



Сибирское отделение Российской Академии наук
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им.Г.И. Будкера

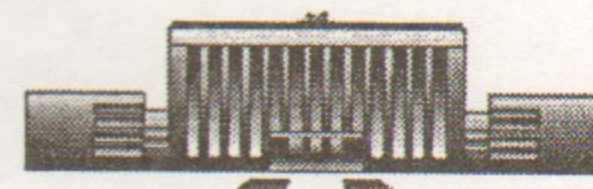
A. 74
1998

В.В. Анциферов, С.П. Ильиных, К.Л. Комаров,
И.Д. Миценко, И.И. Рогов, Г.И. Смирнов

ЛАЗЕРНЫЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ
ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

ИЯФ 98-49

<http://www.inp.nsk.su/publications>



НОВОСИБИРСК

1998

БИБЛИОТЕКА
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ
ФИЗИКИ
2 экз

Лазерные многофункциональные диагностические системы

*В.В. Анциферов, С.П. Ильиних, К.Л. Комаров,
И.Д. Миценко, И.И. Рогов, Г.И. Смирнов*

Институт ядерной физики им Г.И.Будкера
630090 Новосибирск, Россия

Аннотация

Рассмотрены лазерные многофункциональные диагностические системы и возможности их применения для экспресс-диагностики высокотемпературной плазмы, гормонов, экологического состояния атмосферы городов, обнаружения летучих взрывчатых веществ на железнодорожных станциях и на газопроводах, обеспечения безопасности движения поездов и др

Laser multifunctional diagnostic systems

*V.V. Antsiferov, S.P. Iljinich, K.L. Komarov,
I.D. Mizenko, I.I. Rogov, G.I. Smirnov*

Budker Institute of Nuclear Physics
630090 Novosibirsk, Russia

Abstract

Laser multifunctional diagnostic systems and the possibilities of their use for the express-diagnostics of the plasmas, hormones, the ecological status of the town atmosphere, the discovery of the volative explosive matters at the railway stations and the gas-mains, the motion safety quarantencing of the trains are considered.

© Институт ядерной физики
им. Г.И. Будкера СО РАН, Россия

1. Лазерная экспресс-диагностика гормонов

Необходимость измерения концентрации гормонов в биологических жидкостях, определяется их высокой информационной важностью. Изменение концентрации гормонов в крови, моче и слюне возникает задолго до появления клинических симптомов и сопровождает большинство основных заболеваний человека. Оптимизация методов диагностики гормонов (повышение точности, увеличение производительности и удешевление) позволит значительно сократить время диагностики заболевания.

Существующие методы диагностики большинства гормонов можно разделить на химические и сатурационные. Химические методы диагностики, включающие в себя чисто химические методы и хроматографические, появились в 50-х годах. Применение газовой хроматографии позволило идентифицировать в чистом виде некоторые стероидные гормоны, которые присутствуют в крови человека в больших концентрациях. Как правило, хроматографические методы имеют очень низкую чувствительность (порядка 200 нг/мл) и низкую производительность (одновременно можно определять небольшое количество проб). Сатурационные методы: радиоиммунологический и иммуноферментный, – появились в 60-70-х годах и совершили революцию в эндокринологии, понизив предел обнаружения концентрации гормонов до 1 нг/мл и увеличив производительность определения проб на два порядка. Однако существенным недостатком этих методов является необходимость создания селективных антисывороток. Получение антисывороток – трудоемкий процесс, включающий синтез антигенов и продолжительный этап иммунизации животных (обычно кроликов) с не всегда предсказуемым результатом.

Для экспресс-диагностики стероидных гормонов разрабатывается [1] лазерный метод диагностики, который позволит увеличить производительность определения проб на несколько порядков и точность определения концентрации гормонов на два порядка. При этом будет значительно снижена стоимость определения одной пробы. Суть метода заключается

ся в том, что исследуемый раствор возбуждается в полосе поглощения стероидных гормонов, имеющих поглощение вблизи 240 нм, третьей гармоникой перестраиваемого лазера на кристалле александрита, а регистрация производится с помощью фотоэлектронных датчиков наиболее интенсивных пиков в спектре флуоресценции конкретных гормонов в диапазоне ≤ 300 нм.

Лазер на кристалле александрита работает в режиме активной модуляции добротности резонатора с помощью электрооптического затвора, при этом длительность гигантского импульса излучения составляет 20 нс при частоте повторения импульсов 10 Гц. Преобразование частоты излучения во вторую и третью гармоники производится кристаллами КТР, при этом мощность импульса излучения на частоте третьей гармоники составляет 0.5 МВт.

Регистрация спектров флуоресценции производится фотоумножителями, имеющими максимальную чувствительность в синей области спектра, при использовании узкополосных акустооптических фильтров. Акустооптические фильтры имеют полуширину линии пропускания порядка 0.1 нм в полосе регистрации. С их помощью были впервые получены спектрограммы флуоресценции основных стероидных гормонов со спектральным разрешением 0.1 нм.

Для диагностики остальных (не стероидных) гормонов, имеющих поглощение в инфракрасном диапазоне спектра, разрабатываются лазеры на кристаллах с ионами Cr^{4+} , Er^{3+} , Ho^{3+} , генерирующие на длине волны, совпадающей с полосой поглощения исследуемых гормонов.

2. Лазерный экологический диагностический комплекс

Для оперативного измерения концентраций загрязняющих веществ в воздухе, грунте и воде и их локального распределения на местности более предпочтительно по сравнению с традиционными методами использовать лазерные методы диагностики вредных веществ, имеющие максимальное быстрое действие и точность.

