

Комплекс для измерения сверхмалых приливных деформаций скальных пород на основе He-Ne-лазера

В.А. Орлов¹, Ю.Н. Фомин¹, В.М. Семибаламут³, Д.О. Терешкин¹, В.А. Жмудь¹
¹ИЛФ СО РАН, ²ФГБОУ ВПО НГТУ, ³ФГБУН Геофизическая служба СО РАН

Аннотация: Описан комплекс, позволяющий измерять разность поперечных и продольных деформаций скальных пород под действием приливных лунно-солнечных циклических изменений гравитационных сил.

Ключевые слова: Предвестники землетрясений, лазерная метрология, измерения сверхмалых перемещений и вибраций

ВВЕДЕНИЕ

Оптические методы наблюдений деформационных процессов в скальных породах позволили связать изменения в этих процессах с накоплением критических деформаций в породах, предшествующих землетрясениям [1–16]. Это позволило предположить, что непрерывный мониторинг таких деформаций при достижении необходимой точности может позволить заблаговременно предсказать с высокой вероятностной достоверностью землетрясения в зоне наблюдения аномалий в этих процессах. Такой мониторинг целесообразен при достаточной надежности предсказаний, которая достигается лишь в случае высокой надежности, непрерывности и оперативности мониторинга. Это требует тщательной разработки не только научных основ указанных измерений, но также конструкторской проработки всех узлов измерителя, проведения длительных испытаний в различных условиях, широкого внедрения измерительных комплексов в различных сейсмоопасных зонах.

В статье описывается прототип такого измерителя, прошедший стадии НИР и ОКР, что позволяет рекомендовать его для серийного производства и внедрения. Устройство разработано в Институте лазерной физики СО РАН в соавторстве с ФБГОУ ВПО НГТУ в области электронных блоков, алгоритмов и программ обработки.

1. ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Автоматизированный лазерный измерительный комплекс предназначен для геодинамического мониторинга напряженно-деформированного состояния горных пород и исследования деформационных колебаний накануне землетрясений с целью выявления долгосрочных и краткосрочных предвестников. Двухканальный лазерный измеритель (далее кратко – деформограф) относится к интерференционным приборам, построенным по схеме неравноплечего интерферометра Майкельсона с переносом фазовой информации из оптического диапазона в радиочастотный диапазон методом оптического гетеродинамирования. Разработка защищена патентами: [1–3].

Принцип работы измерительной системы основан на непрерывной регистрации изменения фазы световой волны во времени, обусловленного эффектом Доплера при отражении излучения от движущегося объекта (зеркального отражателя, укрепленного на исследуемом объекте). Величина перемещения определяется из анализа разницы фаз двух сигналов радиочастоты, поступающих от фотоприемников опорного и измерительного оптических каналов на электронную схему измерительного фазового детектора. Применение блока компенсации изменения показателя преломления воздуха позволяет проводить измерения в открытой атмосфере горных выработок без дополнительных вакуумных лучеводов или лучеводов избыточного давления. В этих условиях обеспечиваются измерения с относительной погрешностью в пределах $\sim 2 \cdot 10^{-9}$ ($\Delta L/L$). Предельная чувствительность измерителя к перемещениям $\lambda/4096$ мкм (при длине волны излучения $\lambda = 0,6328$ мкм).

На *рис. 1* приведена блок-схема двухканального лазерного деформографа. Внешний вид оптико-механических блоков показан на *рис. 2*.

