

Перспективы развития систем для мониторинга сейсмодинамики скальных пород

В.А. Жмудь, В.М. Семибаламут, Л.В. Димитров

Институт лазерной физики СО РАН, Россия; Сибирское отделение геофизической службы СО РАН, Россия; НГТУ, Россия; Технический университет Софии, Болгария

Abstract: Под действием гравитационных сил от Солнца и Луны на Земле происходят лунно-солнечные приливы и отливы не только океанической воды, но и грунта, и скальных пород. Эти колебания могут служить предвестниками землетрясений и иных сейсмических событий. До настоящего времени мониторинг таких колебаний не получил достаточно широкого распространения. Это не позволяет достаточно надежно предсказывать время и место предстоящих землетрясений или иных проявлений сейсмической активности Земли. Среди причин недостаточной распространенности этих устройств наряду с недостатком шахт для их установки, другая важнейшая причина – это высокая стоимость и уникальность таких измерителей. Это снижает надежность их работы и не позволяет накопить достаточный статистический материал для научного прогнозирования. Указанные измерители используют лазерный интерферометрический метод измерения приращений плеч интерферометра. Газовые лазеры и высокочувствительные интерферометры крайне дороги, недостаточно надежны. Решение проблемы может основываться на использовании недорогих лазеров (например, полупроводниковых), экономичных оптических измерительных схем и высокоинтеллектуальных методов обработки сигналов, что позволит повысить надежность этих измерений и обеспечит производство сертифицированных серийных образцов для широкого применения. Предлагаемые методы позволяют снизить требования к оптической части устройств за счет более высокой сложности и расширения функциональности электронной и программной части этих устройств, что повысит их точность и надежность и снизит их цену. Поэтому предлагаемые рекомендации по дальнейшей модификации таких устройств, позволят расширить их применение и повысить надежность сейсмических прогнозов.

Ключевые слова: интерферометр, измерения перемещений, измерения вибраций, лазер

1. ВВЕДЕНИЕ

Землетрясения уносят многие жизни и наносят огромный ущерб жителям Земли. Последствия землетрясений были бы намного меньше, если бы можно было точно предсказать их время и место. Чем точнее и чем раньше сделан такой прогноз, тем успешнее можно предотвратить последствия землетрясений.

Один из эффективных методов прогнозирования землетрясений основан на регистрации с помощью лазерных измерителей сверхмалых периодических деформаций скальных пород под действием лунно-солнечных приливно-отливных сил [1–4].

Как известно, гравитационные силы зависят от расстояния до центра масс объекта, порождающего эти силы. Вследствие больших размеров Земли расстояние каждой точки её поверхности до Солнца, и в особенности до Луны, немного отличаются. Этого достаточно для того, чтобы возник градиент гравитационных сил, который заставляет перемещаться не только океаническую воду, но также и скальные породы. В зонах сейсмической активности соединяются тектонические плиты. Даже крайне малые движения тектонических плит под действием лунно-солнечных сил гравитации могут быть измерены с помощью сверхчувствительной лазерной измерительной системы. Если движение плит происходит плавно, то отдельные колебания краев этих плит происходят приблизительно с постоянной амплитудой. Если же одна плита зацепилась за другую, то амплитуда колебаний может хаотически изменяться. Если такая сцепка достаточно сильна, то вследствие движения плит напряжение на их краях растёт до тех пор, пока сцепка не разрушится под действием этого возросшего напряжения. В момент разрушения этой сцепки происходит землетрясение. Поэтому непрерывная регистрация таких колебаний потенциально даёт возможность предсказания землетрясений, а достаточная статистика позволила бы предсказать и время, и место предстоящих землетрясений.

Такова теория, на основе которой созданы и используются лазерные регистраторы деформаций.

На практике ситуация намного сложнее.

Каждый отдельный регистратор может зарегистрировать относительные изменения расстояний в скальных породах в одном из выбранных направлений относительно расстояний в ортогональном направлении. Возможно, это не самый лучший вариант, и

нельзя исключать, что выбранные направления не являются наиболее показательными. Например, можно было бы регистрировать относительные изменения длин не в двух взаимно ортогональных направлениях, а в четырех направлениях, то есть два других направления задаются биссектрисами углов между двумя исходными направлениями регистрации. По всей видимости, целесообразно было бы регистрировать и деформацию в вертикальном направлении, что в настоящий момент не делается в связи с отсутствием технических решений. При этом измеряются лишь относительные деформации (перемещения), регистрация абсолютных величин перемещений также не ведется в связи с отсутствием технических решений.

Известные методы регистрации основаны на использовании традиционных газовых лазеров и на применении схемы интерферометра Майкельсона. В качестве оптических датчиков используются обычные фотоприемники, реагирующие на суммарное количество света, попавшее на их чувствительную поверхность, хотя в настоящее время разработаны и широко используются в других целях фотокамеры и видеокамеры, которые способны воспринимать не только общую величину попавшего света, но и получать двухмерные изображения, по которым можно распознавать интерференционные полосы. При использовании соответствующих оптических схем это может позволить либо резко повысить точность измерения, либо увеличить помехозащищенность этих измерений, то есть получить возможность восстановления информации при характерных случайных кратковременных выпадениях сигнала.

Недостаточность статистических данных связана с уникальностью применяемого для этих измерений оборудования. Это оборудование крайне сложное, дорогое, зачастую не сертифицировано, поскольку является набором экспериментальных образцов. Серийное изготовление такого оборудования требует предварительного решения ряда задач, что делало бы это оборудование более надежным, дешевым и легко ремонтируемым, а также легко заменяемым. С этой целью необходим отказ от неудачных технических решений, поиск изящных, то есть простых и надежных схем получения оптического сигнала, его регистрации и обработки. По-видимому, датчики на основе газовых лазеров не имеют будущего, поскольку эти лазеры являются чрезвычайно сложными оптико-механическими и электронно-оптическими изделиями, требующими множества операций при их изготовлении, а также требующие регламентных работ при их эксплуатации. Перспективные твердотельные лазеры, в частности, полупроводниковые лазеры, в

настоящее время не применяются в таких установках вследствие их относительно небольшой частотной стабильности (при отсутствии специальных схем стабилизации частоты). Большинство известных схем стабилизации частоты основаны на пробных девиациях. Поэтому в таких системах при высокой долговременной стабильности частоты кратковременная стабильность частоты, как правило, намного хуже, чем в лазерах без стабилизации частоты. Такие системы не пригодны для фазовых измерений, которые производятся в лазерных измерителях деформации. Известны схемы стабилизации частоты без существенных частотных девиаций, например, [5], однако, такие схемы пока не получили широкого распространения вследствие отсутствия финансирования на эти исследования.

Поэтому существенное развитие методов и средств предсказания землетрясений на основе непрерывной многоточечной статистики требует решения указанных задач, направленных на повышение точности и надежности этих измерителей и снижение их стоимости.

II. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ РЕГИСТРАТОРА

Прежде всего, следует оговорить, что именно измеряет устройство. Предположительно, прибор закреплен на некоторой оптической скамье, которая жестко связана со скальной породой. Прибор измеряет разницу расстояний по двум взаимно ортогональным направлениям. Эти расстояния отсчитываются от базы прибора до уголковых отражателей, установленных на пьедесталах, жестко закрепленных на скальных породах. Поэтому часть информации теряется: прибор не позволяет различить причину приращения фазы. Например, положительное приращение разницы пути может означать как увеличение длины первого плеча, так и уменьшение длины второго плеча, а может означать оба эти факта, а также, например, увеличение длины обоих плеч при условии, что первое плечо увеличилось больше, или уменьшение длины обоих плеч при условии, что второе плечо уменьшилось меньше. Намного полезнее было бы знать приращение длины каждого из плеч в отдельности по отношению к некоторой неизменной базовой длине. Распространенность указанной схемы измерений, по-видимому, определяется её относительной простотой в том аспекте, что в такой схеме меньше фотоприемников и меньше электронных трактов обработки сигналов. Действительно, в самом простейшем варианте для детектирования приращения разницы оптической длины достаточно использование единственного фотоприемника, как показано на *Рис. 1* на

примере использования интерферометра Майкельсона [7].

На этом *Рис. 1* источником света является лазер 1, оптическая схема 2 содержит светоделительную пластину 7 и пластину 8 для компенсации влияния этой пластины во втором пучке света. Также устройство содержит два уголкового отражателя 3 и 4, фотоприемник 5 и устройство обработки сигнала 6.

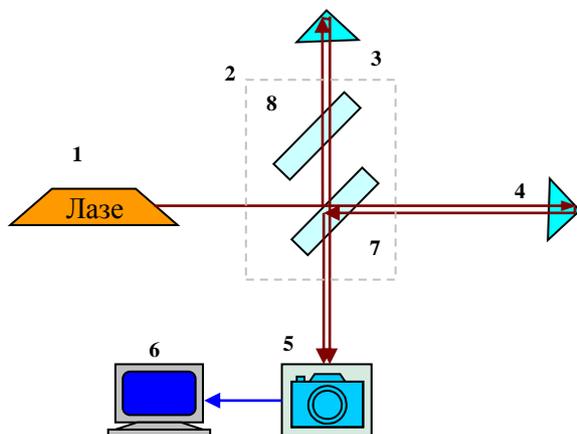


Рис. 1. Упрощенная оптическая схема лазерного датчика сверхмалых перемещений и вибраций: 1 – лазер, 2 – оптическая схема, 3, 4 – уголкового отражатели, 5 – фотоприемник, 6 – устройства сбора и обработки данных (компьютер), 7 – светоделительная пластина, 8 – компенсационная пластина

На первой поверхности пластины 7 луч разделяется на два пучка. Первый пучок идет к отражателю 3 и обратно, второй пучок идет к отражателю 4 и обратно. Поскольку второй пучок дважды проходит сквозь пластину 7, его оптический путь при равенстве длин плеч интерферометра отличался бы от оптической длины второго плеча, если бы не была введена компенсационная пластина 8. За счет пластины 8 оптическую длину обоих плеч можно сделать в точности одинаковой. По задумке Майкельсона такой интерферометр дает интерференционную картину даже если используется не когерентный источник света. В такой схеме при строго нулевой разности фаз свет на фотоприемнике складывается синфазно (для любых частот). При небольшом рассогласовании длин плеч совпадение фаз нарушится, вместо полного сложения интенсивностей будет сложение синусоид с различными фазами. Например, если сдвиг фаз достигнет 180 градусов, то свет от одного плеча будет полностью гасить свет от другого плеча, то есть интенсивность свет на фотоприемнике будет минимальной. Следовательно, интенсивность света в интерферометре изменяется пропорционально разности фаз, что

при малом значении угла можно считать приблизительно линейной зависимостью интенсивности от приращения расстояния.

Даже при такой схеме с нулевой разностью хода желателен узкополосный источник света, поскольку для разных частот будет иметь место разный коэффициент пропорциональности между приращением фазы и приращением длины пути света. Применение лазера решает эту задачу кардинально, поскольку ширина полосы излучения в 10^{10} и более раз меньше, чем само значение частоты излучения. Относительная нестабильность частоты не более 10^9 для наименее стабильного лазера, то есть для нестабилизированного полупроводникового многомодового лазера. Современные средства стабилизации частоты позволяют относительно просто снизить нестабильность частоты до величин менее 10^{-13} (на интервале 1000 секунд и более).

III. ПРАКТИЧЕСКАЯ СХЕМА ИЗМЕРИТЕЛЯ

Схема по *Рис. 1* не используется на практике по многим причинам. Прежде всего, она не позволяет определить знак приращения разности длин: положительное и отрицательное приращение даст один и тот же результат. Кроме того, измерения низкочастотных оптических сигналов сложны и ненадежны. Предпочтительно измерять высокочастотные сигналы, что позволяет устранить шумы засветки, влияние дрейфа темнового тока фотоприемников, упростить фильтрацию и решить некоторые другие проблемы формирования и обработки сигналов.

Для получения сигнала на высокой частоте достаточно в одно из плеч интерферометра ввести, например, частотный сдвиг. В используемых в настоящее время измерительных системах частотный сдвиг вносится путем применения двух лазеров совместно с системой частотно-фазовой автоподстройки. Упрощенная схема такой системы показана на *Рис. 2*. При этом компенсационная пластина 8 становится ненужной. Кроме того, в схеме имеется два источника света, поэтому светоделительная пластина 7 также становится не нужной. Зато требуется две светоделительные пластины на выходе каждого из лазеров для ответвления части излучения в систему фазовой автоподстройки частоты. При этом может использоваться лишь малая часть излучения, например, 10%, тогда как светоделительная пластина 7 в установке по *Рис. 1* должна делить пучок света примерно на равные части.