Непрерывное слежение за атмосферой над городом может обеспечить лазерный локатор (лидар), излучающим элементом которого является лазер на неодиме в иттрий-алюминиевом гранате (Nd:YAG) в режиме гигантского импульса, с частотой повторения импульсов до 50 Гц и с преобразованием частоты излучения в третью гармонику (354 нм) [2]. Поскольку все основные частоты Q-ветвей колебательно-вращательных

спектров комбинационного рассеяния молекул углекислого газа, окиси азота, окиси серы, бензина, пропана, метана и других летучих углеводородов лежат в более длинноволновой области, по сравнению с частотой 3ω Nd:YAG-лазера, то при их значительной концентрации в атмосфере города для их регистрации более предпочтительно использовать метод комбинационного рассеяния. При этом можно определить все основные загрязняющие вещества в атмосфере города за один лазерный импульс. В этом методе возбуждающее излучение не находится в резонансе с квантовым переходом, а рассеянный фотон может иметь как меньшую энергию (стоксов сдвиг), так и большую энергию (антистоксов сдвиг) относительно падающего фотона. Спектроскопия комбинационного рассеяния не требует плавно перестраиваемого излучения, и успешное применение лазера в этом методе базируется на высокой спектральной яркости лазерного излучения. Спектроскопия комбинационного рассеяния лазерного излучения является мощным методом для дистанционной диагностики вредных веществ, она позволяет идентифицировать молекулы вредных веществ и с высокой точностью определить их концентрацию. Поскольку сечение комбинационного рассеяния очень мало, то для уверенной и достоверной регистрации концентраций загрязняющих веществ необходима мощность излучения в лазерном импульсе порядка 10 МВт.

В случае незначительной концентрации загрязняющих веществ в атмосфере города более эффективным методом их диагностики является метод дифференциального поглощения. Для этого в лазерном диагностическом комплексе используются два лазерных пучка на различных длинах волн: вторая и третья гармоники Nd:YAG-лазера и вторая гармоника перестраиваемого лазера на титане в сапфире. Длина волны одного лазерного пучка должна попадать в полосу поглощения диагностируемой молекулы загрязняющего вещества, а другого – находиться вне полосы поглощения той же молекулы.

Для определения концентраций загрязняющих веществ в грунте и воде создается лазерная диагностическая система, состоящая из атомизатора и системы возбуждения. В качестве атомизатора используется первая гармоника (1064 нм) Nd:YAG-лазера, описанного выше, излучение которого фокусируется на образец грунта или жидкости, при этом происходит испарение грунта или жидкости с образованием плазменного облака. Образующаяся плазма из атомов и ионов возбуждается второй гармоникой перестраиваемого лазера на титане в сапфире в диапазоне длин волн 325 – 500 нм. Тип и концентрация вредных веществ определяется по спектру и интенсивности резонансной флуоресценции молекул загрязняющих веществ.

3. Создание лазерных систем сбора измерительной информации нового поколения и разработка методов ее обработки в реальном режиме времени

Цель программы: модернизация путеизмерительного вагона, путем разработки оригинальных методов и систем сбора и обработки измерительной информации для диагностики рельсового пути, оценки технического состояния средств железнодорожного транспорта, сооружений и предупреждения аварийных ситуаций и обеспечения безопасности движения поездов.

Актуальность реализации данной программы определяется современной концепцией технической политики в железнодорожном транспорте, при которой его развитие предполагается проводить по пути создания и внедрения высокоскоростного, надежного транспорта. Такой подход требует внедрения новых высокопроизводительных, помехозащищенных автоматизированных средств диагностики способных работать в режиме реального времени и при неблагоприятных климатических условиях и обеспечивать достоверность измеряемых параметров в динамике движения состава. В настоящее время отсутствуют средства измерений параметров высокоскоростного движения тяжеловесных составов и состояния рельсового пути, обладающие указанной совокупностью свойств. Существующие методы сбора и обработки измерительной информации (например, путеизмерительный вагон ЦНИИ-4) существенно ориентированы на использование физико-механических принципов измерения параметров рельсового пути, которые не обладают достаточной точностью и не позволяют производить диагностику рельсового пути при высоких скоростях движения.

Техническое обоснование:

Постановка задачи по измерению параметров рельсового пути и характеристик в динамике скоростного передвижения состава — модернизация путеизмерительного вагона должна производиться по следующим основным нормам и параметрам:

- ширина колеи (положение рельсовых нитей по направлению);
- радиус кривизны;
- стрела прогиба;

- уровень рельсовых нитей относительно горизонта (взаимное положение);
- местные просадки (горбы и впадины);
- скорость движения вагона;
- пройденный путь от пикета к пикету;
- износ рельсов;
- взаимное положение рельсовых балок каждой из нитей в местах их стыковки в момент прохождения вагона;
- величина подъема оси вагона в момент прохождения рельсовых стыков.

Измерение указанных параметров с требуемыми характеристиками возможно только при использовании неконтактных методов, основанных на современных достижениях оптики, квантовой электроники, оптоэлектроники и др. В настоящее время коллектив разработчиков имеет большой задел по созданию и применению современных бортовых малогабаритных лазерных систем измерения статических и динамических геометрических параметров объектов для целей военно-промышленного комплекса. Разработаны высокоточные, помехоустойчивые лазерные дальнометры, датчики высоты, лазерные трехстепенные, вибропрочные гироскопические платформы, интерферометрические средства измерений. Созданы и апробированы методы автоматизированного анализа измерительной информации в условиях сильных помех [3-6]. Научный и практический задел может быть успешно использован для решения вышеуказанных задач на железнодорожном транспорте. Предлагается разработать следующие системы:

- 1) лазерный датчик регистрации ширины колеи с погрешностью менее 1 мм;
- 2) лазерные спекл-интерференционные измерители профиля с точностью измерения выше 0.1 мм;
- 3) лазерную гироскопическую систему с точностью измерения угловых перемещений (0.8×10^{-3} угл.сек/с), фиксирующую возвышение наружного рельса над внутренним, стрелу прогиба, просадку рельсового пути и др.;

- 4) лазерные системы измерения скорости (в диапазоне 15–3000 м/мин) ускорения и пройденного пути с погрешностью не более 0.1%;
- 5) лазерные дальномеры и определители негабаритных размеров с разрешающей способностью не менее 10 см;
- 6) лазерные видеосистемы обзора и распознавания аварийноопасных объектов по пути движения транспорта.

