

излучения 0,45 м. Мобильный лазерный деформограф находился на берегу. Расстояние между станциями излучения и приёма составило 3150 м. В мае эксперимент был повторен в точности расположения пары источник-приемник с применением в качестве носителя гидроакустического излучателя научно-исследовательского судна.

В результате были проведены уникальные экспериментальные работы по излучению низкочастотных гидроакустических сигналов с морского ледового покрова и его регистрация береговым мобильным лазерным деформографом. При обработке экспериментальных данных выявлены особенности результатов анализа принимаемого сигнала методом математической свертки с контрольными данными гидрофона, зависящие от времени года и наличия льда в районе исследования. В обоих экспериментах было выявлено пять устойчивых приходов гидроакустического сигнала, трансформирующегося в сейсмические колебания, согласующимися с геологическими данными района исследований.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (грант 16-29-02023 оф.м).

1. Долгих С.Г., Долгих Г.И., Чупин В.А., Яковенко С.В. О применении мобильных лазерных деформографов// XXIV Международная конференция «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте-2016.—Новороссийск.—12-17 сент. 2016 г.—С. 122-123.
2. Долгих С.Г., Долгих Г.И., Чупин В.А., Яковенко С.В. Применение мобильного лазерного деформографа // Фотоника.—2016.—№6(60).—С. 82-87.
3. Чупин В.А., Долгих Г.И., Пивоваров А.А., Швырев А.Н. Бесконтактный метод исследования морского дна лазерными деформографами// XXIV Международная конференция «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте-2016.—Новороссийск, 12-17 сент. 2016 г.—С. 121-122.
4. Чупин В.А., Долгих Г.И. Самченко А.Н. Неразрушающий бесконтактный метод исследования строения морского дна // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки.—Т. 10.—№ 2. С. 9-15.

## ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНО-ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ МЕТОДОВ В ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

С.Г. Долгих, Г.И. Долгих, В.А. Чупин, С.В. Яковенко  
(Владивосток)

На основе современных лазерно-интерференционных методов в ТОИ ДВО РАН создан ряд приборов для регистрации процессов и волн, протекающих в различных геосферах. Созданы лазерные деформографы вертикального и горизонтального типов [1], позволяющие регистрировать вариации микродеформаций земной коры в частотном диапазоне от 0 (условно) до 10 000 Гц с точностью 0,3 нм, лазерные нанобарографы [2], позволяющие регистрировать вариации атмосферного давления в частотном диапазоне от 0 (условно) до 10 000 Гц с точностью 50 мкПа, лазерные гидрофоны и лазерные измерители вариаций давления гидросферы [3, 4], позволяющие регистрировать вариации гидростатического давления в частотном диапазоне от 0 (условно) до 10 000 Гц с точностью 50 мкПа. Все эти приборы были созданы, установлены

и проверены на полигонах ТОИ ДВО РАН, СКБ САМИ ДВО РАН и других. Для регистрации микродеформаций земной коры на основе современных лазерно-интерференционных методов создан мобильный лазерный деформограф, который позволяет проводить измерения практически в любом месте установочно-стабилизированный гелий-неоновый лазер, который обеспечивает долговременную стабильность частоты  $10^{-9}$ .

С применением данных приборов проводится изучение закономерностей генерации, динамики и трансформации колебаний и волн на границе геосфер диапазона приливов, собственных колебаний Земли, поверхностных и внутренних морских волн, краевых и инфрагравитационных волн. Так экспериментально исследованы характеристики сейшевых колебаний, приливных колебаний, поверхностных и внутренних морских волн, которые позволили ввести новое представление о физике взаимодействия волновых полей океана с литосферой; изучены собственные колебания Земли и высказано предположение о их взаимосвязи с приливами и более низкочастотными колебаниями. Полученные результаты указывают на возможность изучения природы амплитудно-фазовых вариаций тонов и обертонов собственных колебаний Земли с помощью системы разнесённых лазерных деформографов. Теоретически и экспериментально исследованы законы зарождения, динамики и трансформации морских волн инфразвукового диапазона в упругие колебания земной коры.

