

## АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СТРУКТУР АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ РАССЕИВАЮЩИХ СРЕД (СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД)

М.М.Кутейко, И.А.Малевич, С.И.Чубаров

Потребность в систематических и детальных измерениях оптических и микрофизических характеристик окружающей среды требует использования автоматизированных измерительных систем. Существующее многообразие эвристических схем построения систем диагностики атмосферы, воды вызывает значительные затруднения при определении их предельных возможностей. С целью обобщения подходов анализа данных систем в [1–2] развит системный подход, основанный на классификации их структурных моделей (под структурной моделью оптической измерительной системы (ИС) понимается формальное описание функционального построения объекта при помощи стандартных физически реализуемых оптико-электронных средств, составляющих основу ИС и отражающих взаимосвязь средств в объекте [2]). В предлагаемой в [2] классификации структурных моделей используется математическая модель объекта исследования  $M = F\{U(t,r)\}$ , где  $F(U)$  – оператор функционирования ИС при регистрации пространственно-временного процесса  $U(t,r)$ , включая флуктуации характеристик объекта  $D \in D\{D(t), D(\lambda)\}$  как в динамическом диапазоне временных характеристик  $D(t)$ , так и спектральных  $D(\lambda)$ .

Поскольку рассматриваются ИС с большим объемом измерительной информации построение структурных моделей требует определения количества и вида используемых в ИС измерительных и вычислительных алгоритмов  $\alpha \in \{A \bullet U(t), A \bullet V(t)\}$ , и, что особенно важно, определения эталонов  $\Delta n \in \{\Delta_0\}$ , необходимых и достаточных для достижения целей и задач, решаемых ИС. Независимо от типа оптической схемы ИС в [2] выделяются три основных класса ИС: лазерные системы контроля (ЛСК), лазерные диагностические системы (ЛДС) и лазерные измерительные анализаторы (ЛИА). В качестве критерия классификации взят уровень получаемой информации об исследуемом объекте.

Обобщенная структурная модель ЛСК (в рамках формализма, принятого в [1–2]), характеризуется следующим образом: математическая модель объекта исследования априорно известна и не должна изменяться в процессе функционирования ИС, т.е.  $M = \text{const}$ ;  $D$  – динамический диапазон параметров объекта исследования фиксирован и отсутствуют флуктуации их границ  $D \in [d_{\min}(t) = \text{const}, d_{\max}(t) = \text{const}]$ .

При данных условиях для реализации основной процедуры функционирования ЛСК требуется фиксированный набор эталонов  $\Delta n = \text{const}$  при жестко определенных измерительных  $A \bullet U(t)$  и вычислительных  $A \bullet B(t)$  алгоритмах функционирования ЛСК, т.е.  $\alpha = \text{const}$ .

Лазерные диагностические системы (ЛДС) характеризуются следующими признаками: математическая модель объекта исследования 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 измерение параметров излучения ( $\lambda, \Delta t$  и т. п.), так и многофункциональное изучение объекта. В данных условиях наличие в ИС фиксированной шкалы эталонов не является достаточным и требуется введение перестраиваемой шкалы эталонов  $\Delta n = \text{var}$  и набора эталонных образов, как правило, в виде статистических распределений диагностируемых параметров. Система обработки и управления ЛДС должна иметь переменный набор измерительных и вычислительных алгоритмов  $A \bullet U = \text{var}$  и  $A \bullet B = \text{var}$  и более сложную организацию. Отличие структурной модели ЛДС от модели ЛСК, кроме того, заключается во введении цепи обратного воздействия на объект исследования и источник излучения с целью полного выявления и диагностики свойств объекта, а также во введении средств поиска и стандартизации информации о структуре измерительных цепей ЛДС.

Лазерные измерительные анализаторы охватывают наиболее сложный и распространенный класс ИС. Особенностью ЛИА, определяющей их структурное построение, является то, что информационный поток от объекта исследования, инициируемый 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 объекта исследования. Использование данной структуры правомерно при изучении объектов математической модель которых неизвестна или модель является статистической, т.е.  $M = \text{var}$ . В данной ситуации динамический диапазон параметров объекта исследования не известен и обычно изменяется в процессе проведения эксперимента  $D = \text{var}$ ,  $D \neq \text{const}$ . Решение задачи обнаружение — измерение — оценивание для случая  $M = \text{var}$  требует параллельного экспериментального канала и средств анализа окружающей среды, а также развитых аппаратных  $A = \text{var}$  и вычислительных  $B = \text{var}$  алгоритмов ЛИА и перестраиваемого набора эталонов  $\Delta n = \text{var}$ .