Описанные выше системы должны работать в диапазоне температуры окружающей среды от -60 до $+85$ град., при влажности 100% и при уровне вибраций, соответствующих требованиям предъявляемых к железнодорожному транспорту. Недостатком существующих базовых систем является их низкая помехозащищенность (недостаточная надежность работы при неблагоприятных климатических условиях: дождь, туман, снег), а также нестойкость к действию механических вибраций и ударов, что устраняется предлагаемыми здесь апробированными методами.

3.1. Лазерный датчик регистрации ширины колеи

Система реализует триангуляционный метод измерения и содержит два независимых лазерных источника подсветки по одному на каждую нить и два фотоприемника, выполненных в виде фотолинейки с числом элементов разрешения 1024, погрешность измерения менее 1 мм реализуется специальным алгоритмом считывания и обработки измерительной информации. Работа датчика основана на предложенных особенностях измерения ширины колеи.

Так как отклонение расстояния между рельсами в нормальных условиях не должно превышать одного миллиметра, то достаточно регистрировать остаток этого расстояния относительно эталонной балки с обеих сторон. Наиболее просто эту величину расстояния можно измерить с помощью фотолинеек с зарядовой связью. В лучшем варианте остаток должен соответствовать длине фоточувствительного слоя фотолинейки. Если принять, что остаток равен 10 мм, то очевидно абсолютную погрешность можно получить меньше 1 мм. Для реализации измерения с данной погрешностью на входе фотоприемника должен быть установлен коллиматор, а подсвет железнодородных нитей осуществляться под углом близким к углу Брюстера, что позволит избавиться от влияния

зеркальной составляющей в отраженном сигнале. Если в схему обработки ввести вычитание сигналов в рядом стоящих фотоэлементах и селекцию по скорости перемещения изображения, то используя разработанные решения можно избавиться от аэрозольных помех и отражений от мелких предметов поднимаемых с насыпи турбулентным потоком движущегося состава.

3.2. Лазерная гироскопическая система

Система содержит три лазерных гироскопа, ориентированных в перпендикулярных плоскостях и размещенных в монолитном кварцевом корпусе. Лазерный гироскоп измеряет угловую скорость вращения объекта, на котором он установлен. Данная информация служит первичной для определения координат объекта методом Эйлера.

Существующие лазерные гироскопы имеют высокую точность до $(0.8 \times 10^{-3}$ угл.сек/с) регистрации угловых перемещений, недостижимую для механических гироскопов, но обладают малым временем непрерывной работы (порядка 0.5 часа). Указанный недостаток лазерного гироскопа может быть устранен путем доработки его конструкции и увеличения срока непрерывной работы до нескольких суток, что позволит успешно решать необходимую совокупность задач диагностики:

- возвышение наружного рельса над внутренним;
- стрелу прогиба;
- просадку рельсового пути и др.

Принцип измерения текущих координат движущегося объекта определяется путем измерения перемещения относительно точки привязки. В момент выборки на выходе каждого из трех гироскопов выдается информация в виде последовательности импульсов, количество которых в пакете пропорционально частоте биений или угловой скорости в заданной гироскопом плоскости измерений. Интегрирование этой информации за интервал выборки позволяет по каждому гироскопу определить угол отклонения системы в трех плоскостях (x, y, z) . Интервал выборки выбирается в зависимости от заданной погрешности измерения и динамического диапазона пределов измерения. По измеренным значениям углов решается соответствующая координатная система уравнений Эйлера и определяется траектория и положение измеряемого объекта в заданной пространственно-временной системе.

Измерительная система включает в себя микропроцессорный блок обработки цифровой информации, а также интерфейсный модуль для сопряжения с ЭВМ.

3.3. Измеритель скорости движения состава

Анализ возможностей построения измерителя скорости движения железнодорожного состава показывает, что наименьшей погрешностью обладают системы измерения, основанные на интерференции спекл-структур, не требующих применения лазерных источников с большой длиной когерентности. Процесс образования спекл-поля заключается в локализации в пространстве областей с максимальной или минимальной интенсивностью света. В плоском разрезе спекл-поле представляет собой хаотическое чередование максимумов и минимумов интенсивности светового поля. Такой характер спекл-поля предопределяет его статистическое описание. Спекл-поля образуются при распространении когерентного излучения в пространстве за диффузным рассеивателем, в качестве которого может служить как прозрачный объект, так и непосредственно само непрозрачное шероховатое тело при диффузном отражении излучения.

Вследствие трехмерной интерференции в пространстве за отражающей поверхностью рассеянное излучение приобретает зернистый характер, причем зерна излучения имеют сигарообразную форму и ориентированы вдоль направления распространения света. Спекл-поле на экране может быть сформировано с помощью объектива. При этом случайное распределение интенсивности создается за счет сложения в фурье-плоскости линзы амплитуд светового поля, рассеянного различными участками шероховатой поверхности в пределах диска Эйри. Дифракционная картина в фокусе имеет круговую симметрию.