1. Долгих Г.И., Валентин Д.И., Долгих С.Г., Ковалёв С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В., Фищенко В.К. Применение лазерных деформографов вертикальной и горизонтальной ориентаций в геофизических исследованиях переходных зон. // Физика Земли.—2002.—№8.—С.69-73.
2. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалёв С.Н., Корень И.А., Новикова О.В., Овчаренко В.В., Окунцева О.П., Швеи В.А., Чупин В.А., Яковенко С.В. Лазерный нанобарограф и его применение при его изучении баро-деформационного взаимодействия. // Физика Земли.—2004.—№8.—С.82-90.
3. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Плотников А.А., Чупин В.А., Яковенко С.В. Лазерный гидрофон на основе зеленого лазера LCM-S-111// Приборы и техника эксперимента.—2013.—№5.—С.140-142.
4. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалёв С.Н., Швеи В.А., Чупин В.А., Яковенко С.В. Лазерный измеритель вариаций давления гидросферы. // Приборы и техника эксперимента.—2005.—№6.—С.56-57.
5. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Чупин В.А., Яковенко С.В. О применении мобильных лазерных деформографов.//Труды XXIV международной научной конференции «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте».—2016.—С. 122-123.

## ШИРОКОАПЕРТУРНЫЙ УЗЕЛ ВВОДА ИЗЛУЧЕНИЯ В ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО ДЛЯ ЛИДАРНЫХ СКАНИРУЮЩИХ СИСТЕМ

И.Ф. Поначевная, А.А. Ким  
(Санкт-Петербург)

Лидарная техника широко применяется в метеорологии, обеспечении безопасности полетов, гео- и экологическом мониторинге, системах автоматиче-

ского управления, беспилотных транспортных средствах различных типов и многих других областях. В основе оптической схемы большинства лидаров лежит сканирующая оптическая система, выполненная на открытой оптике. Сегодня прослеживается тенденция развития лидарной техники в сторону перехода на длины волн оптического излучения в диапазоне 1.5 мкм, безопасного для глаз человека. Этот оптический диапазон так же отличается тем, что большая часть схемотехнических решений оптического тракта, кроме телескопа и сканирующего узла, может быть построена на общедоступных пассивных или активных оптоволоконных компонентах. При этом массогабаритные параметры системы могут быть значительно улучшены, а надежность, устойчивость к внешним механическим и температурным воздействиям — увеличена.

Однако существует проблема стыковки и согласования сканирующего узла с оптоволоконным приемопередающим трактом, особенно ярко проявляющаяся в случаях больших частот пространственного сканирования. Малая геометрическая и числовая апертура оптического волокна не позволяют осуществить достаточно эффективный ввод принятого обратно отраженного излучения, что особенно критично при быстром сканировании, когда приемный зрачок успевает сместиться относительно обратно отраженного луча. Этот эффект, называемый инвариантом Лагранжа, значительно ограничивает не только скорость сканирования, но и дальность обнаружения объектов; строго говоря, эти параметры тесно взаимосвязаны.

Нами предложен способ согласования оптоволоконного приемопередающего тракта со сканирующим узлом и телескопом лидара, заключающийся в установке особым образом изготовленной градиентной линзы, располагающейся непосредственно на выходе оптоволоконного приемопередающего тракта. Такая коаксиальная моностатическая схема достаточно проста в реализации и технологична, при этом позволяет осуществить более эффективный ввод излучения в оптическое волокно даже при достаточно высоких частотах сканирования.