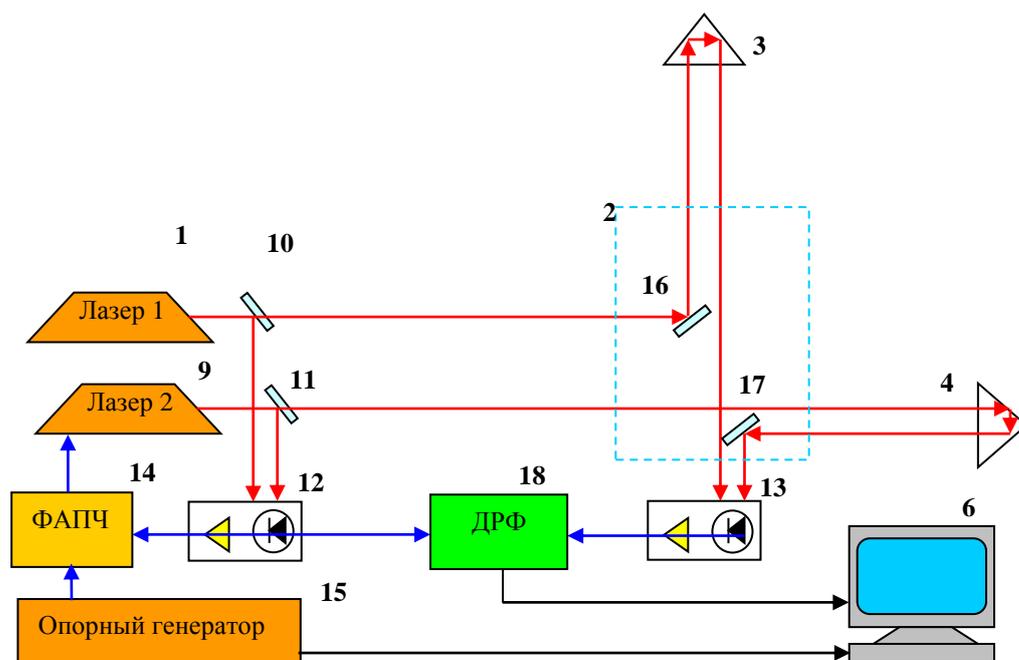


Figure 2. Упрощенная оптическая схема регистрационной установки на основе двух лазеров с привязкой частоты с точностью до фазы: 1 – лазер, 2 – оптическая схема, 3, 4 – уголкового отражатели, 6 – устройство сбора и обработки данных, 9 – второй лазер, 10, 11 – светоделительные пластины, 12, 13 – фотоприемник, 14 – система фазовой автоподстройки частоты, 15 – опорный генератор, 16, 17 – зеркала, 18 – детектор разности фаз

Система частотно-фазовой автоподстройки (ФАПЧ) в структуре по Рис. 2 обеспечивает привязку частоты излучения второго лазера к частоте излучения первого лазера с заданной разностью частот. С этой целью часть излучения от обоих лазеров совмещается на фотоприемнике, где формируется сигнал разностной частоты. Этот сигнал поступает на систему ФАПЧ, где эта частота сравнивается с частотой опорного генератора. Сигнал разности фаз поступает на модулятор частоты второго лазера через регулятор и усилитель. Модулятор, принцип действия которого основан на пьезоэлектрическом эффекте, изменяет оптическую длину резонатора второго лазера. Это заставляет изменяться частоту излучения этого лазера. Направление изменения частоты излучения второго лазера таково, чтобы снизить разность фаз между сигналом с выхода фотоприемника и сигналом опорного генератора. Таким образом, разность частот излучения первого и второго лазеров с точностью до фазы повторяет частоту опорного генератора.

В этой схеме по Рис. 2, очевидно, все расстояния играют роль. На результат измерения скажется расстояние между лазерами, расстояние между любыми двумя оптическими элементами, расстояние между светоделительными пластинами и фотоприемником, и так далее. Приращение каждого такого расстояния даст свой вклад в

результат измерения. Даже длина кабеля от фотоприемника к детектору фазовых приращений также даст свой вклад в результат измерения.

Поэтому такую схему едва ли можно назвать целесообразной.

Следует определить все источники погрешности и рассмотреть мероприятия (схемотехнические решения) для снижения вклада каждого из источников.

В процессе измерения осуществляются следующие операции;

1. Преобразование перемещения в изменение оптического пути схемы.
2. Преобразование оптического пути в соответствующее количество длин волн.
3. Преобразование изменения количества длин волн, укладываемых на оптическом пути, в приращение оптического сигнала.
4. Преобразование оптического сигнала в электрический.
5. Обработка электрического сигнала.
6. Обработка результата обработки (вторичная обработка данных).
7. Вычисление разности результата измерений по различным каналам (плечам).
8. Кодирование сигнала и передача его для последующей обработки и интерпретации результата измерения.

Каждое из этих действий может вносить искажение в итоговый результат распознавания и трактовки предвестников землетрясений.

Поэтому каждое из этих действий следует анализировать и оптимизировать. Порядок действия может изменяться, например, может сначала получаться дифференциальный сигнал, несущий информацию не о длине как таковой, а о разности длин, или о приращении разности длин.

IV. О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ДВУХ ЛАЗЕРОВ

Во всех практических схемах в качестве источника света используется не один лазер, а два, то есть используется система по Рис. 2, а не по Рис. 3 или 4.

Причиной такого технического решения является, во-первых, стремление к увеличению мощности излучения, во-вторых, сомнительное стремление к упрощению оптической и электрической частей устройства, в-третьих, традиции.

В отношении мощности излучения можно отметить, что две различные измерительные системы использовались в двух различных измерительных экспериментах, но идеология двух систем была одинаковой. Первый эксперимент проводился в закрытой шахте на базовых расстояниях не более 100 м, а второй осуществлялся на открытом воздухе на расстояниях от 1,5 до 2 км. Только во втором случае мощность излучения может быть существенной, в первом случае она достаточна, и поэтому вполне мог использоваться только один лазер. Именно первый вариант схемы используется для постоянного мониторинга, а второй случай нехарактерен, он использовался лишь с целью определения потенциальных возможностей метода, и для круглогодичного мониторинга этот эксперимент несущественен. Поэтому аргумент в пользу большей мощности отпадает. При использовании мощных лазеров именно этот выбор задал выбор фотоприемников, который, в свою очередь, задал выбор разностной частоты. Вследствие этого выбора непригодной стала схема с акустооптическим модулятором. Вследствие этого выбора вся электронная часть была разработана и сделана под эту схему, поэтому любая другая оптическая схема измерения потребовала бы разработки новой электронной схемы, и, соответственно, новой программно-аппаратной части системы. Для руководителя этой тематикой отсутствие необходимости разработки программно-аппаратной системы по новой идеологии казалось существенным упрощением дальнейших экспериментов. С позиции специалистов по программно-аппаратным средствам электронной и вычислительной техники такое мнение следует признать ошибочным. Наиболее сложная часть измерительной системы, и наиболее

ответственная – это именно часть, относящаяся к оптическому датчику, если имеется хотя бы малейшая возможность уменьшения погрешности за счет устранения каких-либо ее источников или снижения их вклада, это непременно следует сделать. Усложнение электронной техники для обработки сигнала не является проблемой, тем более при тиражировании системы, когда прототип полностью отлажен на стадии НИР и ОКР.

Поэтому для стационарного измерителя, размещаемого внутри шахты, следует осуществить непредвзятый выбор оптической схемы, на основании обоснованных технических требований и корректно сопоставленных технических возможностей всех вариантов. В этом случае схема на основе единственного лазера видится предпочтительной.

При использовании двух лазеров необходима система фазовой стабилизации второго лазера, которая обеспечит привязку его частоты с точностью до фазы к частоте первого лазера. Эта система должна содержать два светоделительных устройства, дополнительный фотоприемник, систему автоподстройки (как правило, двухканальную с использованием быстрого и медленного контуров стабилизации). Требования к точности и к ширине полосы этой системы крайне высоки, что делает эту систему очень сложной и недостаточно надежной. Кроме того, система фазовой привязки не способна подавить высокочастотные девиации частоты, а также может порождать неконтролируемые броски фазы вследствие срыва слежения при больших механических или акустических помехах. Поэтому от такого решения целесообразно отказаться.