Для формирования спекл-поля с помощью линзы необходимо, чтобы на поверхности, рассеивающей лазерное излучение, размеры шероховатостей изменялись на величину, большую длины волны излучения в пределах телесного угла. В рассматриваемом случае задача наиболее просто решается методом спекл-фотографии. Этот метод основывается на опытах Бурча и Токарского, в которых было показано, что фурье-образы дважды экспонированного спекл-поля, сдвинутого между экспозициями на некоторую величину Δ , являются интерференционными полосами, аналогичные полосам в интерферометре Юнга с двумя щелями, расположенными на том же расстоянии Δ друг от друга. При дифракции света на двух щелях или отверстиях, расположенных на расстоянии Δ друг от друга, дифракционная картина оказывается промодулированной интерференционными полосами. При этом интерференционные полосы ориентированы перпендикулярно вдоль направления, ортогонального ориентации щелей. Фурье-образ спекл-поля также является спекл-полем. Аналогично дифракция на двух сдвинутых друг относительно друга на

некоторое расстояние Δ спекл-полях, экспонированных на одной фотопластинке, будет эквивалентна дифракции на двух щелях в интерферометре Юнга. Поэтому спекл-поле на экране будет модулировано интерференционными полосами Юнга. Таким образом, измеряя расстояние между интерференционными полосами можно однозначно определить величину сдвига спекл-полей между экспозициями. Учитывая, что интерференционные полосы ориентированы перпендикулярно направлению сдвига спекл-полей, вычисляем как величину, так и направление сдвига спекл-поля между экспозициями, т.е. две компоненты смещения спекл-поля в плоскости X, Y ; Δ_x и Δ_y .

При регистрации спекл-поля, сформированного при отражении от шероховатой поверхности, спеклы в плоскости изображения смещаются пропорционально смещениям соответствующих точек рассеивающей поверхности, причем коэффициент пропорциональности является коэффициентом увеличения при формировании спекл-поля в плоскости изображения. В соответствии с этим схему измерения перемещения можно представить следующим образом. При освещении исследуемой поверхности когерентным излучением в пространстве за ней генерируется спекл-поле. С помощью объектива фотографируют субъективное спекл-поле. Для измерения перемещения исследуемой поверхности осуществляют две экспозиции: одна до перемещения, а другая после перемещения. В результате на фотопластинке будут регистрироваться два смещенных друг относительно друга спекл-поля. Пусть в некоторой точке такой спеклограммы величина их смещения равна Δ . Тогда при просвечивании спеклограммы лучом непрерывного (например, He-Ne) лазера на экране за фотопластинкой появляются интерференционные полосы, аналогичные полосам в интерферометре Юнга с двумя параллельными щелями, расположенными друг относительно друга на расстоянии Δ . Измеряя расстояние между полосами и угол их наклона, например, относительно горизонтальной оси можно определить две компоненты смещения спекл-поля за время между экспозициями a , следовательно, и две компоненты вектора перемещения измеряемой точки поверхности.

Весьма существенно, что одна спеклограмма несет в себе информацию о двумерном перемещении поверхности. Указанная информация может быть получена из спеклограммы при ее точечном сканировании в схеме восстановления полос Юнга. При этом каждая точка поверхности спеклограммы соответствует точке на измеряемой поверхности. Пространственное разрешение и минимально регистрируемая величина перемещения определяется характерным размером субъективного спекла, формируемого объективом. При восстановлении полос Юнга необходимо

чтобы диаметр луча лазера был больше характерного размера спекла.

Все выше сказанное можно применить в случае использования дифракционной решетки, при этом спеклограмма, образуемая на ней, будет отображать перемещение исследуемой точки поверхности в реальном времени. На основе эффекта этого разработан лазерный измеритель скорости. Он очень удобен для измерения скорости твердых тел, имеющих шероховатую поверхность. В измерителе данного типа используется картина возникающая при дифракции спекл-поля на дифракционной решетке. Подобные эффекты аддитивной интерференции возникают нестационарно и при освещении поверхности обычным некогерентным источником света, но возникающая картина хаотически изменяется за времена, малые в сравнении с временным разрешением человеческого глаза или фотоприемника. Поэтому поверхность, освещенная обычным источником света, кажется равномерно освещенной, тогда как поверхность, освещенная когерентным лазерным излучением, имеет гранулированную пятнистую спекл-структуру. При этом на дифракционной решетке возникает дифракционная картина в виде интерференционных полос.

Если отражающий объект движется относительно наблюдателя, то в движение приходит и указанная дифракционная картина. При этом вся картина движется как единое целое. Видимая скорость перемещения полос равна удвоенной скорости относительного движения отражающей поверхности. Если заменить глаз человека фотоприемником с малой апертурой, то при перемещении одной светлой полосы через апертуру на выходе приемника будет возникать импульсный сигнал. Этот способ положен в основу метода измерения скорости движущейся поверхности. Перед фотоприемником помещается дифракционная решетка. Прохождение светлого пятна дифракционной картины по этой решетке приводит к возникновению серии импульсов на выходе фотоприемника. В процессе измерения через решетку проходит большое число пятен, каждое из которых инициирует серию импульсов. Фазы импульсов каждой серии расположены хаотически, но частота следования импульсов одинакова для всех серий. Поэтому для определения скорости движения достаточно измерить центральную частоту выходного сигнала фотоприемника.

Согласно оценкам, точность измерения скорости в интервале 15—3000 м/мин составляет порядка 0.1%. Для повышения технологичности системы в качестве источника освещения предполагается использовать импульсный ND:YAG-лазер, генерирующий на третьей гармонике (350 нм), при этом скорость перемещения будет измеряться по величине смещения дифракционной картины между импульсами.

3.4. Интерференционная система диагностики рельсовой нити

При диагностике рельсовой нити измеряются ее формы и параметры рельефа с учетом динамики ее изменения в пространственно-временной координатной системе в режиме реального времени при движении состава, что практически невозможно сделать с использованием традиционных методов измерения. Для полного решения поставленной задачи необходимо разработать специальную физико-математическую модель рельсовой нити, не имеющую пока удовлетворительного решения. Адекватность модели зависит от возможности проведения экспериментального подтверждения, которое в настоящее время не обеспечено техническими измерительными средствами. Решение данной задачи возможно лишь при комплексном подходе с использованием принципов неконтактных измерений. Наиболее полно данным требованиям удовлетворяют оптические и лазерные системы, основанные на принципах спекл-интерферометрии.

