в ЛСК могут применяться как специализированные ЭВМ, так и различные микро-ЭВМ или персональные компьютеры, дополненные элементами связи с измерительными цепями ЛСК – интерфейсами управления, средствами хранения информации большой емкости и устройствами сбора измерительной информации, представляющими собой двухпортовые оперативные запоминающие устройства (ОЗУ) высокого быстродействия.

ЛС, в отличие от ЛСК, характеризуются сложным алгоритмом функционирования из-за необходимости многопараметрического анализа состояний объекта исследования. Данная сложность обусловлена выполнением совокупности измерительных процедур на различных частотах оптического спектра и дополнительным привлечением мето-

дов анализа временных параметров процессов, дополнительных методов типа амплитудного анализа энергетических параметров сигналов, анализа формы сигналов, многомерного анализа процессов и полей. Одним из основных требований, предъявляемых к ЛДС, является требование высокого спектрального или амплитудно-временного разрешения. Так, в ЛДС лидарного назначения рабочий диапазон интенсивностей входного потока составляет 120–140 дБ. Для ЛДС данного типа характерно требование проведения измерения параметров лазерного источника излучения во время цикла измерения и анализ массива измерительной информации, полученной по совокупности измерительных процедур. Данный анализ выполняется в вычислительной системе, которая производит либо обнаружение некоторых дифференциальных признаков объекта по результатам измерения, либо сравнение со статистическими "портретами" (образами) диагностируемых событий, хранящимися в памяти специализированного ВСОУ. Разработанная обобщенная структурная модель ЛДС представлена на рис. 2. Применение данной обобщенной модели целесообразно, когда ОИ характеризуется следующими признаками: математическая модель объекта не постоянна в процессе диагностики и известна лишь приближенно, т.е. $M \neq \text{const}$; динамический диапазон рабочих параметров существенно изменяется за время диагностики, т.е. $D = \text{var}$ и для их оценивания требуется как изменение параметров лазерного излучения (частоты $\lambda_1, \dots, \lambda_n$, длительности импульсов $\Delta t_1, \dots, \Delta t_n$ и др.), так и многофункциональное изучение ОИ. В данных условиях наличие в ЛС фиксированной шкалы эталонов не является достаточным и требуется введение перестраиваемой шкалы эталонов $\Delta l = \text{var}$ и набора эталонных образов, как правило, в виде статистических распределений диагностируемых параметров ОИ. Вычислительная система обработки и управления ЛДС должна иметь переменный набор измерительных и вычислительных алгоритмов $A_c = \text{var}$ и $A_v = \text{var}$ и более сложную организацию. Отличие структурной модели ЛДС от модели ЛСК, кроме того, заключается во введении цепи обратного воздействия на ОИ и лазерный источник с целью полного выявления и диагностики свойств объекта, а также во введении средств поиска и стандартизации информации в структуре измерительных цепей ЛДС.

В ЛДС требуется производить большие объемы вычислений при высокой скорости поступления измерительной информации на ВСОУ. Как следствие, ВСОУ должна обладать высокой производительностью.

Необходимость высокой производительности следует из того, что нахождение некоторых признаков ОИ, а также сравнение со статистическими "портретами" (образами) требует выполнения большого числа вычислительных операций за достаточно короткое время, связан-