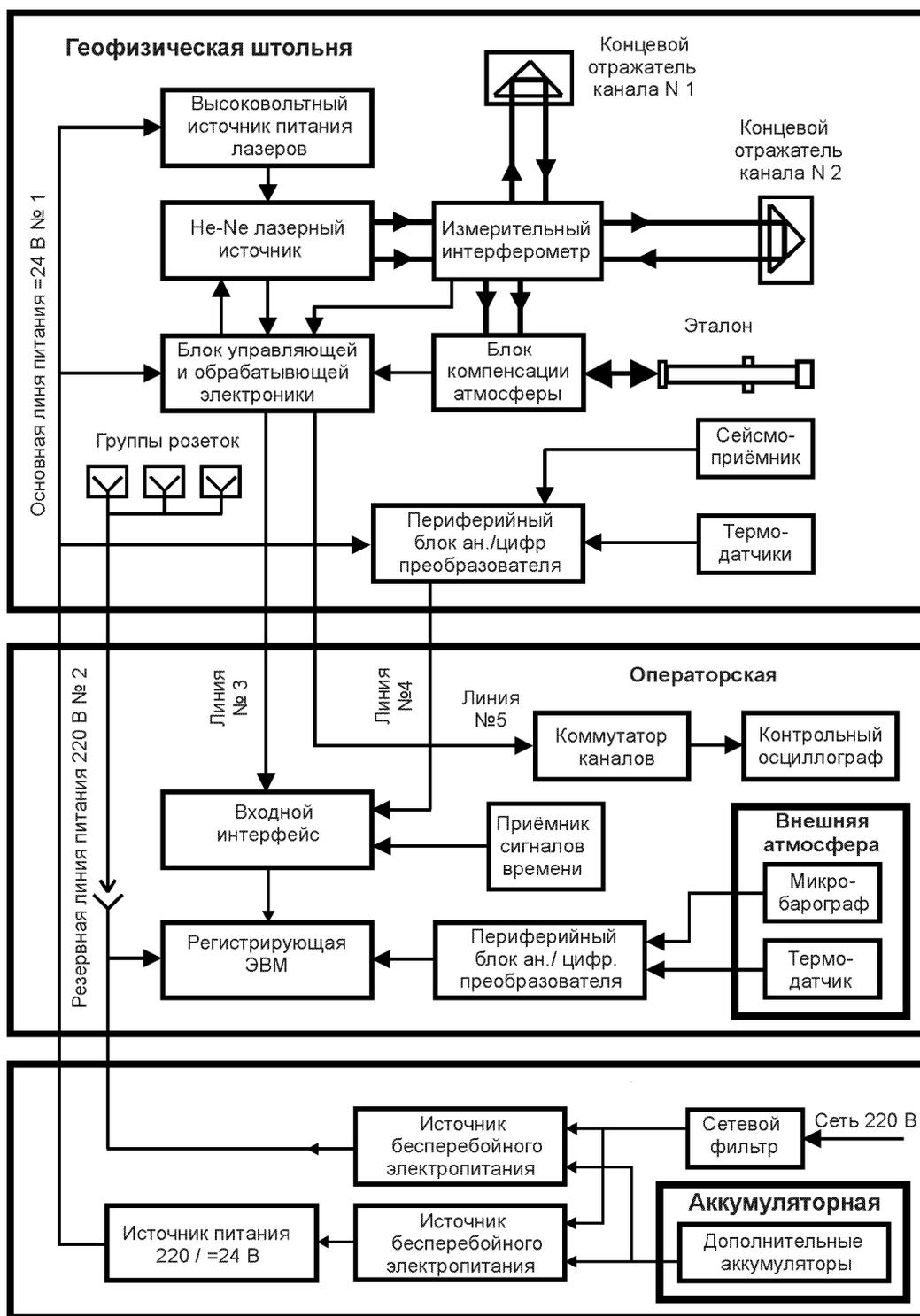


Рис. 2. Блок-схема деформографа



Рис. 2. Внешний вид опико-механических блоков демормографа

В качестве примера регистрируемых деформационных процессов на рис. 3 приложения приведен фрагмент деформограммы, полученной с использованием экспериментального аналога предлагаемого лазерного измерительного комплекса. На регистрограмме, на фоне периодической приливной деформации чётко выделяется предвестник близкого землетрясения, произошедшего в Юго-Западной части акватории озера Байкал. Форма предвестника хорошо согласуется с приведёнными в [5] примерами, на которых показаны характерные особенности в ходе деформационных процессов накануне землетрясений. Измерительный комплекс установлен в штольне на Южно-Байкальском прогностическом полигоне (с/ст. Талая) и используется для проведения непрерывной регистрации деформационных процессов в рамках решения задачи по поиску предвестников землетрясений. Герметичные корпуса опико-механических и электронных блоков обеспечивают длительную эксплуатацию измерительного комплекса в условиях 100 % влажности воздуха.

Рассмотрим устройство измерительной опико-механической и электронных частей лазерного измерительного комплекса.

2. ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ БЛОКИ

2.1. Лазерный источник излучения

Лазерный источник предназначен для получения измерительного и гетеродинного излучений. Обеспечивается разность оптических частот, равная 1 МГц. Эта частота синхронизирована по фазе с частотой опорного радиогенератора с погрешностью не более 10^{-3} рад. Конструкцией блока предусмотрена установка в нем дополнительного стабилизированного по частоте He-Ne-лазера или оптического эталона частоты, что позволит, в случае необходимости, стабилизировать

рабочую длину волны основных лазеров.

Для увеличения относительной стабильности частот излучений лазеров и уменьшения требуемого динамического диапазона обработки механических возмущений, воздействующих на лазеры, электронной системой частотно-фазовой автоподстройки частоты (ЧФАП), оптические зеркала резонаторов и активные элементы смонтированы на едином основании. Основание выполнено из сплава Н 36 (инвар) с малым значением температурного коэффициента линейного расширения, за счет чего обеспечивается незначительное изменение оптической длины резонаторов при изменении температуры. Для настройки резонаторов лазеров в конструкции применяются юстировочные узлы высокой механической стабильности.

Для снижения температуры разрядного промежутка (капилляра) в активных лазерных элементах и увеличения за счет этого срока их эксплуатации, конструкцией основания обеспечивается отвод тепла от их внешней поверхности. Используемые в блоке лазерные активные элементы оригинальной конструкции рассчитаны на непрерывный режим эксплуатации в течение 10^{15} тыс. часов.

Для управления частотой излучения, зеркала оптических резонаторов основных лазеров, укреплены на пьезокерамических элементах. При подаче на них управляющих напряжений от усилителей быстрого и медленного колец регулирования основной (№ 1) и дополнительной (№ 2) электронных систем ЧФАП, происходит изменение оптической длины резонаторов и, соответственно, изменение частоты излучения лазеров. За счет этого осуществляется фазовая синхронизация и стабилизация разностной частоты их излучений по частоте опорного радиочастотного генератора, а также частотная привязка к стабилизированному лазеру. Обработка больших по амплитуде низкочастотных механических возмущений обеспечивается

медленным кольцом регулирования ЧФАП и девятислойным пьезокерамическим элементом, а высокочастотных – быстрым кольцом регулирования и трехслойным элементом.