Система диагностики состоит из измерителей расстояния, перемещения, напряжения и деформаций, и является подсистемой измерения пространственно-геометрических характеристик движения состава. Основываясь на результатах полученных в предыдущем разделе можно показать, что интерференционная спекл-структура несет в себе полную информацию о геометрии измеряемого объекта: параметрах рельефа, его напряженно-деформируемом состоянии и их изменении во времени. Измерение рельефа рельсовой нити целесообразно осуществлять методом топографии двух длин волн, в котором получают интерференционную картину в виде черно-белых полос, расстояние между которыми характеризует соответствующие сечения высот профиля рельефа. Интерференционные полосы образуются сложением или вычитанием двух интерференционных картин, полученных для соответствующей длины волны освещения. Удобство метода заключается в возможности настройки расстояния между высотами сечений, а следовательно, изменения чувствительности и масштаба измерения.

Измеритель состоит из двух полупроводниковых лазеров с устройством модуляции и перестройки частоты излучения, оптической системы с интерферометром и фотоприемного тракта, выполненного в виде матричного фотоприемника — регистратора первичной информации. Информация о параметрах рельефа получается путем обработки первичной информации по специальным алгоритмам расшифровки в микропроцессорном блоке. Измерение информации о перемещении выполняется методом двух экспозиций. Данный метод основан на регистрации последова-

тельно во времени двух или более спекл-структур одного и того же участка, при этом интерференционные полосы несут информацию об изменении профиля во времени. Цена деления Расстояние между интерференционными полосами, определяющее цену деления, пропорциональна длине волны излучателя, а число зарегистрированных интерференционных полос показывает уровень перемещения. Для выделения перемещения в определенных направлениях могут использоваться методы пространственной и цифровой фильтрации. Кроме того, возможно применение разработанных многочастотных методов на основе остаточных классов, позволяющих определять высоту рельефа непосредственно, минуя этап интегрирования.

Оценка деформаций выполняется путем анализа кривизны интерференционных полос. Возможно также для анализа применение методов пространственной и цифровой фильтрации. В настоящее время реализованы соответствующие системы и алгоритмы автоматизированной расшифровки первичной информации.

3.5. Определители предметов, находящихся внутри допустимых габаритов движения транспорта

Система предназначена для регистрации аварийной ситуации, когда предмет находится внутри предельных габаритов транспорта. Определитель посторонних предметов должен осуществлять круговой обзор пространства и регистрировать с высоким разрешением расстояние до предметов по всему периметру обзора, сравнивая их с эталоном. Наиболее просто реализовать поставленную задачу можно используя полупроводниковые лазеры. Отсутствие боковых лепестков, малые габаритно-весовые характеристики, высокий к.п.д. делает их идеальными источниками излучения при построении таких систем.

Для выработки технических требований необходимо задаться пространственным интервалом целеуказания постороннего предмета ΔH . При размерах постороннего объекта в пределах 0.5 – 1 м его можно увидеть не вооруженным взглядом и устранить аварийную ситуацию. Минимальный же размер объекта, который должен регистрироваться системой внутри интервала целеуказания должен составлять несколько сантиметров (трос, балка и др.). Исходя из принятого положения можно определить угол расходимости излучения лазера, как отношение пространственного интервала целеуказания к минимальной дальности до объекта, находящимся на периметре обзора. Из этой исходной информации находится время обзора пространства по кругу обзо-

ра $T_{обз} = \Delta H / V_{max} = 0.18$ с, где V_{max} – максимальная скорость движения измерительного вагона. Отсюда находим угловую частоту обзора $\omega = 1/f_{обз} = 300$ об/мин. При использовании импульсного полупроводникового лазера необходимо определить частоту следования импульсов f_c , которая бы обеспечила разрешение по периметру обзора. $f_{сл} = (L_{пер} / \Delta H) / T_{сл} = 250$ Гц. Если учесть, что частота повторения импульсных лазеров, например, типа ЛПИ-4 составляет порядка 6 кГц, то отсюда следует, что интервал разрешения ΔH при использовании лазера данного типа может быть уменьшен по крайней мере в 25 раз.

Система состоит из малогабаритного высокоточного лазерного импульсного дальномера с заданной диаграммой направленности, который вращаясь по периметру должен регистрировать расстояние до объекта. Малые габариты приемо-передающего тракта обеспечиваются за счет введения оптопары, световой сигнал которой передается через полый ротор двигателя. Информация об угле облучения объекта, дальности и местоположения постороннего объекта поступает на микропроцессорную систему, которая ведет обработку ее в реальном масштабе времени и фиксирует координаты посторонних предметов, находящихся внутри допустимых габаритов вагона. Преимущество такого метода регистрации состоит в том, что фиксация предметов в запредельных габаритах транспорта здесь обеспечивается в динамике движения состава с учетом колебаний вагонов состава.

Точность измерения расстояния до посторонних предметов может быть обеспечена за счет разработанных новых оригинальных методов дальнометрии обладающие погрешностью измерения расстояния не хуже 5 мм, точность оценки углового положения составляет не менее 30 угл.сек. Этот датчик можно с успехом использовать также для анализа состояния тоннелей и мостовых сооружений.

3.6. Лазерные видеосистемы обзора и распознавания аварийноопасных объектов по пути движения транспорта

Наличие посторонних предметов (техника, упавшие бревна, животные и т.д.) на железнодорожном пути в пределах тормозного пути вызывает как правило аварийную ситуацию. Данная проблема на железнодорожном транспорте решается за счет постоянного визуального просмотра пути машинистом. Естественно такая процедура чрезвычайно утомительна и становится неэффективной в ночное время, особенно при небла-

гоприятных климатических условиях, когда идет дождь или снег или в условиях тумана. В последнем случае скорость состава резко снижается, нарушается график движения поездов, что в итоге приводит к большим потерям.

Применение радиолокации для целей визуализации неприемлемо по ряду причин: наличие боковых лепестков и относительно широкие диаграммы направленности приемопередатчиков, — что как следствие приводит к появлению ложных сигналов от посторонних предметов типа опор, столбов, придорожных строений и др. Применение для визуализации объектов локационных систем с апертурным синтезом удовлетворительно решает данную задачу, но технически и экономически неприемлемо из-за высокой сложности и стоимости таких локаторов.