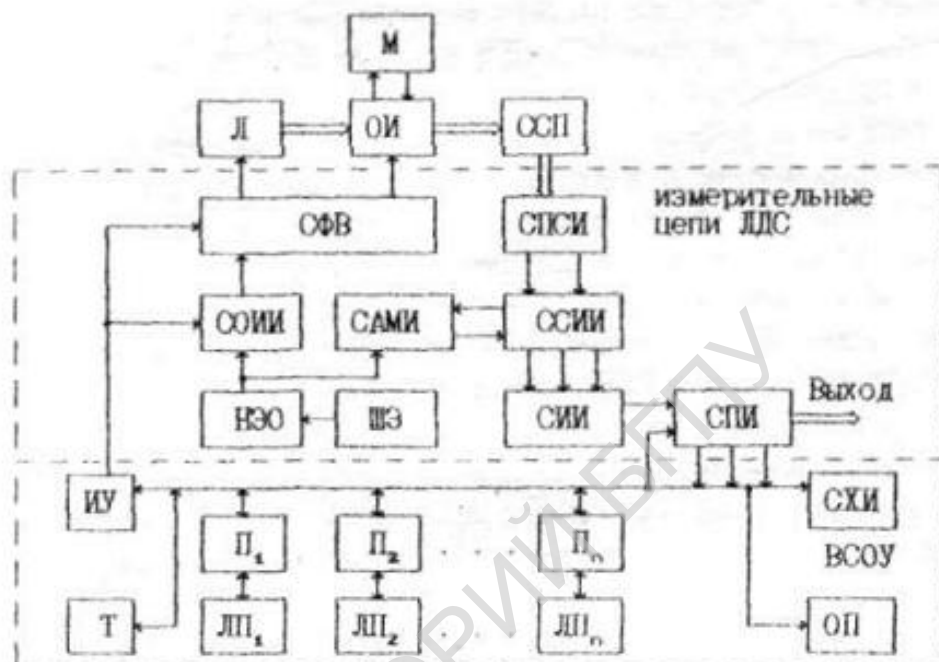


Рис. 2. Обобщенная структурная модель ЛДС;

СПСИ - средства поиска и сбора информации; СОИИ - средства стандартизации измерительной информации; САМИ - средства анализа массивов информации; СОИИ - средства обработки информации; ОФВ - средства формирования воздействий; НЭО - набор эталонных образов; П - процессор; ИУ - интерфейс управления; Т - терминал; СХИ - средства хранения информации; ОП - общая память; ЛП - локальная память; остальные обозначения см. на рис. 1

ное с высокой частотой выполняемых ЛДС измерительных процедур. Кроме того, ВСОУ должна выполнять функции управления ЛДС для автоматизации процесса измерений. Требование высокой производительности ЛДС выдвигает необходимость структурного построения микропроцессорных ВСОУ, отличного от широко используемого в вычислительной технике. Многопроцессорные ВСОУ могут иметь разное структурное построение, различающееся способом связи, организованной между процессорами (межпроцессорной связи). При этом можно выделить три класса многопроцессорных систем для ЛДС: с общей памятью, с коммутаторами и типа "гиперкуб".

Многопроцессорные ВСОУ с общей памятью, широко используемые в ЛДС, характеризуются простотой технической реализации. В системах такого типа всегда имеется ограничение на число процессоров, связанное со способностью общей памяти удовлетворить запросы на обслуживание от процессоров системы. Обычно общее число процессоров не превышает 16, ибо с увеличением числа процессоров резко падает их производительность из-за задержек, возникающих в результате разрешения конфликтных ситуаций при одновременном обращении нескольких процессоров к общей памяти. Дополнительное подключение к каждому из процессоров локальной памяти улучшает показатель производительности, при этом общая глобальная память используется как для передачи сообщений между процессорами, так и для хранения данных и результатов вычислений, необходимых для всех процессоров системы. Достоинством таких систем является простота организации параллельных вычислений над общим блоком данных.

Лазерные измерительные анализаторы охватывают наиболее сложный и распространенный класс ЛС. Особенностью ЛИА, определяющей их структурное построение, является то, что информационный поток от ОИ, инициированный лазерным излучением, представляет собой, как правило, смесь сигнала и шума и основные процедуры ЛИА отличаются от измерительных процедур ЛСК и ЛДС. Измерительные алгоритмы ЛИА строятся по принципу последовательного решения взаимосвязанных задач: обнаружение - измерение характеристик потока - оценивание характеристик ОИ. Все это определяет специфику построения структурной модели ЛИА (рис.3). Использование данной модели правомерно при изучении ОИ, математическая модель которых неизвестна или модель является стохастической, т.е. $M = \text{var}$. В данной ситуации динамический диапазон рабочих параметров ОИ априорно не известен и обычно изменяется в процессе проведения эксперимента $D = \text{var}; D \neq \text{const}$.