Расширение частотного диапазона обработки механических возмущений электронной системой ЧФАП достигается за счет увеличения частоты механического резонанса системы,

объединяющей основание, юстировочный узел, пьезопакет и зеркало. Для этого оптические зеркала (частично металлизированные) и пьезопакеты припаиваются легкоплавким оловянно-индиевым припоем к механическим юстировочным элементам. На *рис. 3* приведена принципиальная оптическая схема лазерного источника.

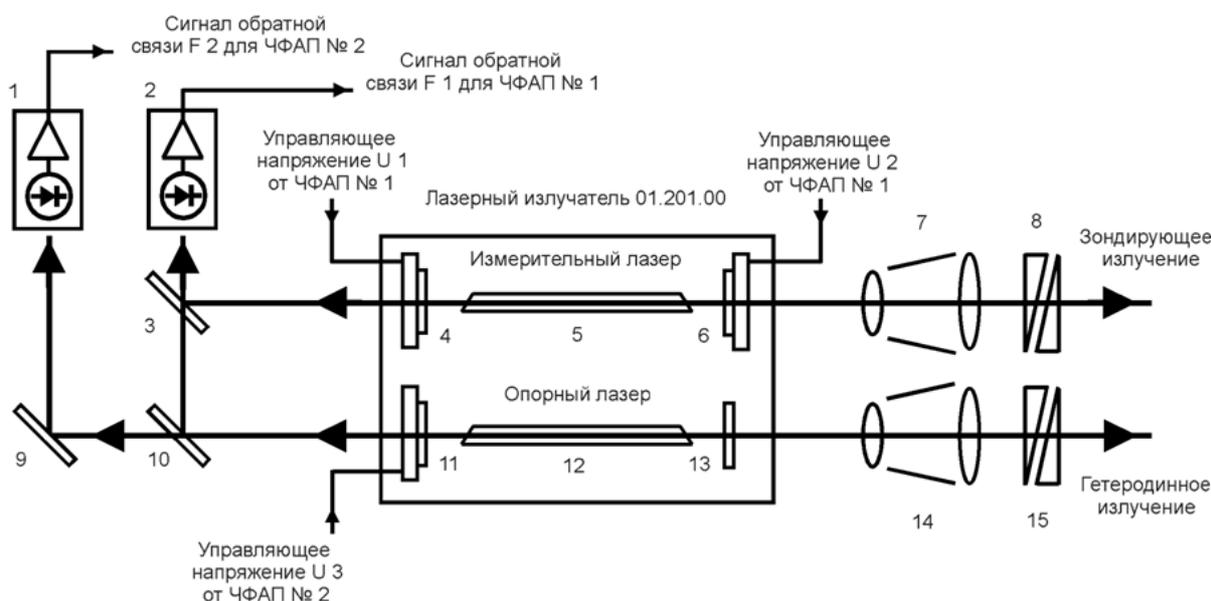


Рис. 3. Принципиальная оптическая схема лазерного источника

Лазерный излучатель состоит из двух *He-Ne*-лазеров мощностью по 1 мВт с рабочей длиной волны 0,6328 мкм. Один из них является опорным (гетеродинным), а второй – измерительным, частота излучения последнего отстраивается на 1 МГц от частоты излучения опорного.

Опорный лазер состоит из активного элемента 12 и зеркал оптического резонатора 11, 13. Зеркало 11 укреплено на девятислойном пьезопакете. На него подается управляющее напряжение U3 от дополнительной электронной системы ЧФАП № 2, осуществляющей частотную привязку излучений основных лазеров к стабилизированному лазеру или эталону.

Измерительный лазер состоит из активного элемента 5 и зеркал оптического резонатора 4, 6. Зеркало 4 укреплено на 9-слойном, а зеркало 6-ти на 3-слойном пьезопакетах. На них подаются управляющие напряжения U1 от быстрого и U2 от медленного колец регулирования основной электронной системы ЧФАП № 1. Оптическая схема выделения разностного радиочастотного сигнала, используемого для работы основной электронной системы ЧФАП № 1, состоит из фотодетектора 2 с предварительным электронным усилителем и зеркал 3, 10,

укрепленных на юстировочных стойках.

Оптическая схема выделения радиочастотного сигнала используемого, для работы дополнительной электронной системы ЧФАП № 2, состоит из фотодетектора 1 с предварительным электронным усилителем и зеркала 9. Зеркало 10 предназначено для пространственного совмещения в ближней зоне, а зеркала 3, 9 в дальней зоне соответствующих излучений от лазерных источников.

Формирование излучений опорного и измерительного лазеров выполняется линзовыми коллиматорами 7, 14, установленными на юстировочных стойках. Регулировка направления распространения рабочих излучений осуществляется оптическими клиньями 8, 15.

Кроме оптико-механических узлов в блоке установлены балластные резисторы, включенные в цепь питания лазерных активных элементов и электрические разъемы для подключения устройства к электронным блокам измерительного комплекса.

2.2. Измерительный интерферометр

Измерительный интерферометр предназначен для преобразования изменения фаз оптических сигналов в соответствующие им

электрические, пропорциональные изменению длины оптического пути зондирующих лучей на измерительных трассах. На рис. 4 приведена его принципиальная оптическая схема.

Интерферометр состоит из трех независимых оптических каналов – одного опорного и двух измерительных. Они выполнены по схеме

несимметричного интерферометра Майкельсона, где в качестве опорного луча используется (гетеродинное) излучение опорного лазера, смещенное по частоте на 1 МГц относительно (зондирующего) излучения измерительного лазера, посылаемого на исследуемый объект.