Неприемлемо также использование для этой цели лазерных локаторов. Несмотря на то, что практически в них отсутствуют боковые лепестки, однако совокупность проблем указанных остается прежней. Попытка использования для этой цели телевизионной техники также не достигла цели, так как дальность обзора видеокамеры ограничена эффектом "вуали" и к тому же радиус обзора резко уменьшается при наличии туманов, дождей, снега и действия других аэрозольных помех. Поэтому проблема визуализации железнодорожных путей по всей дистанции тормозного пути при наличии аэрозольных помех и в ночное время остается прежней.

Таким образом можно сформулировать основные требования к системам обзора и распознавания аварийноопасных объектов по пути движения транспорта:

- 1) визуализация железнодорожного пути в пределах тормозного пути при действии дестабилизирующих факторов: туман, дождь, снег, град и в ночное время;
- 2) автоматическое распознавание на путях аварийноопасных объектов по всей длине тормозного пути в реальном масштабе времени;
- 3) отсутствие ложных срабатываний по объектам не находящимся на железнодорожном пути.

Решения поставленной проблемы возможно объединением принципов лазерной дальнометрии и телевизионных систем, что позволяет обеспечить помехоустойчивость системы обнаружения и обеспечить автоматическое распознавание наличия объектов, находящихся только на путях, и визуальный просмотр путей в неблагоприятных условиях вождения состава. Предлагаемая лазерная система обзора содержит импульсный лазерный

источник подсветки, имеющий мощность достаточную для прохождения излучения в тумане на участке тормозного пути, стробируемые видеокамеры, работающие в ближнем ИК-диапазоне и систему распознавания принадлежности объекта пространству пути и заданного класса аварийноопасных объектов. Особенность обработки информации в данной системе заключается в специальных методах стробирования видеокамеры и обработки измерительной информации.

Реализация и внедрение предлагаемой системы позволит увеличить пропускную способность железных дорог, обеспечить надежность перевозок в заданные графиком сроки при любых погодных условиях и уменьшить себестоимость грузоперевозок.

3.7. Лазерный дальномер

Для измерения величины подъема оси вагона в момент прохождения рельсовых стыков необходим высокоточный дальномер, измеряющий расстояние между осью колес и железнодорожной нитью. Ранее показано, что поставленной задаче наиболее полно соответствуют интерферометрические дальнометры. Однако эта задача при приемлемой погрешности измерения порядка миллиметра может быть решена более простым путем. Для этой цели разработан лазерный локатор — лидар, основанный на принципе стробирования зондирующего импульса. Сущность метода заключается в определении максимума корреляционной функции низкочастотной огибающей зондирующего импульса и строга с изменяющимся временем задержки последнего. Указанный способ, обладая повышенной разрешающей способностью, не требует обеспечения широкой полосы пропускания приемного тракта. С помощью описанного лидара экспериментально было измерено расстояние порядка 7 м с точностью до 5 мм, что практически невозможно достичь в лазерном локаторе классического типа, для которого необходимо обеспечить полосу пропускания приемного тракта порядка сотен гигагерц.

Разработанный лидар состоит из импульсного лазера — источника излучения зондирующего и стробирующего сигналов, фотоприемного тракта, устройства стабилизации уровня входного сигнала, коррелятора и устройства управления временем задержки строга.

4. Дистанционная экспресс-диагностика теплового состояния букс железнодорожных вагонов [7]

Безопасность движения железнодорожных поездов зависит от физического состояния их осей, колес и букс. Внешний их осмотр осуществляется обходчиками на крупных станциях и такой субъективный осмотр нередко приводит к существенным ошибкам в объективном определении состояния колесной пары, что может привести к крушению поезда. В целях исключения ошибок, связанных с субъективным человеческим фактором, такой контроль за физическим состоянием колес, осей и букс необходимо поручить электронным автоматам.

Основной составной частью такого контролирующего автомата является тепловизионная камера, которая регистрирует тепловое поле, излучаемое элементами конструкций в инфракрасном диапазоне спектра. При наличии дефектов и трещин в контролируемых элементах в плоскости их конструкций будут наблюдаться тепловые градиенты поля, которые будут регистрироваться тепловизионной камерой. Тепловизионная камера представляет собой прибор регистрирующий тепловое излучение объектов и отображающий его на экране монитора компьютера или телевизора в виде последовательности кадров в реальном масштабе времени. В дневное время фоновое световое и ближнее ИК-излучение легко отсекается соответствующими инфракрасными фильтрами.

Для регистрации дефектов букс при динамических исследованиях (в движении) в реальном масштабе времени необходимы тепловизионные камеры третьего поколения на основе фокальных матриц, обладающие высоким тепловым разрешением и высоким быстродействием. На основе InSb-матриц (128 × 128 и 256 × 256 элементов) разработаны тепловизионная камера "Radiance-1", имеющая тепловое разрешение 0.025 °C и быстродействие 60 кадров/сек. Камеры марки Prism TM и IRM-300 на основе PtSI-матриц (256 × 256 элементов) обладают тепловым разрешением 0.1 °C и быстродействием 60 кадров/сек. Отечественных серийных аналогов тепловизионных камер пока нет. В Институте физики полупроводников СО РАН разработана тепловизионная камера, удовлетворяющая всем требованиям динамической регистрации с температурным разрешением 0.05 °C и быстродействием 50 кадров/сек.

Установка двух электронных автоматов с тепловизионными камерами на каждой железнодорожной станции и на некоторых участках длинных перегонов позволит существенно снизить риск крушений, обусловленный

разрушением элементов конструкций колес и осей. Кроме того, внедрение таких электронных автоматов по контролю даст заметную экономию оборотных средств.