V. ВОЗМОЖНЫЕ МОДИФИКАЦИИ ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ РЕГИСТРАТОРА

Прежде всего, по возможности следует уменьшить количество факторов, влияющих на точность измерения. В частности, точность работы системы фазовой автоподстройки частоты второго лазера напрямую влияет на точность работы всей системы в целом. Указанная система всегда имеет динамическую ошибку, по высокочастотным флуктуациям изменения частоты первого лазера и изменения частоты второго лазера могут существенно отличаться, то есть высокочастотная часть их спектров излучения не совпадает.

Можно предложить, например, с целью получения двух излучений с заданным сдвигом частот использовать акустооптический модулятор. Возможный вид измерительной системы по этому принципу в упрощенном виде показан на Рис. 3. В этой схеме также не нужна компенсационная пластина и светоделительная

устройство.

Для питания акустооптического модулятора 19 (АОМ) применяется последовательно включенные генератор 15 и усилитель мощности 20. Оптическая схема 2 не должна разделять пучки надвое. Вместо этого она должна каждый из пучков направлять к своему отражателю, а отраженный пучок направлять на общий фотоприемник 13, который в данном случае настроен на прием высокочастотного сигнала, несущая частота которого равна частоте генерации сигнала с выхода генератора 15. Детектор фазовых приращений 18 должен вычислять приращения фазы принятого фотоприемником сигнала относительно фазы исходного сигнала от генератора 15. Эти приращения несут информацию о приращении разности длины оптических путей двух плеч, с учетом знака приращения. Далее результат поступает на устройство обработки сигнала для

дальнейшей обработки, кодирования и архивирования и (или) передачи на средства вторичной обработки данных.

Математические соотношения, связывающие приращение фазы с приращением разности длин оптических путей тривиальны и легко выводятся, поэтому их можно опустить. Для качественной работы данной схемы требуется относительно высокая стабильность частоты излучения лазера, как и высокая точность формирования частоты генератора 15. Также требуется жесткое закрепление всех элементов оптической схемы, в особенности, элементов 1, 19, 3, 4, 16, 17 и 18.

Теоретически перемещение лазера относительно АОМ не должно сказываться на результате измерения, но на практике лазер также крайне желательно закреплять неподвижно и на фиксированном расстоянии относительно других элементов.

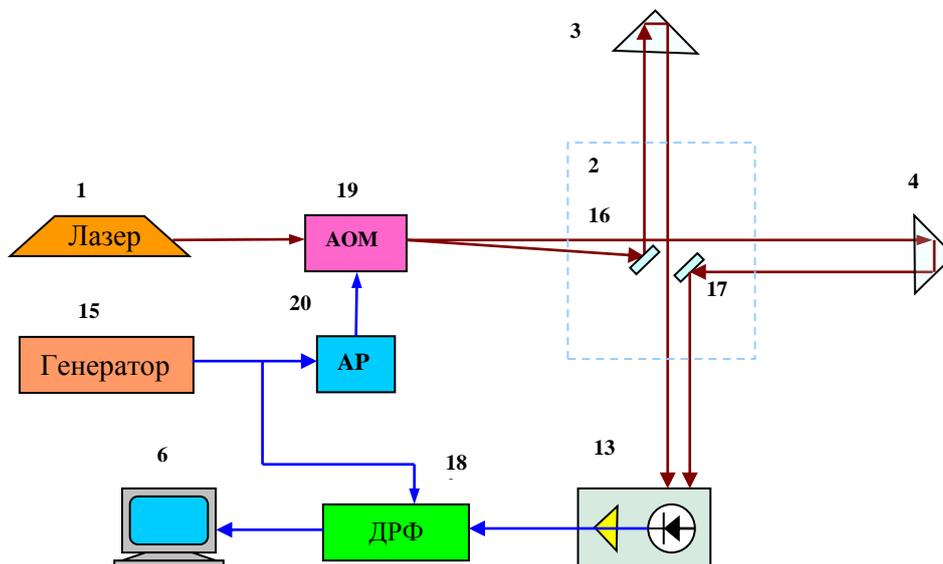


Рис. 3. Упрощенная оптическая схема устройства с АОМ: 1 – лазер, 19 – АОМ, 2 – оптическая часть, 3 и 4 – отражатели, 15 – генератор, 20 – усилитель мощности, 13 – фотодетектор, 18 – детектор разности фаз, 6 – компьютер

Перемещения элементов 3 и 4 определяются движением скальных пород, поскольку эти элементы должны быть прикреплены к соответствующим опорным точкам этой породы.

В работе [6] приводятся расчеты для погрешности измерений в этой схеме. Показано, что на точность оказывают существенное влияние точность формирования частоты излучения лазера, стабильность коэффициента преломления воздуха и некоторые другие факторы. Там же предложена альтернативная схема измерения, основанная на использовании двух пучков света в каждом из плеч интерферометра, как показано на Рис. 4.

В этой схеме получаемые на выходе акустооптического модулятора два пучка света,

имеющие между собой сдвиг частоты, используются каждый в каждом из плеч интерферометра. Например, черным цветом показан пучок света, не имеющий частотного смещения, а красным цветом показан пучок, имеющий смещения частоты. Пучок без смещения может поступать на светоделительную пластину, как в схеме по Рис. 1, после чего делиться надвое. Полученные два пучка могут поступать на оба плеча интерферометра. По аналогичным траекториям, но не совпадающим с траекториями первого пучка, могут распространяться пучки света от второго пучка, имеющего частотное смещение. Это можно реализовать, поскольку площадь зеркал и светоделительных пластин намного больше, чем

диаметр пучка света, а получаемые на выходе акустооптического модулятора пучки пространственно разделены. Далее достаточно пучок от луча без смещения, прошедшего по первому плечу, совместить с пучком от луча со смещением, прошедшего по второму плечу, направив их на первый фотоприемник. Также следует пучок без смещения, прошедший по второму плечу совместить с пучком со смещением, прошедшим по второму плечу, и направить их на второй фотоприемник. На

каждом из приемников получим сигнал приращения разности длин плеч интерферометра. Если эти две разности сложить, то такие факторы, снижающие точность результата измерения, как нестабильность частоты лазера, нестабильность частоты генератора и нестабильность коэффициента преломления воздуха, предположительно скомпенсируют друг друга, поскольку вклад любого из этих явлений в получаемый результат будет противоположный, и при сложении компенсируется.