Отличительной особенностью структурной модели ЛИА является наличие развитых средств поиска, спектральной селекции и стандартизации исследуемого потока $X(t, \lambda) = S(t, \lambda) + U(t, \lambda)$ предшествующих средствам измерения параметров исследуемых процессов, а также наличие средств анализа и накопления данных, необходимых для принятия решения, о наличии в измеряемом спектральном потоке информационных характеристик, принадлежащих ОИ. Решение задачи обнаружение - измерение - оценивание для случая $M = \text{var}$ невозможно

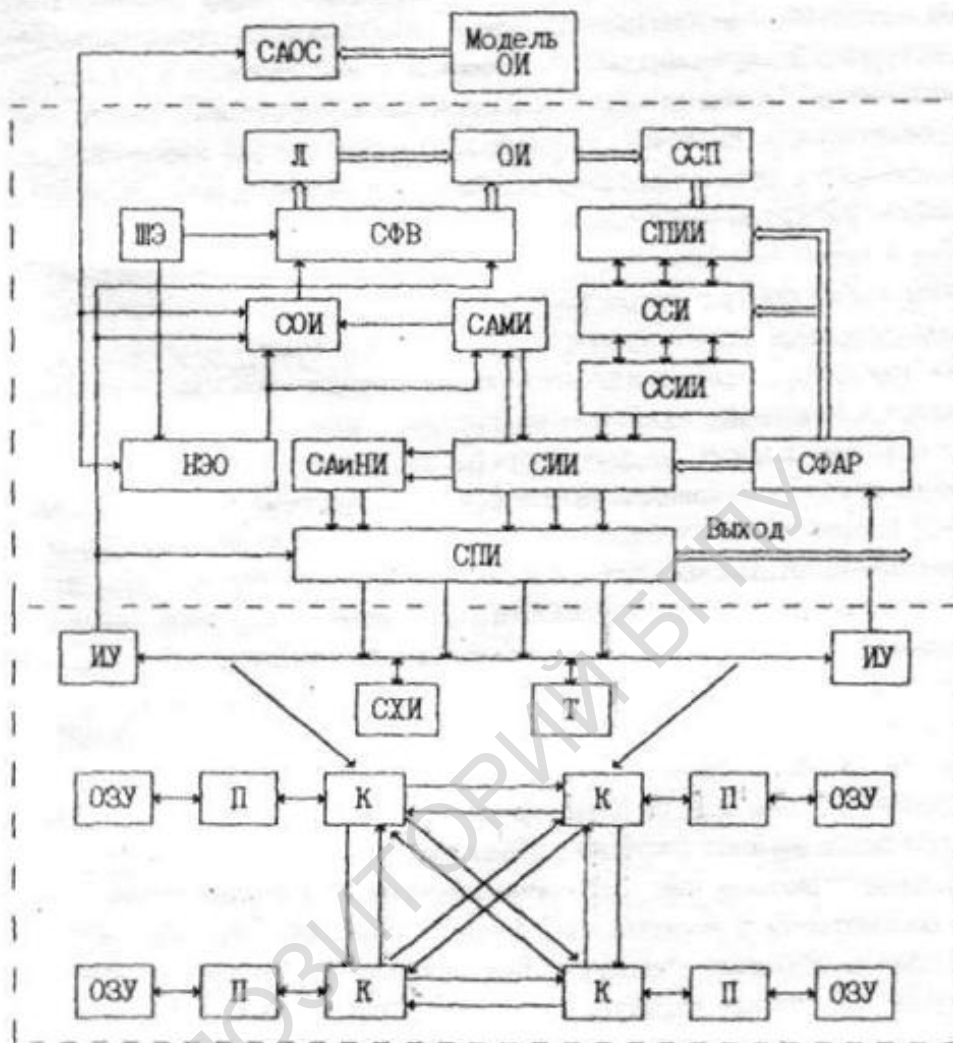


Рис. 3. Обобщенная структурная модель ЛИА :