Градиентная линза, выполненная в виде цилиндра диаметром 1.8–2 мм, через стеклянную проставку стыкуется с оптическим волокном с совмещением оптических осей, при этом ее длина выбирается таким образом, чтобы обеспечить на выходе требуемую числовую апертуру, определяемую сканирующим узлом. Эффективный приемный зрачок при этом составляет, в зависимости от реализации, 0.9–1.2 мм против 9–10 мкм у одномодового оптического волокна.

Конструктивно решение имеет вид металлической трубки диаметром не более 3 мм и длиной 20–30 мм, содержащей внутри склейку градиентной линзы, стеклянной проставки и оптоволоконного, заделанного в полимерную или стеклянную втулку, при этом свободное оптоволоконно защищается полимерной оболочкой и эластичной манжетой-буфером, предохраняющей от излома в месте вклейки. Выходной торец градиентной линзы просветляется для обеспечения минимального паразитного отражения, критичного для оптических схем такого типа.

По нашим оценкам, применение такого согласующего оптического элемента позволит увеличить дальность сканирования до 10–100 раз в зависимости от реализации сканирующего узла, без уменьшения частоты сканирования.

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ ПО РАЗМЕРАМ

Е.И. Веденин, П.В. Чертый, В.Г. Шеманин  
(Новороссийск)

Аэрозольные выбросы промышленного производства вносят значительный вклад в загрязнение окружающей среды, что наносит вред здоровью человека, а также приводят к потерям производимого сырья. Загрязнение окружающей среды и потери производимого сырья возрастают при возникновении сверхнормативных аэрозольных выбросов, характеризующихся превышением установленных предельно-допустимых значений массовой концентрации аэрозольных частиц в атмосферном пограничном слое нормируемых территорий. Контроль параметров аэрозольных выбросов в реальном времени позволяет минимизировать негативные последствия указанных проблем. Наиболее подходящим способом для контроля параметров аэрозольных выбросов в реальном времени является лазерное зондирование.

Как показано в [1] параметрами, позволяющими обнаруживать возникновение сверхнормативных аэрозольных выбросов являются массовая концентрация и функция распределения частиц по размерам, восстанавливая которую позволяет средний объемно-поверхностный диаметр частиц [2]. Контроль указанных параметров возможно осуществлять путем лазерного зондирования на нескольких длинах волн методом дифференциального поглощения.

Массовая концентрация рассчитывается путем измерения сигнала ослабления на одной длине волны. Для измерения функции распределения частиц по размерам необходимо осуществлять измерение как минимум на трех длинах волн. Кроме того, средний объемно-поверхностный диаметр, необходимый для расчета функции распределения частиц по размерам, определяется как отношение усредненных факторов эффективности на двух разных длинах волн, что требует априорного знания зависимости усредненного фактора эффективности на конкретной длине волны от среднего объемно-поверхностного диаметра.

Упростить измерение функции распределения частиц по размерам возможно путем лазерного зондирования аэрозольных частиц методом обратного рассеяния (лидарным методом). Измерение сигнала обратного рассеивания на двух длинах волн позволяет рассчитывать массовую концентрацию, путем решения лидарного уравнения для двух длин волн:

$$\int_0^R C(r) dr = \frac{1}{2 \cdot \delta_0} \cdot \ln \frac{P_1(R) \cdot E_0 \cdot A_0 \cdot \sigma_0}{P_0(R) \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot \sigma_1} - \frac{1}{\delta_0} \cdot \int_0^R [k_{a1} - k_{a0}] dr, \quad (1)$$

где  $\delta_0$  — сечение резонансного поглощения частиц;  $k_a$  — коэффициент ослабления атмосферы на длине волны лазерного излучения;  $r$  — радиус частиц;  $A$  — аппаратная константа;  $R$  — расстояние от точки расположения лидара до рассеивающего объема;  $E$  — энергия излучения импульса;  $\sigma$  — коэффициент обратного рассеяния.

Измерение сигналов ослабления на трех длинах волн, измеренных методом дифференциального поглощения позволит рассчитать значение массовой