Включение в классификацию структурных моделей существующих автоматизированных (и неавтоматизированных) ИС признаков, характеризующих математическую модель  $M$  объекта исследования является объективно необходимым. Обуславливается это тем, что интерпретация результатов измерений оптических и микрофизических характеристик рассеивающих сред требует использования априорной информации, которая может быть получена введением дополнительного экспериментального канала, либо введением допущений или связи между параметрами, влияющими на регистрируемый сигнал (соответствует заданию модели исследуемого объекта) [3–4]. Особенно актуально решение отмеченных только что задач для локационных дистанционных измерений, так как для них дальнейшее совершенствование (доведение до возможности метрологической аттестации) упирается в настоящий момент в основном в интерпретацию измеряемых сигналов [5]. В связи с только что изложенным очевидно постановка и решение следующей задачи — исключение использования априорной информации и дополнительных измерительных каналов в ИС (эквивалентно исключению математической модели объекта исследования).

Затрудняет автоматизацию измерительных оптических систем и необходимость проведения во многих случаях частых калибровочных измерений (требуется наличие шкалы эталонов и набора эталонных образцов) [5–6]. Для дистанционных методов данная проблема усложняется необходимостью установления опорных (калибровочных) значений измеряемых параметров [5]. Желательно также устранение зависимости от динамического диапазона измеряемых характеристик.

В связи с вышеизложенным обобщенная структурная модель любого из выделенных в [2] классов ИС не должна включать процедуру описания модели объекта ( $M$ ) и использования эталонов ( $\Delta n$ ), а также быть минимально чувствительной к динамическому диапазону характеристик объекта ( $D$ ). Другими словами, новый класс ИС не должен включать методических погрешностей, обусловленных только что названными причинами. Так как методические погрешности являются следствием недостаточной разработанности теории тех явлений, которые положены в основу измерений, то они имеют наибольший вес и наиболее трудно устранимы. Очевидно отсюда необходимость развития теории до состояния, позволяющего исключить  $M$ ,  $\Delta n$ , минимизировать зависимость структур от  $D$ . Естественно, что данные теоретические разработки должны являться основой синтеза структур новых ИС, включающих реализацию только измерительного и вычислительного алгоритмов  $a \in \{A \cdot U(t), A \cdot B(t)\}$ , что в наибольшей степени удовлетворяет полной автоматизации процесса измерений.

Наиболее полно разработка научных основ исключения  $M$ ,  $\Delta n$ , минимизации зависимости структур от  $D$  изложена в [7]. В частности показано, что решение проблемы опорных точек в дистанционных измерениях на основе определения локальных и интегральных значений определяемых характеристик методом перекрывающихся функционалов для сигналов обратного рассеяния, информативных относительно определяемых параметров, коррекция сигналов на степень изменения качественного состава среды, исключение влияния границ раздела сред, устойчивость к многократному рассеянию позволяют повысить точность измерений оптических характеристик дистанционными методами до уровня количественных измерений (погрешность единицы процентов). Известные же методы в сложных неоднородных средах давали качественный результат (до десятков процентов) [8]. Устранение основных методических погрешностей в предлагаемых в [7] методах и совершенствование алгоритмов определения опорных значений (без проведения дополнительных независимых измерений) дают возможность устойчиво восстанавливать количественное значение определяемых характеристик с высокой точностью (единицы %), а значит, и метрологически аттестовать измерительную локационную систему. Следует подчеркнуть, что рассмотренные в [7] вычислительные алгоритмы ИС разрабатывались для условий отсутствия априорной информации о исследуемой среде.

В динамических методах [7,9], основанных на измерении с подвижных локационных ИС, погрешность определения оптических характеристик обуславливается погрешностью измерения регистрируемых сигналов и погрешностью отслеживания общих рассеивающих точек. Учитывая возможность статистической обработки регистрируемых сигналов при одной посылке зондирующего импульса, наличие возможностей уменьшения погрешностей отслеживания общих рассеивающих объемов погрешность определения оптических характеристик легко довести до требуемой величины (при экспериментальной проверке динамического метода погрешность определения прозрачности составляла 2% при использовалось 15 общих рассеивающих точек, что соответствует погрешности наиболее точного метода — базисного, используемого в качестве эталонного [9]). Увеличивая число используемых рассеивающих точек погрешность метода можно довести до уровня, превышающего погрешность эталонного. И в данном случае (для динамического метода) устраняются препятствия для метрологической аттестации. Обуславливается это устранением методических погрешностей за счет решения проблемы исключения использования априорной информации путем доопределения эксперимента движением и возможностью статистической обработки без накопления сигналов.