САОС - средства анализа окружающей среды; СПИИ - средства поиска измерительной информации; ССИ - средства селекции информации; ССИИ - средства стандартизации измерительной информации; К - коммутатор; САИНИ - средства анализа и накопления информации; остальные обозначения см. на рис. 1 и 2

без параллельного экспериментального канала и средств анализа окружающей среды, а также без развитых аппаратных $A_{и-ваг}$ и вычислительных $A_{в-ваг}$ алгоритмов ЛИА и перестраиваемого набора эталонов $\Delta_{л-ваг}$. Как правило, в ЛИА используются перестраиваемые по частоте и энергетике лазеры, а также наборы лазерных источников

непрерывного и импульсного типа с управляемыми параметрами. В качестве ВСОУ в ЛИА целесообразно использовать многопроцессорные системы с коммутаторами. В таких системах связь между процессорами осуществляется через N -канальные коммутаторы, где N – число процессоров в системе, с помощью которых каждый процессор может осуществить прием-передачу сообщений с любым процессором в системе. При увеличении числа процессоров производительность системы растет по закону, близкому к линейному, однако сложность системы также быстро возрастает (из-за необходимости построения все более сложных коммутаторов). Системы с коммутаторами надежны, так как отказ одного или нескольких процессоров не приводит к катастрофическому отказу всей системы, при этом лишь снижается производительность за счет перераспределения вычислительной нагрузки между оставшимися процессорами в системе.

Разработанные обобщенные структурные модели трех основных классов ЛС открывают возможность определения аппаратных функций ЛС практически любой сложности, а также позволяют объективно оценить предельные возможности лазерных методов на всех этапах преобразования информации в системе.

Отметим далее, что любую ЛС можно (условно) разделить на две части: 1) энергетическую, 2) информационную. В данной работе в основном речь шла об информационной части ЛС. Конечным результатом исследования явления, объекта с помощью ЛС являются формируемые выводы о нем. Лазерные системы, предназначенные для этого, рассмотрены с позиций системного подхода. Другим аспектом, который необходимо учитывать при анализе ЛС, является стохастический, случайный характер данных, обрабатываемых ЛС. Эта случайность обусловлена множеством факторов, среди которых в качестве основных можно выделить: случайный характер излучения лазера, обусловленный квантовомеханическими эффектами, случайный характер взаимодействия лазерного излучения с ОИ (объект исследования также может иметь стохастическую природу), квантовомеханические эффекты детектирования оптической энергии и воздействие шумов, случайные процессы преобразования и обработки потоков сигналов в ЛС, обусловленные, в частности, случайным характером преобразования и округления чисел из-за конечности разрядной сетки, сбоями, шумами и флуктуациями электронных схем и т.д. Для анализа и синтеза ЛС, таким образом, необходимо применять аппарат, учитывающий стохастический, случайный характер этих процес-

сов - аппарат теории вероятностей и математической статистики, теории случайных процессов, теории статистических выводов. При этом выводы, осуществляемые с помощью ЛС, должны формироваться с применением теории статистического оценивания параметров, теории проверки статистических гипотез, теории распознавания образов.

В построении ЛС необходимо применение и статистического подхода [5] для всестороннего анализа и синтеза ЛСК, ЛДС и ЛИА.

Литература

1. Каверкин И.Я., Цветков Э.И. Анализ и синтез измерительных систем. - Л.: Энергия, -1974. -155с.
2. Малевич И.А. Методы и электронные системы анализа оптических процессов. - Мн.: Изд-во БГУ им. В.И. Ленина. -1981. -324с.
3. Вельджанов И.И., Малевич И.А. Структурные модели лидарных систем анализа сложных по составу сред // Тез. докл. 10-го Всесоюз. симп. по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. -Томск, 1988. - 291с.
4. Иванов В.И., Малевич И.А., Чайковский А.П. Многофункциональные лидарные системы. - Мн.: Университетское, 1986. -287с.
5. Ясаков А.К., Вельджанов И.И. Обработка сигналов обратного рассеяния в лазерных системах (статистический подход) // Настоящий сб. - С.43-55.