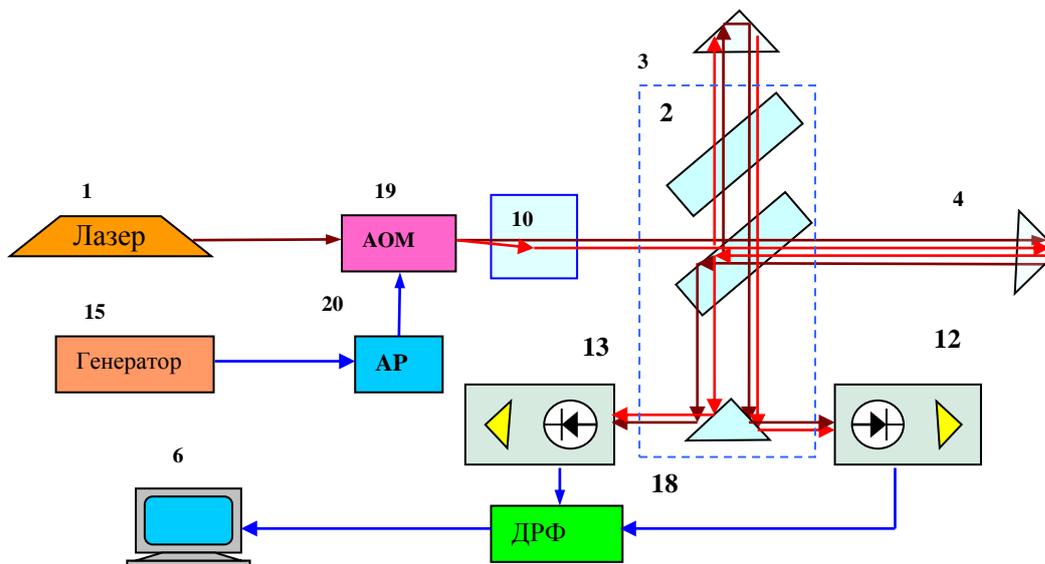


Рис. 4. Упрощенная оптическая схема лаичика сверхмалых перемещений и вибраций с двумя дифференциальными каналами: 1 – лазер, 2 – оптическая схема, 3, 4 – уголкового отражатели, 6 – устройство сбора и обработки данных, 10 – формирователь параллельных пучков, 12,13 – фотоприемники, 15 – опорный генератор, 18 – детектор разностей фаз, 19 – акустооптический модулятор, 20 – усилитель мощности

Недостаток этой схемы состоит в том, что по одному и тому же пути (или по близким оптическим путям) предполагается направлять два световых пучка (на схемах они показаны, соответственно, черным и красным цветом).

Этот недостаток можно преодолеть путем достаточного разнесения этих пучков в пространстве, например, за счет использования достаточно широких уголкового отражателей при использовании достаточно узких оптических пучков. Кроме того, этот недостаток может быть преодолен, если использовать оптические пути расположить один над другим, что затруднительно изобразить в плоской схеме устройства, но не представляет труда при реализации в трехмерном пространстве.

Например, первый луч на выходе акустооптического модулятора (обыкновенный), не имеющий смещения частоты, направим в оптическую схему по траектории, продолжающейся без отклонений, то есть вдоль оси излучения лазера. Второй луч на выходе акустооптического модулятора, имеющий смещение частоты (необыкновенный), направим сначала вниз, а затем за счет зеркала изменим его направление так, чтобы он шел параллельно

первому лучу, но ниже, например, на величину смещения D . Далее организуем обычную схему интерферометра, как показано на Рис. 1. При этом уголкового отражатель 3 развернем на 90° , а уголкового отражатель 4 оставим в исходной ориентации. При этом можно сделать так, например, чтобы нижний луч от интерферометра заходил в уголкового отражатель на уровне, который ниже плоскости симметрии отражателя на $0,5 D$, а верхний луч заходил в этот отражатель на эту же величину выше плоскости симметрии. Тогда нижний луч после отражения пойдет по пути, который пролегает выше исходного пути на D , а верхний луч после отражения пойдет по пути, который на эту величину ниже исходного положения пути этого луча. Вместо фотоприемника 5 установим два фотоприемника, расположенные один над другим на расстоянии D между их центрами. Таким образом, верхний пучок, не имеющий частотного сдвига, располагающийся выше, после отражения от отражателя 3 пойдет по нижней части оптической схемы и на попадет на нижний фотоприемник. Нижний пучок, имеющий частотное смещение, после отражения от отражателя 3, пойдет обратно по пути верхнего пучка света и поступит на

верхний фотоприемник. Во втором плече изменение высоты пучков не будет иметь места, верхний пучок без смещения частоты вернется по верхнему пути и поступит на нижний фотоприемник, а нижний пучок со смещением частоты вернется по нижнему пути и поступит на верхний фотоприемник. Таким образом, в оптической схеме будут сформированы два разностных сигнала. Один из них соответствует результату накопленной разности фаз света по первому плечу без смещения частоты и по второму плечу со смещением частоты, второй соответствует противоположной ситуации. Если плечи одинаковые, то разностная частота в обоих случаях будет изменяться одинаково, и сигнал разности фаз будет нести информацию о стационарности ситуации. Если же возникнет разница длин плеч, то разница фаз принимаемых сигналов будет пропорциональна удвоенному значению этого приращения.

Эту схему можно модифицировать, например, используя в каждом плече два оптических отражателя. В этом случае можно получить не только два различных сигнала, но даже и четыре сигнала, соответствующие всем возможным комбинациям интерферометрических схем.

Может показаться странным, что рекомендуется получение статического сигнала без смещения, как в схеме по Рис. 1. Однако следует учесть, что со времени Майкельсона и его первых опытов технический прогресс дал множество принципиально новых средств регистрации оптических сигналов, прежде всего – видеокамеру. Если свет от двух пучков попадает на фотоприемник параллельно, то сложение этих пучков является результатом сложения двух плоских фронтов, то есть результат может быть одним равномерным уровнем засветки, величина которой зависит от соотношения фаз. Этот сигнал недостаточно информативен, поэтому используется сдвиг частот, чтобы результат представлял собой интенсивность, модулированную во времени по гармоническому закону. Если же пучки света попадают на плоскость фотоприемника под некоторым углом, то результатом будет полосатая структура, называемая интерферометрической картиной (интерферометрические полосы). Видеокамера может регистрировать эту картину с заданной частотой опроса, после обработки зарегистрированной информации можно детектировать перемещение этих полос, также, как и определять направление их перемещения и вычислять величину этого перемещения, что даст возможность определения смещения положения отражателей. Если, например, видеокамера передает изображение с частотой 30 кадров в секунду, и при этом между последующими кадрами перемещение полос не превышает четверти расстояния между ними, то можно

достаточно надежно и без выпадения сигнала восстановить всю картину перемещения этих полос, а значит и всю картину изменения измеряемой разницы расстояний. Чувствительность такой схемы регистрации будет определяться числом пикселей, приходящихся на один период интерференционной картины, но и эта величина может быть улучшена за счет статистического усреднения (фильтрации). При этом ширину полос за счет выбора угла между пучками света можно сделать такой, чтобы, например, в апертуре камеры укладывалось не более двух полос, что даст примерно 2000 пикселей на полосу, если, например, камера имеет 4000 пикселей на ширину экрана.

Таким образом, применение видеокамеры в обсуждаемых устройствах открывает большие перспективы для повышения точности и надежности измерений, при этом удорожание устройства незначительно, вследствие незначительной цены видеокамеры в сравнении с другими дорогостоящими элементами оптической схемы (например, лазер, высококачественные отражатели, зеркала и другие оптические и механические элементы).

VI. ПЕРСПЕКТИВЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ РЕГИСТРАТОРОВ

В работе [8] указана предельная чувствительность измерителя деформаций на уровне $S = \lambda/4096$ мкм (при длине волны излучения $\lambda = 0,6328$ мкм), то есть порядка $S = 0,015$ нм. Термин «чувствительность» в данном контексте следует трактовать как «порог нечувствительности», то есть система не чувствует изменения менее указанной величины S . Там же сказано, что обеспечиваются измерения с относительной погрешностью в пределах $\delta = \Delta L/L = 2 \cdot 10^{-9}$. Очевидно, что величина погрешности может многократно превышать величину S . Эти величины могут совпадать в указанных терминах только при измерении на расстоянии $L_0 = 1$ см, чего, разумеется, в системе нет. В измерительной системе величина плеч интерферометра никак не может быть менее $L_1 = 1$ м, на практике она составляет $L_2 = 100$ м, а в натуральных испытаниях эта величина более $L_3 = 1$ км. Это дает погрешность системы, соответственно, на уровне $\Delta L = \Delta L$, то есть на расстоянии $L_1 = 1$ м это дает $\delta_1 = 2$ нм, а на расстояниях L_2 и L_3 , соответственно, $\delta_2 = 0,2$ мкм и $\delta_3 = 2$ мкм. В этой связи возникает вопрос о целесообразности построения измерительных схем с большой базой измерения, или, если большая база необходима, крайне актуальной задачей становится создание методов и средств измерения приращений длины на указанных базах со снижением погрешности до требуемых малых величин. Если же указанная задача не решена, но устройства подобного типа с подобными

характеристиками используются для регистрации приращений движений скальных пород в динамике. То есть динамика таких движений детектируется намного более достоверно, чем полученная величина (в статике), то есть факт движения скальной породы детектируется более достоверно, чем факт достоверного измерения приращения расстояния от измерителя до уголкового отражателя. То есть измеритель регистрирует достоверно лишь периодическое приближение и удаление отражателя, но не дает достоверных сведений о приближении или удалении отражателя в среднем, а также не позволяет измерить расстояние как таковое. Эта ситуация плохо согласуется с принципами измерения перемещений лазерными методами.

Среди наиболее часто обсуждаемых причин недостаточной точности можно выделить следующие: а) недостаточную точность формирования частоты лазерного излучения; б) недостаточную точность формирования разностной частоты от опорного генератора; в) недостаточную стабильность коэффициента преломления в воздухе (и, соответственно, скорость света в воздухе, и, следовательно, зависимость оптической длины пути от истинного расстояния); д) недостаточную точность системы измерения разности фаз.

В отношении точности измерения разности фаз можно утверждать, что эта проблема решена окончательно. Измерения разности фаз парных высокочастотных сигналов могут быть осуществлены с погрешностью на уровне 0,0025 % от периода без особых сложностей, а при использовании специальных методов, например, [8] эта величина может быть снижена до 0,001 % в полосе частот около 6 кГц, что при осреднении позволяет снизить эту погрешность еще в 10-100 раз. Эти погрешности намного ниже, чем требуется от измерительной системы.

В некоторых случаях схема может быть построена таким образом, что собственная частота излучения лазера также не войдет в результат измерения.

Частота опорного генератора может быть стабилизирована с погрешностью на уровне 10^{-9} относительно просто. Приблизительно в 10 раз эта погрешность может быть снижена за счет не слишком сложных мер (термостабилизация кварцевого опорного резонатора и т.п.). Доступны микрочипы генераторов и с более высокой точностью. Хотя в интернет-сети появляются сообщения о разработках генераторов частоты с точностью на уровне 10^{-18} , это, по всей вероятности, не соответствует фактической погрешности стабилизации, поскольку в данном случае речь идет о нестабильности параметра Алана, что является статистической характеристикой, описывающей лишь уход частоты относительно собственного значения, но

никак не зависящий от фактической погрешности ее формирования. И все же можно утверждать, что стабильность частоты на уровне погрешности не более 10^{-13} - 10^{-14} может быть достигнута без недопустимо сложного технического решения, хотя и с существенным усложнением системы в целом. На основе изложенного можно предложить взять за основу погрешность 10^{-11} как наиболее обоснованную величину для будущих серийно производимых лазерных измерительных устройств указанного типа. В случае относительно стабильного коэффициента преломления в среде это позволило бы уверенно измерять приращения длин в оптических плечах интерферометров с погрешностью на уровне этой величины, то есть 10^{-11} . Например, на базовой длине 100 м это дало бы погрешность не более 1 нм. Здесь речь идет именно о погрешности, а не о чувствительности метода, которая может быть намного выше.

Таким образом, основной проблемой измерителя является компенсация вклада изменений показателя преломления в воздухе, поскольку обеспечить вакуум на плече длиной в 100 м не представляется возможным.

Схемы стабилизации можно разделить на пассивную и активную. Пассивной стабилизацией в данном случае можно было бы назвать поддержание постоянной температуры, давления, влажности и состава воздуха в измерительной шахте. В какой-то степени это осуществляется. Тем не менее сезонные и суточные колебания температуры, влажности, давления имеют место и полностью исключены быть не могут.

В измерительной установке используется блок компенсации влияния атмосферы. Принцип действия этого блока состоит в том, что одним из измерительных каналов системы измеряется приращение длины эталонного плеча, образованного эталоном длины. Оптический измерительный луч света проходит расстояние, заданное этим эталоном длины, столько раз, сколько необходимо для того, чтобы общее расстояние стало равным длине измерительных плеч интерферометра. Устройство не измеряет эту длину как таковую, а лишь дает сигнал приращения длины. В предположении, что длина эталона не изменяется в ходе измерений, можно считать, что результат приращений сигнала, который можно было бы трактовать как приращение длины, на самом деле порожден приращением оптического пути вследствие изменения оптического пути в воздухе, то есть вследствие изменения состава воздуха или его показателей (давления, температуры, влажности).

Здесь возникает вопрос, который ранее не поднимался. Вопрос состоит в том, что можно считать более стабильным – длину эталона, или оптическую длину пути, которая складывается из стабильности длины волны излучения (или длины

волны для разностной частоты, которая распространяется в плече со скоростью света). Предположим, что эталон длины изготовлен из инвара [9–11]. Этот сплав обладает малым температурным коэффициентом линейного расширения в интервале температур от -100 до $+100$ °С. Его коэффициент теплового расширения составляет около $1,2 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Очень чистый сплав (с содержанием кобальта менее 0,1 %) имеет вдвое меньший коэффициент линейного расширения. Если температура в шахте стабильна в пределах 1°С, то применение эталона длины сразу же ограничивает погрешность измерения длины этим способом до величины не менее 10^{-6} , то есть на 100 м это дает 100 мкм. Даже если осуществить стабилизацию температуры эталона длины с погрешностью на уровне 0,01°С, погрешность измерения в лучшем случае будет снижена до значения 1 мкм, что недостаточно. Такой стабилизации в реальных системах нет. Следует также учесть, что на эталон длины действуют нагрузки (так как инвар не может использоваться в свободном состоянии, а может лишь быть частью несущей конструкции, на которой закреплены отражающие зеркала), так что приведенная оценка погрешности дает оптимистический результат для нижней границы погрешности, на самом деле она может быть в 10 и более раз выше. На этом основании можно усомниться в целесообразности использования блока компенсации влияния атмосферы с эталонным плечом. Отметим, что в фактической установке этот блок присутствует, как показано на Рис. 5 (отмечено синей стрелкой) [12, 13].