В локальной диагностике рассеивающих сред базисными и нефелометрическими методами измерительные системы метрологически аттестовываются [6]. Точность измерения оптических характеристик данными системами ограничивается точностью установления калибровочных констант. Так как эти константы с течением времени и изменением условий эксперимента изменяются, то очевидна невысокая достоверность получаемых результатов, особенно в отсутствии надежной защиты оптических элементов от загрязнений, влаги и т.п. Для многих эксплуатационных условий (агрессивные, быстроизменяющиеся и т.д., при непрерывном контроле) данные системы даже неприменимы.

В разработанных в [7] "бескалибровочных" измерительных системах упомянутые только что недостатки устраняются, т.е. использование эталонов в калибровочных измерениях исключается. Устраняется, таким образом, главная методическая погрешность методов. Погрешность измерений оптических характеристик данными методами определяется только погрешностью регистрируемых сигналов, причем все вносимые помехи (изменения аппаратурных констант, окружающей среды и т.п.) отрабатываются измерительной системой и не влияют на результат измерений. Так как для этих методов не существует принципиальных ограничений в повышении точности измерения регистрируемых сигналов, то очевидна возможность создания принципиально новой метрологической базы при определении оптических характеристик.

Исключение использования априорной информации (модели исследуемого объекта), калибровочных измерений, включая опорные для дистанционных методов, значительно улучшает и возможности автоматизации процесса измерений оптических и микрофизических характеристик атмосферы и воды. Действительно, так как решение проблемы априорной информации исключает использование дополнительного экспериментального канала или введения модели исследуемого объекта, а решение проблемы калибровки (включая и проблему опорных значений) исключает применение эталонных средств, то очевидно, что данные методы не требуют прерывания процесса исследования для калибровочных измерений и получения информации дополнительными независимыми методами, а значит, являются наиболее соответствующими полной автоматизации процесса измерений (вплоть до оперативного получения результата в реальном времени). Если перейти к формализму [2], то изложенное выше, приводит к тому, что структурная модель системы определения оптических характеристик описывается следующим образом:  $D = \text{var}$ ,  $A \bullet U(t) = \text{var}$ ,  $A \bullet B(t) = \text{var}$ . Данная структурная модель не включает математическую модель объекта исследования (M), а также наличие эталонов ( $\Delta n$ ), присущее всем известным классам измерительных систем (ЛСК, ЛДС, ЛИА). Например, обобщенная стру-

ктурная модель стационарной автоматизированной локационной системы может быть представлена следующим образом (рис. 1). Не включает оптоэлектронных средств обнаружения и оценивания объекта исследования, средств для проведения калибровочных и опорных значений. Исключается использование и математической модели объекта исследования. В структурной модели локационной автоматизированной системы [2], не использующей предлагаемые в [7] разработки, оптоэлектронные средства, выполняющие только что отмеченные функции (обозначены штриховыми линиями на рис.1), обязательно присутствуют. Вычислительные алгоритмы, используемые в данной ИС (рис. 1), описаны в [7].

Новым в структуре системы, изображенной на рис. 1, является и наличие СФПИС ( средств формирования параметров измерительной системы) и СУРИВИ (средств управления режимом и временем измерения). Функция первых заключается в адаптации (без использования априорной информации) параметров измерения сигналов к объекту исследования. Данная проблема вытекает из необходимости согласования пространственного (временного) разрешения с параметрами измерительной системы, объекта и метода измерения. Математические алгоритмы, устанавливающие связь между названными параметрами, получены из условия ( $\Delta < \Delta S/2$ ), где  $\Delta = S - S_{\text{ист}}$ ,  $S_{\text{ист}}$  истинное значение сигналов. Это неравенство является условием максимально допустимой погрешности измерений. В противном случае можно получить физически бессмысленные результаты (отрицательное значение для коэффициента ослабления, прозрачность больше единицы).