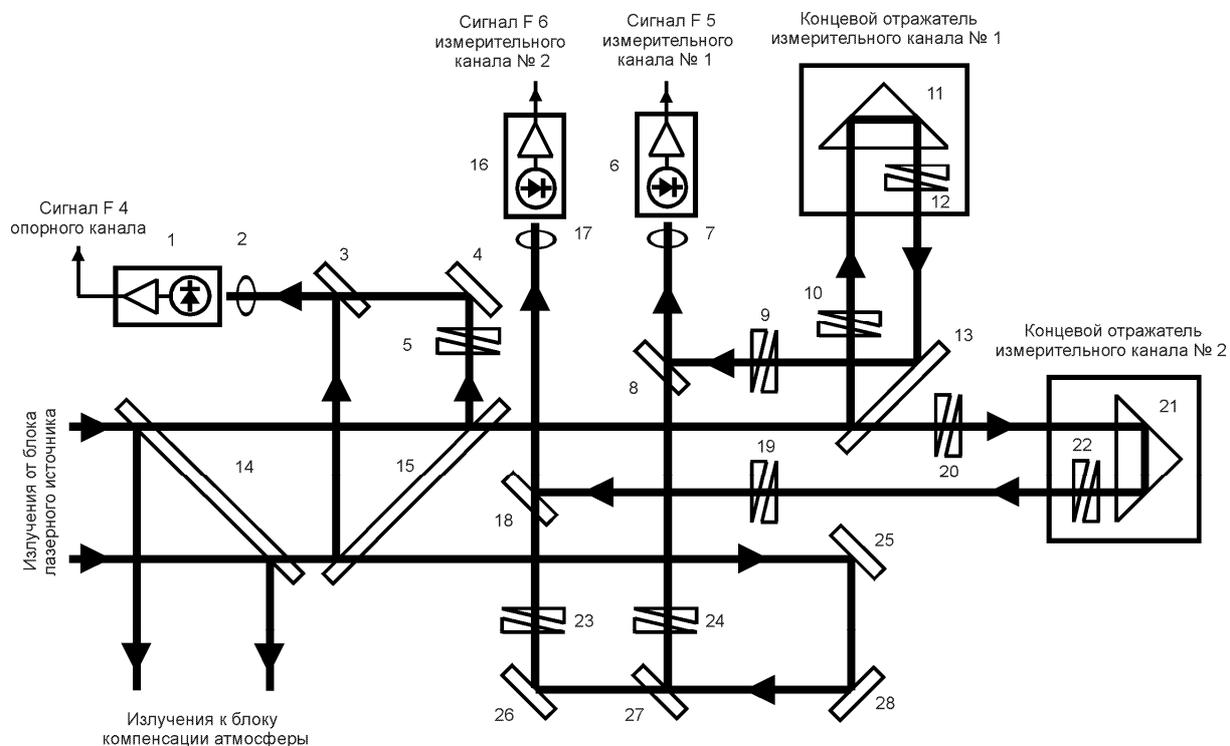


Рис. 4. Принципиальная оптическая схема измерительного интерферометра

Излучения от лазерных источников поступают на светоделительные зеркала 15, 13, 27, с помощью которых распределяются по оптическим каналам. Зеркало 14 используется для направления лазерных излучений в блок компенсации атмосферы. Зеркалом 13 и клиновым юстировочным узлом 10 осуществляется настройка зондирующего излучения на концевой отражатель 11 первого измерительного канала. Юстировочным узлом 20 осуществляется настройка излучения на концевой отражатель 21 второго измерительного канала. Зеркало 26 и клиновые юстировочные узлы 9, 19, 23, 24 предназначены для пространственного совмещения в ближней зоне отраженных от концевых отражателей 11 и 21 зондирующих излучений с гетеродинным излучением, а зеркала 8, 18 – в дальней зоне. Совмещение излучений в опорном канале осуществляется: в ближней зоне - юстировочным узлом 5, а в дальней зоне - зеркалом 3. Фокусировка совмещенных излучений на фотодетекторы выполняется линзами 2, 6, 14. На фотодетекторах 1, 5, 13, происходит гетеродинирование излучений и

выделение информационных сигналов на разностной частоте в районе 1 МГц.

Опорный оптический канал предназначен для получения электрического сигнала на рабочей частоте 1 МГц, относительно которого выполняется измерение фазы информационных электрических сигналов, поступающих от фотодетекторов измерительных каналов. Он состоит из светоделительных зеркал 3, 4, 15, клинового юстировочного узла 5 и фотодетектора 1 с предварительным высокочастотным усилителем.

Первый измерительный канал образован светоделительными зеркалами 8, 13, 27; юстировочными узлами 9, 10, 24; концевым отражателем 11 и фотодетектором 6 с предварительным усилителем. Второй измерительный канал образован: светоделительными зеркалами 18, 26; юстировочными узлами 19, 20, 24; концевым отражателем 21 и фотодетектором 16 с предварительным усилителем.

В конструкции блока применена пассивная компенсация температурного дрейфа, позволившая уменьшить инструментальную

погрешность измерительной схемы при изменении внешней температуры до уровня $< 0,01$ мкм/град. Для этого гетеродинное излучение направляется на зеркала 25 и 28. При этом излучение проходит участки оптического пути между зеркалами 15 – 25, 25 - 28, 28 – 27. В такой схеме величина тепловых деформаций участков металлической плиты основания, на которой установлены оптические элементы 15, 25, 28 (и, соответственно, изменение длины оптического пути), оказываются равными по величине деформациям участков основания между оптическими элементами 8, 13, 18 и зоной присоединения плиты к несущим стойкам, с помощью которых измерительный блок крепится к постаменту.