Рис. 6. Двухканальный лазерный измеритель деформаций на сейсмостанции «Талгар» (Алма-Ата), синей стрелкой показан блок компенсации влияния атмосферы

Для ясности дальнейшего изложения приводить схему с опорным пучком нет необходимости. По сути, такой схемой может служить любая из приведенных выше схем, где один канал – измерительный, а второй канал – опорный.

На основании осуществленных расчетов

можно было бы предположить, что в данной статье утверждается, что схема компенсации атмосферы не может быть эффективным решением задачи, и поэтому она не нужна. На самом деле это не вполне так. Можно лишь утверждать, что не нужна вследствие неэффективности схема компенсации атмосферы, в которой в качестве вторичного эталона длины используется некоторая механическая структура, например, из инварового стержня. Отметим, что механическая структура – не единственный и не самый лучший эталон длины. Действительно, если, как ранее было установлено, нестабильность частоты лазерного излучения легко может быть снижена до величин 10^{-13} – 10^{-14} и ниже, а рекордно эта величина может составить 10^{-16} и даже 10^{-18} , то нелогично в качестве эталона длины использовать механическую конструкцию. Первичным эталоном длины признан эталон, который определен через эталон частоты и скорость света. Поэтому можно предположить, что длина, которая определена заданным количеством длин волн оптического излучения в вакууме, имеет более высокую стабильность (точность, воспроизводимость), чем длина, заданная механической конструкцией из любого сколь угодно стабильного материала. Следовательно, для формирования надежного опорного источника длины необходимо использовать дополнительный специально изготовленный интерферометрический эталон длины, находящийся в вакууме.

VII. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ СИСТЕМЫ

Следует учесть, что назначение эталона длины состоит не столько в формировании некоторой образцовой меры, сколько в осуществлении возможности компенсации влияния атмосферы на результат измерения.

В этом случае идея измерителя может быть, например, следующей.

1. Наиболее стабильный лазерный излучатель (возможно, не слишком большой мощности) должен использоваться для измерения приращения длины, например, инварового стержня, на концах которого закреплены отражающие зеркала. При этом вовсе не обязательно использовать многопроходную схему. Весь оптический путь этого датчика должен находиться в вакууме.

2. Другой лазерный излучатель должен использоваться для измерения той же самой по оптическому пути, который проходит не в вакууме, а в атмосфере, характерной для всей измерительной установки.

3. Частота второго лазера должна подстраиваться так, чтобы результат измерения расстояния между зеркалами в воздухе совпадал с

результатом измерения расстояния в вакууме на основе первого лазера в качестве опорного.

Как модификация этого метода, можно

рассмотреть вариант с единственным лазером, в котором второму пучку придается частотный сдвиг, частота которого может изменяться.

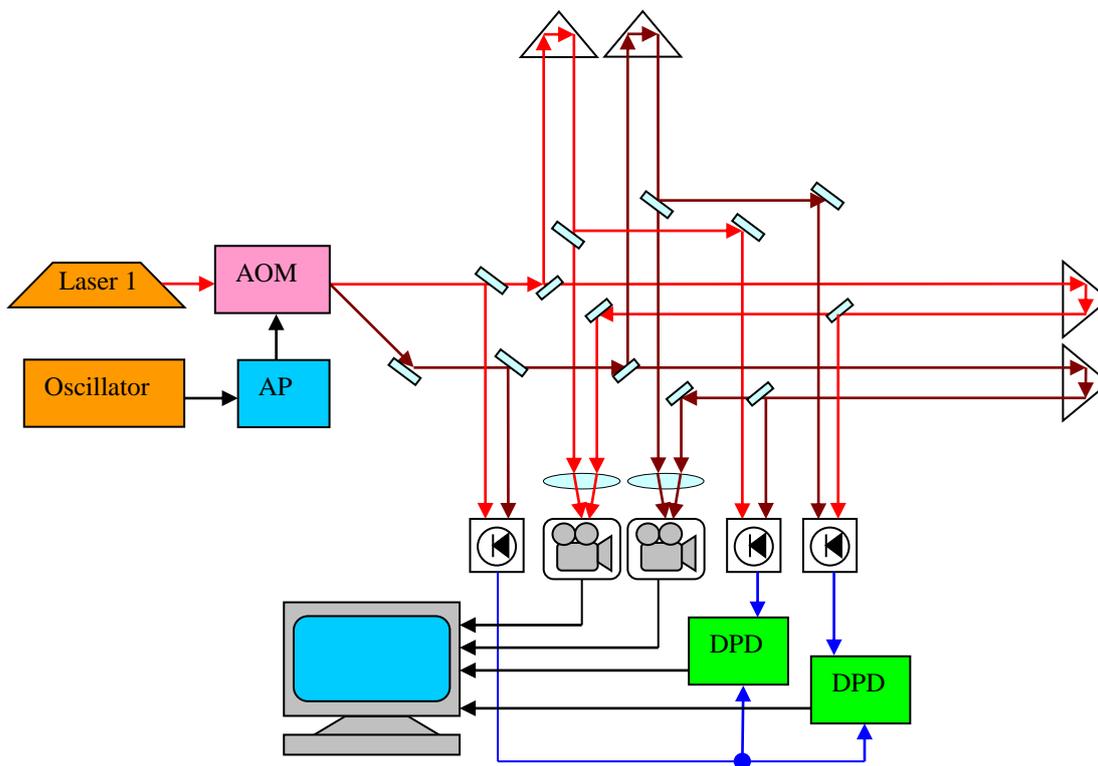


Рис. 4. Упрощенная оптическая схема регистрационной установки на основе двух лазеров с привязкой частоты с точностью до фазы