Разность сигналов  $\Delta S$  можно представить в следующем виде:

$$\Delta S = S_1 - S_2 = AP_{0g\pi} \varepsilon \exp \left\{ -2 \int_0^{R_1} \varepsilon(r) dr \right\} \left[ \exp \left\{ -2 \int_{R_1}^{R_2} \varepsilon(r) dr \right\} - 1 \right], \quad (1)$$

Абсолютная ошибка измерения сигнала  $\Delta = \delta S \cdot S$ , где  $\delta S$  погрешность измерения сигнала, равна

$$\Delta = \delta S \cdot AP_{0g\pi} \varepsilon \exp \left\{ -2 \int_0^{R_1} \varepsilon(r) dr \right\}, \quad (2)$$

Подставляя (1) и (2) в неравенство  $\Delta < \Delta S/2$ , получаем

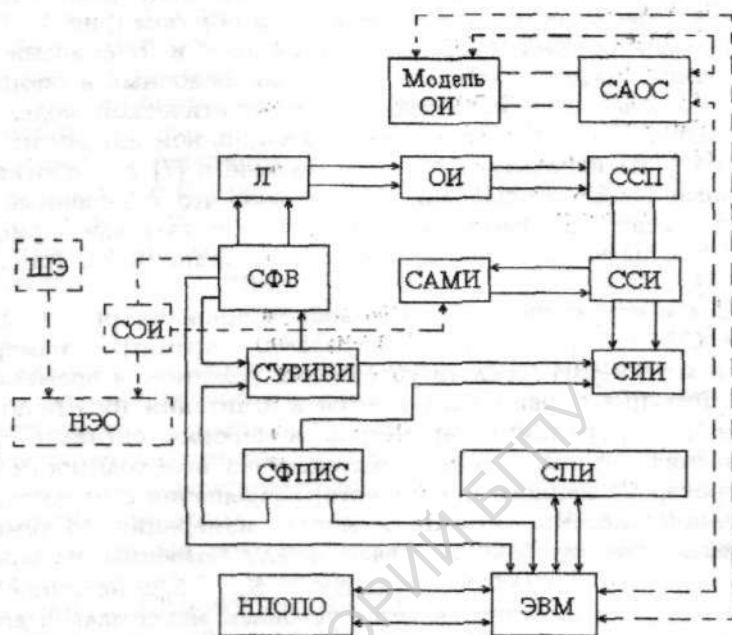


Рис.1. Структурная модель автоматизированной локационной станции. Л—лазер; ОИ—объект исследования; ССП—сенсоры светового поля; СФВ—средства формирования воздействия; САМИ—средства анализа массивов информации; СУРИВИ—средства управления режимом и временем измерения; ССИ—средства измерения информации; СФИИС—средства формирования параметров измерительной системы; СПИ—средства представления информации; НПОПО—набор проблемно-ориентированного программного обеспечения; ШЭ—шкала эталонов; НЭО—набор эталонных образцов; СОИ—средства обработки информации; САОС—средства анализа окружающей среды; ССИ—средства селекции информации.

$$2\delta\mathcal{S} < \exp\left\{-2\int_{R_1}^{R_2} \varepsilon(r) dr\right\} - 1, \quad (3)$$

Из (3) легко приходим к следующему соотношению:

$$-0.5 \ln(1 - 2\delta\mathcal{S}) < \tau, \quad (4)$$

или же

$$\frac{S_M}{7.8} \ln(1 - 2\delta\mathcal{S}) < \Delta R, \quad (5)$$

где  $\Delta R = R_2 - R_1$ ,  $S_M = 3,9/\varepsilon$ , метеорологическая дальность видимости.

Полученные соотношения (4) и (5) выражают зависимость между пространственным разрешением, необходимой погрешностью измерения сигналов рассеяния и оптической плотностью среды. Зная возможность измерительной аппаратуры, можно из (4) и (5) устанавливать минимальное  $\Delta R$  для различных ситуаций.

Таким образом, реализация функций полученных алгоритмов с помощью ЭВМ и СФПИС в измерительной системе позволяет автоматизировать и адаптивную перестройку пространственного (временного) разрешения в процессе измерения. При заданных значениях погрешности измерения сигналов обратного рассеяния при первой посылке зондирующего импульса на различных участках, соответствующих слоям исследуемой среды, вычисляется значение метеорологической дальности видимости  $S_M = 3,9/\varepsilon$ . В зависимости от величины  $S_M$  выбираются свои (для каждого слоя) значения пространственного (временного) разрешения  $\Delta R$ . Дальнейшее уточнение величины  $\Delta R$  на различных участках проводится аналогичным образом при последующих послылках зондирующих импульсов. При этом значения  $S_M$  будут получаться точнее, поскольку эти изменения проводятся уже с использованием информации о степени неоднородности среды.