Концевые отражатели, входящие в состав оптической схемы, обеспечивают устойчивую работу измерительного блока при значительных угловых и линейных перемещениях измеряемого объекта (постамент), на котором они укреплены. В отражателях используются трипель-призмы (угловые отражатели) с дополнительными клиновыми юстировочными узлами 12 и 22, применение которых позволило значительно снизить требование на точность изготовления призм и уменьшить за счет этого стоимость их изготовления.

В блоке предусмотрено использование волоконно-оптических световодов для подвода рабочих излучений к измерительной схеме. Применение волоконной оптики упрощает эксплуатацию измерительного комплекса, исключая необходимость подстройки оптической схемы при замене лазерных активных элементов и жесткого крепления лазерного излучателя на постаменте.

2.3. Блок компенсации атмосферы

Оптико-механический блок компенсации влияния атмосферы предназначен для измерения относительной величины флуктуаций показателя преломления воздуха на измерительной трассе, в ходе деформографических измерений.

В предлагаемом измерительном комплексе лазерного деформографа первичный преобразователь в блоке компенсации, выполнен в виде термокомпенсированного эталона длины, что позволяет проводить измерения без использования в схеме деформографа стабилизированных по частоте лазерных источников. Выбранная конструкция позволяет, наряду с исключением влияния атмосферы, компенсировать погрешность измерений, обусловленную изменением рабочей

длины волны зондирующего лазерного излучения. Первичный преобразователь выполнен в виде автономного блока и может быть установлен на расстоянии до 10 метров от интерферометра.

Работа схемы компенсации основана на регистрации изменения длины оптического пути, равного расстоянию между зеркалами, укрепленными на эталоне длины. При этом геометрическое расстояние между зеркалами изменяется только на величину тепловой деформации материала, из которого изготовлен эталон, и не подвержено влиянию деформаций исследуемого объекта.

При такой конструкции компенсационной схемы, эталон длины является образцовой мерой, относительно которой выполняется измерение величины малых перемещений исследуемого объекта, и его параметрами определяются метрологические характеристики измерительной оптической схемы.

Следует отметить, что используемый для изготовления эталона сплав 36 Н обладает свойством, наряду с обратимой температурной деформацией, медленно изменять размеры изготовленных из него деталей в сторону увеличения.

Из литературных источников известно, что в начальный период эксплуатации используемых в машиностроении рабочих эталонов, изготовленных из сплава 36 Н, увеличение их длины составляет величину $\sim 0,7$ мкм на 1 метр за год. После стабилизации размеров в течение 20 лет увеличение длины составляет $\sim 0,3$ мкм на 1 метр за год [17]. Это изменение длины следует учитывать при проведении особо точных метрологических измерений.

В составе лазерного измерительного комплекса может быть использован другой вариант исполнения первичного преобразователя, выполняемого в виде вакуумной оптической кюветы. Такая конструкция свободна от указанного выше недостатка, но она позволит исключить только влияние изменений параметров атмосферы и может быть использована при условии стабильности рабочей длины волны лазерного источника. В этом случае образцовой мерой в деформографических измерениях является длина волны лазерного излучения.

На рис. 5 приложения приведена принципиальная оптическая схема блока компенсации, изготовленного по первому варианту. Блок состоит из двух основных частей - интерферометра и термокомпенсированного эталона длины.