5. Лазерная экспресс-диагностика экологического состояния местности после крушения железнодорожных составов [8]

После крушения железнодорожных составов, перевозящих нефть, нефтепродукты и другие вредные для человека вещества, местность оказывается сильно загрязненной, что существенно влияет на экологическую обстановку окружающей среды. Для оперативного определения концентрации загрязняющих веществ в грунте, воде и воздухе, и их локального распределения на местности более предпочтительно по сравнению с традиционными методами использовать лазерные методы диагностики вредных веществ, имеющие наибольшее быстродействие и точность.

Лазерная диагностическая система состоит из атомизатора и системы возбуждения. В качестве атомизатора используется лазер на неодиме в кристалле иттрий-алюминиевого граната в режиме гигантского импульса мощностью 10 Мвт и частотой повторения импульсов порядка 10 Гц. Излучение лазера фокусируется на образец грунта или жидкости, при этом происходит испарение грунта или жидкости с образованием плазменного облака. Образующаяся плазма из атомов и ионов зондируется или возбуждается лазерным излучением с длиной волны, соответствующей характеру исследований и методу используемой диагностики.

В качестве основных методов лазерной диагностики используются следующие линейные методы:

- 1) абсорбционный метод;
- 2) метод внутрирезонаторного поглощения;
- 3) флуоресцентный метод;
- 4) метод комбинационного рассеяния;
- 5) метод резонансного комбинационного рассеяния;
- 6) метод дифференциального поглощения.

В абсорбционном методе в простейшем случае измеряется зависимость интенсивности излучения, прошедшей через плазменное облако от длины

волны перестраиваемого лазера. Этот метод удобен при измерении достаточно интенсивных линий поглощения, когда поглощенная интенсивность излучения составляет легкоизмеримую часть от падающей. В случае разрешенного атомного перехода порог обнаружения составляет 10^2 атомов за секунду в облучаемом объеме, при интенсивности насыщения перехода 5 Вт/см^2 . В случае разрешенного колебательно-вращательного перехода порог обнаружения составляет $3 \cdot 10^8$ за секунду молекул, при интенсивности насыщения перехода 0.5 Вт/см^2 . Это обусловлено более медленной релаксацией возбужденных молекул и, следовательно, гораздо меньшим числом циклов повторного поглощения излучения в течение лазерного импульса. Абсорбционный метод охватывает в принципе любые переходы атомов и молекул в УФ-, видимой и ИК-области.

Радикальное увеличение чувствительности достигается в методе внутриврезонаторного поглощения, когда исследуемая плазма находится внутри резонатора лазера с широкой линией усиления. В этом случае усиление лазерной среды компенсирует нерезонансные потери в плазме, что позволяет многократно ($\sim 10^6$) увеличить эффективное число проходов лазерного излучения через исследуемую плазму и соответственно увеличить чувствительность абсорбционного метода за достаточно короткое время. Порог обнаружения составляет 10^5 атомов за одну микросекунду. Метод внутриврезонаторного поглощения применим для УФ-, видимой и ближней ИК-области, где доступны лазеры с широкими линиями усиления. Например, с помощью лазера на неодиме в стекле можно обнаружить чрезвычайно слабые линии поглощения молекул (NH_3 , ND_3 , N_2H_4 , CH_4 , CD_4 , N_2O , HCN , C_2H_2 , C_2HD и др.) на составных колебательно-вращательных переходах в области $9370 - 9520 \text{ см}^{-1}$ с коэффициентами поглощения порядка 10^{-7} см^{-1} .

Во многих случаях резонансное поглощение лазерного излучения атомами и молекулами сопровождается последующим его переизлучением возбужденными частицами, т.е. возникает флуоресценция. Измерение интенсивности флуоресценции как функции длины волны возбуждающего лазера лежит в основе флуоресцентного метода. Область его применения — квантовые переходы атомов и молекул, сопровождающиеся радиационным распадом возбужденных состояний. Предельная чувствительность флуоресцентного метода при лазерном возбуждении достигается в том случае, когда возбужденная частица быстро переизлучает флуоресцентный фотон, затем возвращается в исходное состояние и в результате за время регистрации многократно повторяет этот цикл. Флуоресцентный метод позволяет детектировать одиночный атом за одну наносекунду. Гораздо сложнее осуществить флуоресцентное лазерное детектиро-

вание более сложных молекул, которые не имеют электронных линий в газовой фазе. В тех случаях, когда молекулы имеют широкие полосы флуоресценции, селективное детектирование их практически невозможно.

К числу излучательных методов можно отнести также метод комбинационного рассеяния. В этом методе возбуждающее излучение не находится в резонансе с квантовым переходом, а рассеянный фотон может иметь как меньшую энергию (стоксов сдвиг), так и большую энергию (антистоксов сдвиг) относительно падающего фотона. Спектроскопия комбинационного рассеяния не требует плавно перестраиваемого излучения, и успешное применение лазера в этом методе базируется на высокой спектральной яркости лазерного излучения. Спектроскопия комбинационного рассеяния лазерного излучения является мощным методом для дистанционной диагностики вредных веществ, она позволяет идентифицировать молекулы вредных и веществ и с высокой точностью определить их концентрацию.

Чувствительность метода комбинационного рассеяния возрастает на три порядка в случае, когда частота лазерного возбуждения совпадает или достаточно близка к частоте соответствующего разрешенного перехода молекул - метод резонансного комбинационного рассеяния.

Выбор конкретного метода лазерной диагностики вредных веществ определяется характером загрязнения земной и водной поверхности.

6. Лазерный мониторинг взрывоопасных веществ на железнодорожных станциях и газопроводах [9]

Безопасность крупных железнодорожных узлов и железнодорожного пути вблизи газопроводов в существенной степени зависит от своевременного обнаружения взрывоопасной ситуации, связанной с утечкой легко воспламеняющихся веществ из газопровода и цистерн и нередко усугубленной наличием взрывчатых веществ в вагонах. Поэтому в целях обеспечения безопасности крупных станций и железнодорожного пути вблизи газопровода крайне необходим лазерный мониторинг атмосферы воздуха с целью обнаружения летучих углеводородов.