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Багаев С.Н., Орлов В.А., Фомин Ю.Н., Чеботаев В.П. Гетеродинные лазерные деформографы для прецизионных геофизических измерений. Физика Земли. 1992, № 1, с. 85–91.
- [2] С.Н. Багаев, А.С. Дычков, А.Э. Ом, В.А. Орлов, Ю.Н. Фомин, В.П. Чеботаев. Двухчастотная интерферометрическая система для измерения линейных перемещений. Патент RU № 362923.
- [3] С.Н. Багаев, В.А. Орлов, А.Ю. Рыбушкин, В.М. Семибаламут, Ю.Н.Фомин. Двухчастотная лазерная интерферометрическая система для измерения линейных перемещений. Патент RU №2082085.
- [4] S.N. Bagayev, V.A. Orlov, A.V. Pyatigorets. Observation of Earth's oscillations by a laser interferometric method. Proceedings of SPIE 2006, vol. 6284, PP.628404-(12 pages).
- [5] Орлов В.А., Панов С.В., Парушкин М.Д., Фомин Ю.Н. О связи сейсмичности Земли с солнечной активностью по результатам прецизионных деформографических наблюдений, Труды конференции «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли». Новосибирск, 2008, С.31-40.
- [6] V. A. Zhmud. The Use of the Feedback Control Systems in Laser Physics Researching Experiments. Proceedings of RFBR and DST Sponsored "The 2-nd Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics", 10 – 13 September, 2011, Additional volume, pp.40–43.
- [7] В.А. Жмудь. Новый взгляд на опыт Майкельсона. Сборник научных трудов НГТУ. 2004. №4 (38). С. 157–164. ISSN 2307-6879.
- [8] Воевода А.А., Гончаренко А.М., Жмудь В.А. Фазометры для радиочастотных и лазерных измерителей перемещений и вибраций. ч.1. // Научный вестник НГТУ. 2009. - N 4(37). С.25-32. ч.2. // Научный вестник НГТУ. 2010. - N 1(38). С.35–74.
- [9] ГОСТ 10994-74. Сплавы прецизионные. Марки
- [10] <https://ru.wikipedia.org/wiki/Инвар>
- [11] Материалы в машиностроении. Справочник. Том 3. Специальные стали и сплавы. М., Машиностроение, 1968 г, стр. 297.
- [12] В.А. Орлов, Ю.Н. Фомин, В.М. Семибаламут, Д.О. Терешкин, В.А. Жмудь / Комплекс для измерения сверхмалых приливных деформаций скальных пород на основе He-Ne-лазера. Автоматика и программная инженерия. 2014. №3(9). С. 54-65.
- [13] V.A. Orlov, M.D. Parushkin, D.O. Tereshkin, Yu.N. Fomin, V.A. Zhmud. The usability of the laser methods in monitoring of Earth seismic dynamics // Proceedings of DST-RFBR-Sponsored Second Indo-Russian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics. NSTU, Novosibirsk, Russia. 9th – 12th September 2011. Новосибирск, НГТУ. pp. 176–183.



Владимир Михайлович Семибаламут – ведущий научный сотрудник Сибирского отделения Геофизической службы СО РАН, кандидат физико-математических наук.

E-mail: wladim28@yandex.ru



Вадим А. Жмудь, заведующий кафедрой Автоматики в Новосибирском государственном техническом университете, главный научный сотрудник ИЛФ СО РАН.

E-mail: zhmud@corp.nstu.ru



Любомир В. Димитров, декан машиностроительного факультета Технического университета Софии (София, Болгария), доктор наук, профессор, автор более 200 научных статей. Область исследований: мехатроника, автоматика, микроэлектронные модули и системы и их применение (MEMS).

E-mail: lubomir_dimitrov@tu-sofia.bg

Prospects for the Development of Systems for Monitoring Seismodynamics Rock

V.A. Zhmud, V.M. Semibalamut,
L.V. Dimitrov

Abstract. Lunar-solar tides occur on the Earth surface under the influence of gravitational forces of the Sun and Moon not only with ocean water, and with soil and rock. These oscillation movements may be harbingers of earthquakes and of other seismic events. So far, the monitoring of these oscillations is not disseminated widely enough. It does not allow reliably predict the time and location of upcoming earthquakes or other seismic activity of the Earth. Among the reasons for the lack of prevalence of these devices along with the lack of mines for their installation, another important reason there is the high cost and the uniqueness of such sensors. This reduces the reliability of their work and do not allow to accumulate sufficient statistical data for scientific forecasting. These sensors use laser interferometer method of measuring of the increments of the interferometer arms. Gas lasers and highly sensitive interferometers are extremely expensive and not reliable enough. The solution can be based on the use of inexpensive laser (such as semiconductor ones), as well as the use of the efficient optical measuring systems and highly intelligent signal processing methods that will improve the reliability of these measurements and ensure the production of certified sensors models for widespread use. The proposed methods can reduce the demands on the optical part of the device due to the higher complexity and extend the functionality of electronic part and

software of these devices, which will increase their accuracy and reliability, and lower their price. Therefore, the proposed recommendations for further modification of such devices will expand their application and increase the reliability of seismic forecasts.

Key words: interferometer, displacement measurement, vibration measurement, laser

REFERENCES

- [1] S. Bagayev, V. Orlov, Yu. Fomin, V. Cheborayev. Heterodyne laser deformation meters for the precise geophysical measurements. *Earth Physics*. 1992. N 1, p. 85–91.
- [2] Russian Patent N 362923. S. Bagayev, A. Dichkov, A. Ohm, V. Orlov, Yu. Fomin. Two-frequency interferometer system for the measuring of the linear displacements.
- [3] Russian Patent N 2082085. S. Bagayev, V. Orlov, A. Ribushkin, V. Semibalamut, Yu. Fomin. Two-frequency interferometer system for the measuring of the linear displacements.
- [4] S.N. Bagayev, V.A. Orlov, A.V. Pyatigorets. Observation of Earth's oscillations by a laser interferometric method. *Proceedings of SPIE 2006*, vol. 6284, PP.628404-(12 pages).
- [5] V. Orlov, V. Panov, S. Parushkin, M. Parushkin, Yu. Fomin. About the relation between seismic activity of the Earth with the Sun activity on the results of the precision deformation measurements. *Proceedings of the conference "Geodynamics and stress of the Earth's interior"*, Russia, Novosibirsk, 2008, p.31–40.
- [6] V. A. Zhmud. The Use of the Feedback Control Systems in Laser Physics Researching Experiments. *Proceedings of RFBR and DST Sponsored "The 2-nd Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics"*, 10 – 13 September, 2011, Additional volume, pp.40–43.
- [7] V.A. Zhmud. *Novyj vzgljad na opyt Majkel'sona*. *Sbornik nauchnyh trudov NGTU*. 2004. №4 (38). S. 157–164. ISSN 2307-6879.
- [8] Voevoda A.A., Goncharenko A.M., Zhmud V.A. *Fazometry dlja radiochastotnyh i lazernyh izmeritelej peremeshhenij i vibracij*. ch.1. // *Nauchnyj vestnik NGTU*. 2009. - N 4(37). S.25-32. ch.2. // *Nauchnyj vestnik NGTU*. 2010. - N 1(38). S.35–74.
- [9] GOST 10994-74. *Splavy precizionnye*. Marki
- [10] <https://en.wikipedia.org/wiki/Invar>
- [11] *Materialy v mashinostroenii*. Spravochnik. Tom 3. *Special'nye stali i splavy*. M., Mashinostroenie, 1968 g, str. 297.
- [12] V.A. Orlov, Ju.N. Fomin, V.M. Semibalamut, D.O. Tereshkin, V.A. Zhmud. *Kompleks dlja izmerenija sverhmalyh prilivnyh deformacij skal'nyh porod na osnove He-Ne-lazera*. *Avtomatika i programmaja inzhenerija*. 2014. №3(9). C. 54-65.
- [13] V.A. Orlov, M.D. Parushkin, D.O. Tereshkin, Yu.N. Fomin, V.A. Zhmud. The usability of the laser methods in monitoring of Earth seismic dynamics // *Proceedings of DST-RFBR-Sponsored Second Indo-Russian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics*. NSTU, Novosibirsk, Russia. 9th – 12th September 2011. Novosibirsk, NSTU. p. 176–183.