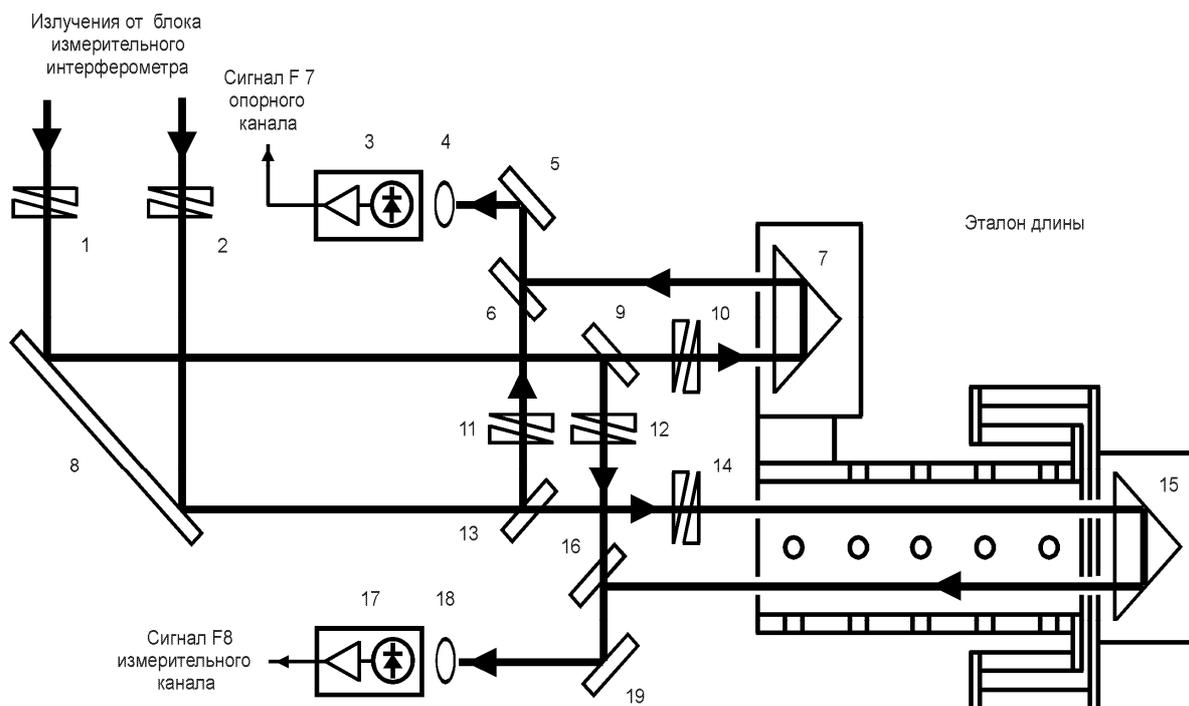


Рис. 5. Принципиальная оптическая схема компенсатора атмосферных изменений

Интерферометр служит для преобразования оптического сигнала в электрический, пропорциональный величине изменения показателя преломления воздуха и изменению длины волны лазерного излучения. Его величина вводится автоматически в виде поправки к результату деформографических измерений.

Интерферометр состоит из двух измерительных каналов, выполненных по схеме несимметричного интерферометра Майкельсона с переносом фазовой информации из оптического диапазона в радиочастотный методом оптического гетеродинирования.

Часть мощности оптических излучений от лазерного источника через блок измерительного интерферометра поступает на клиновые юстировочные узлы 1, 2 и зеркало 8. Зеркала 9, 13 распределяют излучения на два измерительных канала. Юстировочные узлы 10 и 14 направляют излучения соответственно на отражатели 7 и 15, укрепленные на эталоне длины. Пространственное совмещение излучений в ближней зоне выполняется юстировочными узлами 11 и 12, а в дальней зоне зеркалами 6 и 16. Дополнительные зеркала 5 и 19 направляют излучения на фотоприёмники. Фокусировка совмещенных излучений на фотоприёмники выполняется линзами 4 и 18. На фотоприёмниках 3 и 17 происходит гетеродинирование излучений и выделение информационных сигналов на разностной частоте ~ 1 МГц.

Первый измерительный канал образован: зеркалами 5, 6, 13; юстировочными узлами 10, 11; концевым отражателем 7; фокусирующей линзой 4 и фотоприёмником 3 с электронной схемой предварительного усилителя. Радиочастотный сигнал от фотоприёмника 3 является опорным, относительно которого происходит измерение величины фазового сдвига информационного сигнала от фотоприёмника 17 второго канала. Второй измерительный канал образован: зеркалами 9, 16, 19; юстировочными узлами 12, 14; концевым отражателем 15; фокусирующей линзой 18 и фотоприёмником 17 с предварительным усилителем. Эталон длиной 2 метра изготовлен из сплава 36 Н, имеющего после проведения термической обработки по специальному режиму, температурный коэффициент линейного расширения $8 \cdot 10^{-7}$ 1/град., и снабжен дополнительным механическим узлом пассивной термокомпенсации, изготовленным из алюминиевого сплава. Такая конструкция обеспечивает неизменность расстояния между отражателями с погрешностью на уровне $1 \cdot 10^{-9}$ ($\Delta L/L$) при изменении температуры воздуха в диапазоне ± 10 град. (расчетная величина, определяемая настройкой компенсационного узла эталона в процессе изготовления). Оптические элементы, используемые в измерительной схеме, изготовлены из стекла К8. Светоделительные и просветляющие покрытия изготовлены из двуокиси гафния и

двуокиси кремния методом электронного испарения в вакууме. Оптико-механические блоки лазерного деформографа размещаются на бетонных постаментах, жестко связанных со скальным грунтом. Блоки крепятся болтовым

соединением к закладываемым в постаменты металлическим рамам или плитам.

На *рис. 6* показан внешний вид оптического блока, установленного в штольне.



Рис. 6. Двухканальный лазерный измеритель деформаций на сейсмостанции «Талгар» (Алма-Ата)

3. ЭЛЕКТРОННЫЕ БЛОКИ КОМПЛЕКСА

В данной статье приводится функциональное назначение и краткое описание работы основных электронных блоков, входящих в состав лазерного измерительного комплекса. Их описание имеется в соответствующих публикациях [18–20]. Внешний вид электронных блоков показан на *рис. 7*.

3.1. Высоковольтный источник питания лазеров

Источник питания предназначен для получения стабилизированного высоковольтного напряжения постоянного тока, необходимого для работы активных элементов лазерных источников. Блок состоит из двух (трех) независимых каналов, преобразующих входное напряжение постоянного тока 24 В в высоковольтное напряжение 4 КВ.

3.2. Блок управляющей электроники

Электронные устройства, смонтированные в блоке, обеспечивают первичную обработку сигналов, поступающих от оптической измерительной схемы и управление режимом

работы лазерных излучателей. Блок рассчитан на работу с пятиканальной оптической измерительной схемой лазерного деформографа.

В состав блока входят следующие электронные устройства:

- измерительные фазовые детекторы;
- схема частотно-фазовой автоподстройки лазеров;
- усилители высокой частоты;
- стабилизированный источник вторичных напряжений питания.