Непрерывное слежение за атмосферой над станцией может обеспечить лазерный локатор (лидар), излучающими элементами которого могут быть: 1) лазер на неодиме в кристалле иттрий-алюминиевого граната

в режиме гигантского импульса, с частотой повторения импульсов до 50 Гц и с преобразованием частоты генерации в третью гармонику ($\lambda = 354$ нм); 2) лазер на ионах хрома в кристалле александрита с преобразованием частоты излучения во вторую гармонику ($\lambda = 375$ нм); 3) газовый лазер высокого давления на молекулах азота ($\lambda = 337$ нм). Поскольку все основные частоты Q -ветвей колебательно-вращательного спектра комбинационного рассеяния молекул бензина, пропана, метана и летучих углеводородов лежат в более длинноволновой области, по сравнению с частотами указанных выше лазеров, то для их регистрации необходимо использовать метод комбинационного (рамановского) рассеяния. Очень важно, что при этом за один лазерный импульс можно определить все основные компоненты взрывоопасных веществ, находящихся в атмосфере воздуха.

Комбинационное рассеяние — это неупругое рассеяние лазерного излучения на молекулах со смещением частоты рассеянного излучения на величину $E = h\nu - h\nu^*$, где ν — частота падающего излучения, ν^* — частота рассеянного излучения. Лазерное излучение переводит молекулу на виртуальный уровень, который немедленно распадается за время порядка 10^{-14} с, испуская фотоны другой длины волны. При этом величина смещения частоты рассеянного излучения является точной характеристикой молекул конкретного типа и обычно соответствует изменению одного колебательного кванта. Если молекула отдает энергию полю излучения, то рассеянное излучение называется антистоксовой компонентой. Спектроскопия комбинационного рассеяния лазерного излучения представляет собой мощный инструмент для дистанционной диагностики вредных веществ, и дает возможность как идентифицировать, так и количественно определять концентрацию вредных примесей в атмосфере. Структура спектра комбинационного рассеяния часто оказывается довольно сложной даже для двухатомных молекул. В особом случае двухатомных молекул, у которых угловой момент количества движения электрона относительно оси равен нулю, правила отбора разрешают колебательно-вращательные переходы с изменением вращательного (r) и колебательного (v) квантовых чисел. При таких условиях спектр комбинационного рассеяния состоит из трех ветвей: $S(r = +2)$, $Q(r = 0)$, $O(r = -2)$ и чисто вращательной структуры в области возбуждения.

Выражение для дифференциального сечения комбинационного рассеяния можно получить путем теоретического рассмотрения поляризуемости молекул при взаимодействии с полем излучения. В нерезонансном случае величина сечений мала. Если частота возбуждения будет близка к соответствующему разрешенному переходу, то величина сечения

возрастает на три порядка. В случае утечки взрывоопасных веществ концентрация их в атмосфере будет совершенно достаточна, чтобы при использовании метода комбинационного рассеяния и импульсного лазерного излучения мощностью порядка 1 Мвт можно было их уверенно обнаружить.

Литература

1. Анциферов В.В., Цирельников Н.И. Разработка лазерных методов экспресс-диагностики гормонов. Тез. докл. научно-технич. конференции: Проблемы железнодорожного транспорта и транспортного строительства Сибири, Новосибирск, 1997, с.234.
2. Анциферов В.В., Смирнов Г.И. Твердотельные лазеры. Монография, изд. СГУПС, Новосибирск, 1997.
3. Анциферов В.В., Ильиных С.П., Миценко И.Д., Рогов И.И. Методы снижения систематической ошибки в лазерных комплексах диагностики железнодорожных и автомобильных путей / Тез. докл. научно-технич. конф.: Проблемы железнод. транспорта и трансп. стр-ва Сибири, Новосибирск, 1997, с.205.
4. Анциферов В.В., Ильиных С.П., Миценко И.Д., Рогов И.И. Оптимальные и рациональные методы выделения сигналов в многокаскадных фотоприемных трактах лазерных систем обеспечения безопасности движения, *ibidem*, с.237.
5. Анциферов В.В., Ильиных С.П., Миценко И.Д. Автоматизация количественного анализа интерферометрической информации в системах обеспечения безопасности движения, *ibidem*, с.233.
6. Анциферов В.В., Смирнов Г.И., Чесноков Ю.А. Принципы высокоинформативной локации, Монография, СГУПС, Новосибирск, 1997.
7. Анциферов В.В., Комаров К.Л., Рогов И.И., Чернышев А.А., Дистанционная экспресс-диагностика теплового состояния букс железнодорожных вагонов / Тез. докл. научно-технич. конф.: Проблемы железнод. транспорта и трансп. стр-ва Сибири, Новосибирск, 1997, с.204.
8. Анциферов В.В., Комаров К.Л., Мальцев А.А., Рогов И.И. Лазерная экспресс-диагностика экологического состояния местности после крушения железнодорожных составов, *ibidem*, с.244.
9. Анциферов В.В., Миценко И.Д., Рогов И.И. Лазерный мониторинг взрывоопасных веществ на железнодорожных станциях, *ibidem*, с.234.

*В.В. Анциферов, С.П. Ильиных, К.Л. Комаров,
И.Д. Миценко, И.И. Рогов, Г.И. Смирнов*

Лазерные многофункциональные диагностические системы

*V.V. Antsiferov, S.P. Iljinich, K.L. Komarov,
I.D. Mizenko, I.I. Rogov, G.I. Smirnov*

Laser multifunctional diagnostic systems

ИЯФ 98-49

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев

Работа поступила 18.06.1998 г.

Сдано в набор 19.06.1998 г.

Подписано в печать 19.06.1998 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1.4 печ.л., 1.1 уч.-изд.л.

Тираж 80 экз. Бесплатно. Заказ № 49

Обработано на IBM PC и отпечатано на
ротапринте ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН

Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.