Так как регистрируемые сигналы в локационных системах в начале и конце трассы зондирования значительно отличаются по абсолютной величине необходимо контролировать время измерений (число циклов накопления) при котором достигается необходимая точность измерения сигналов (особенно актуально это для быстроизменяющегося состояния исследуемой среды). Необходимое время накопления в локационных системах зависит от величины сигнала на конечном участке исследуемой трассы. Для больших расстояний, вследствие этого, необходимо получать алгоритм определения времени накопления сигналов для режима счета фотонов.

При пуассоновском распределении сигналов обратного рассеяния  $y_i$  и фоновых  $p_i$  можно записать следующее выражение для погрешности измерения сигналов



$$\delta P = \frac{\sqrt{Y+N}}{Y-N}, \quad (6)$$

где  $Y = \sum y_i$ ,  $N = \sum n_i$ ,  $i$  — число циклов зондирования.

Если в каждом цикле зондирования измерение фона проводить не за время равное времени измерения дискретных значений сигналов обратного рассеяния, а за время  $T$  между моментом окончания приема сигнала и моментом послылки следующего зондирующего импульса, то (6) преобразуется к виду

$$\delta P = \frac{\sqrt{Y+N/m^2}}{Y-N/m}, \quad (7)$$

где  $m$  — отношение времени измерения фона  $T$  к времени измерения дискретных значений сигналов  $\Delta t$  ( $m = T/\Delta t$ ).

Как видно из (6) и (7)

$$\frac{\sqrt{Y+N/m^2}}{Y-N/m} < \frac{\sqrt{Y+N}}{Y-N}, \quad (8)$$

Неравенство (8) говорит о том, что в случае измерения фона за время  $T$  повышается точность определения измеряемых характеристик. Алгоритм (7), в свою очередь, можно использовать для контроля погрешности измерения накапливаемого сигнала при каждой из посылок зондирующего импульса. Процесс измерений при этом прекращается при достижении необходимой заданной точности. Измерительная система с использованием данного алгоритма становится автоматизируемой и по критерию точности регистрации сигналов.

Таким образом, можно заключить, что в оптико-физических исследованиях по определению оптических и микрофизических характеристик рассеивающих сред основой синтеза новых измерительных систем, наиболее полно удовлетворяющих задачам метрологической аттестации и полной автоматизации процесса измерений, является исключение при этом использования априорной информации (математической модели объекта исследования), дополнительных независимых измерений, эталонных средств, что в свою очередь, приводит к значительному повышению точности за счет устранения методических погрешностей, обусловленных данными причинами.

## Литература

1. Каверкин И.Я. Анализ и синтез измерительных систем. — Л.: Эне-гия, 1974. — 155 с.
2. Малевич И.А. // Структурные модели лазерных систем с высоким пространственно-временным разрешением (системный подход)// Лазерная и оптико-электронная техника. — Минск: Из-во Университетское. — 1989. — С. 5—13.
3. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. — М.: Мир. — 1987. — 550 с.
4. Лазерный контроль атмосферы/ Под ред. Э. Хинкли. М.: Мир. — 1979. — 416 с.
5. Креков Г.М., Кавкянов С.И., Крекова М.М. Интерпретация сигнала — лов оптического зондирования атмосферы. — Новосибирск: Наука. — 1987. — 173 с.
6. Воропай Е.С., Торпачев П.А. Техника фотометрии высокого амплитудного разрешения. — Минск: Университетское. — 1988. — 208 с.
7. Кугейко М.М. Теория и методы оптико-физической диагностики неоднородных рассеивающих сред в условиях отсутствия априорной информации [Автореферат] // Дис. докт. физ.-мат. наук. — Минск /ротопринт/. — 1994. — 42 с.
8. Зуев В.Е. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей. — Новосибирск: Наука. — 1986. — 107 с.
9. Кугейко М.М., Сергеев Н.М., Ашкинадзе Д.А. О возможностях измерения оптических характеристик рассеивающих сред с помощью подвижных лидаров // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. — 1982. — Т.18, n12. — С. 1296—1304.

Белгосуниверситет  
г.Минск