В блоке предусмотрена установка электронной схемы АПЧ для стабилизации частоты излучения дополнительного лазера.



Рис. 7. Внешний вид электронных блоков

3.3. Измеритель фазового сдвига

Измеритель фазового сдвига предназначен для первичного преобразования двух входных электрических сигналов на частоте ~ 1 МГц, поступающих от информационных каналов измерительной оптической схемы, в цифровой сигнал, пропорциональный величине фазового сдвига между этими сигналами.

3.4. Цифровая система ЧФАП

Электронная система ЧФАП лазеров используется в измерительном комплексе для получения гетеродинного оптического излучения. Работа ЧФАП основана на обработке радиочастотного сигнала (~ 1 МГц), полученного в результате оптического смещения излучений двух лазеров и стабилизации его значения, относительно частоты опорного радиогенератора, за счёт перестройки длины резонатора одного из лазеров.

Входящие в конструкцию блока ЧФАП электронные схемы частотного и фазового детекторов обеспечивают обработку низкочастотных и высокочастотных механических возмущений, воздействующих на лазерные излучатели.

При использовании в измерительной схеме вспомогательного стабилизированного по частоте лазерного источника, дополнительный блок ЧФАП обеспечивает привязку частоты излучения рабочих лазеров к частоте излучения стабилизированного лазера. За счёт этого осуществляется стабилизация рабочей длины волны их излучений.

3.5. Стабилизированный источник вторичных напряжений

Источник предназначен для получения напряжений постоянного тока для питания всех электронных устройств, входящих в состав лазерного измерительного комплекса. Электронные схемы источника преобразуют входное напряжение постоянного тока 24 В, в напряжения: $+5$ В, ± 12 В, ± 180 В.

С целью увеличения КПД в источнике использован импульсный принцип преобразования входного напряжения. Для уменьшения электрических импульсных помех электронная схема источника смонтирована в отдельном экранированном конструктиве внутри блока.

3.6. Усилитель высокой частоты

Усилители высокой частоты предназначены для усиления сигналов от фотодетекторов лазерного излучателя, измерительного

интерферометра и блока компенсации атмосферы. Для снижения уровня электрических помех электронные схемы усилителей смонтированы в отдельном экранированном конструктиве, размещённом в блоке.

3.7. Передающий интерфейс линии связи

Передающий интерфейс служит для передачи данных в цифровой форме от первичных преобразователей в регистрирующую ЭВМ по двухпроводной линии связи.

3.8. Приёмный интерфейс

Данные измерений, передаваемые по двухпроводной линии связи, вводятся в регистрирующую ЭВМ с помощью приемного интерфейса. Устройство выполнено в виде отдельной платы и устанавливается в регистрирующую ЭВМ.

3.9. Блок источника питания

Источник преобразует напряжение переменного тока 220 В в напряжение постоянного тока 24 В и позволяет реализовать резервируемую аккумуляторами низковольтную сеть бесперебойного электропитания для лазерного измерительного комплекса. В источнике использован импульсный способ преобразования напряжения.

4. ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ИВМ РС/АТ

Автоматизированная цифровая система сбора данных предназначена для первичной обработки и сохранения информации, поступающей от измерительных устройств. В процессе регистрации обеспечивается отображение регистрируемых процессов в графическом виде на экране монитора в реальном масштабе времени. Основные параметры комплекса приведены в *Таблицах 1 и 2*.

4.1. Дополнительная измерительная аппаратура

Для внесения поправок в результаты деформографических измерений в состав измерительного комплекса входит аппаратура для измерения температуры воздуха на дневной поверхности и грунта в штольне. Давление воздуха контролируется с помощью микробарографа. Для синхронной отметки сейсмических событий в составе деформографа имеется сейсмический датчик типа СМЗ.

4.2. Линии электропитания и передачи данных

Электропитание аппаратуры входящей в состав лазерного измерительного комплекса расположенной в штольне осуществляется напряжением постоянного тока 24 В по линии №1. Линия выполняется четырёхжильным кабелем. При этом две жилы в кабеле используются для подачи сигнала обратной связи на источник питания. Для подключения

контрольно-измерительных приборов используемых при настройке оптической измерительной схемы, в штольне проводится напряжение переменного тока 220 В.

Для этого прокладывается отдельная линия резервного электроснабжения № 2. Линия рассчитана на общую потребляемую мощность до 1кВт. Передача данных в цифровой форме от блока управляющей электроники к контроллеру встроенному в регистрирующую ЭВМ выполняется по линии передачи данных № 3.

Таблица 1. Технические параметры лазерного измерительного комплекса

| | |
|--|---------------------------|
| Рабочая длина волны | 0,6328 мкм. |
| Мощность и режим генерации лазерных излучателей: | |
| • измерительного (ТЕМ 00 одночастотный) | 1 мВт; |
| • гетеродинного (ТЕМ 00 одночастотный) | 1 мВт; |
| Расходимость излучения пучков | $3 \cdot 10^{-3}$ рад. |
| Количество измерительных оптических каналов | 2 (до 3). |
| База измерений (в открытой атмосфере горных выработок) | 0 - 200 м |
| Относительная погрешность измерений (определяемая конструкцией блока компенсации атмосферы и условиями проведения измерений) | $\sim 2 \cdot 10^{-9}$ |
| Максимальная чувствительность к перемещениям (определяется электронной схемой измерительного фазового детектора, дискретность отсчёта) | $\lambda/4096$ мкм |
| Максимальная мгновенная скорость перемещения измеряемого объекта (определяется электронной схемой измерительного фазового детектора) | 0,3 мм/сек |
| Частотный диапазон регистрации деформационных колебаний (определяется электронной схемой измерительного фазового детектора) | 100 Гц |
| Собственная инструментальная погрешность измерительного интерферометра не более | 0,05 мкм/град. |
| Динамический диапазон регистрации перемещений | в пределах базы измерения |
| Параметры внутреннего аналого-цифрового преобразователя для подключения дополнительных измерительных датчиков: | |
| • количество двоичных разрядов | 12 |
| • количество входных аналоговых каналов | 8 |
| • входное напряжение | ± 5 В |
| • входное сопротивление | 100 кОм |
| • максимальная частота опроса | 1,5 кГц |
| Регистрация данных деформографических измерений | на магнитные носители |

Таблица 2. Условия эксплуатации

| | |
|---|---------------------|
| Температурный диапазон | -20+ 30град |
| Давление | - 400÷800 мм рт.ст. |
| Влажность воздуха | 100 % |
| Режим эксплуатации измерительного комплекса | непрерывный. |
| Исполнение оптико-механических и электронных блоков | герметичное |

Данные от измерителей температуры грунта в штольне и контрольного сейсмоприемника поступают на периферийный блок АЦП. Преобразованные в цифровую форму сигналы передаются от периферийного блока на контроллер встроенный в регистрирующую ЭВМ по линии передачи данных № 4. Контроль за амплитудой высокочастотных сигналов от фотоприёмников оптической измерительной

схемы осуществляется из операторской. Для этого высокочастотные сигналы F4, F5, F6, от фотоприёмников измерительных каналов деформографа, F7 и F8 схемы компенсации и сигнала F1 от фотоприёмника привязки лазеров подаются по 6 отдельным коаксиальным кабелям линии передачи аналоговых сигналов №5. В операторской сигналы подаются на блок коммутации, а затем на контрольный осциллограф.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (базовое финансирование).

ЛИТЕРАТУРА

[1] С.Н. Багаев, А.С. Дмитриев, А.Э. Ом, В.А. Орлов, Ю.Н. Фомин, В.П. Чеботаев. Двухчастотная интерферометрическая система для измерения линейных перемещений. Патент РФ N 1362923, МКИ 4 С01 В 21/00, приоритет от 13.08.85 г.

[2] С.Н. Багаев, В.А. Орлов, А.Ю. Рыбушкин, В.М. Семибаламут, Ю.Н. Фомин. Двухчастотная лазерная интерферометрическая система для измерения линейных перемещений. Патент РФ 2082085, 6 G 01 В 21/00, приоритет от 22. 04. 1994 г.

[3] С.Н. Багаев, В.А. Орлов, А.Ю. Рыбушкин, В.М. Семибаламут, Ю.Н. Фомин. Двухчастотная интерферометрическая система для измерения линейных перемещений. Патент РФ 2085841, 6 G 01 21/00, приоритет от 11. 10. 1994 г.

[4] С.Н. Багаев, А.С. Дычков, В.А. Орлов, В.П. Чеботаев, Ю.Н. Фомин. Исследования сдвига частоты и изменение спектра лазерного излучения при прохождении через атмосферу на больших расстояниях. Тезисы докладов 10 всесоюзной конференции по когерентной и нелинейной оптике. Ереван 1982, часть 1, с. 287.

[5] Л.А. Латыгина и др. Методические рекомендации по исследованию деформационных предвестников землетрясений. АН СССР, Институт физики земли, М., 1988 г, с. 3–11.

[6] С.Н. Багаев, В.А. Орлов, Ю.Н. Фомин. Изучение спектров деформационных колебаний в штольне с помощью лазерного гетеродинного измерителя перемещений. Развитие сейсмологических и геофизических исследований в Сибири и на Дальнем Востоке. Иркутск, 1988, с. 74.

[7] С.Н. Багаев, Ю.М. Кишин, А.Э. Ом, В.А. Орлов, С.Ф. Панин, О.А. Плотникова, Ю.Н. Фомин. Наблюдения аномалий деформаций земной коры накануне Спитакского землетрясения с помощью высокочувствительной гетеродинной лазерной аппаратуры. Сборник: Деформационные процессы в период предшествующий спитакскому землетрясению. Москва, 1989, с. 92-98.

[8] С.Н. Багаев, О.Л. Вахрушев, Ю.М. Кишин, С.Ю. Кузнецов, О.В. Никепелов, В.А. Орлов, С.Ф. Панин, О.А. Плотникова, Ю.Н. Фомин. Наблюдение особенностей деформаций земной коры накануне землетрясений с помощью лазерного деформографа. В кн. Исследования по созданию научных основ прогноза землетрясений в Сибири. Иркутск, 1989, с. 70-71.

[9] С.Н. Багаев, В.А. Орлов, Ю.Н. Фомин, В.П. Чеботаев. Гетеродинные лазерные деформографы для прецизионных геофизических измерений. Известия академии наук. Физика земли N1, 1992, с. 85-91.

[10] С.Н. Багаев, В.А. Орлов, Ю.Н. Фомин. Лазерный гетеродинный измеритель малых смещений в геофизических измерениях. Лазеры и современное приборостроение (Материалы школы-семинара-выставки) Санкт-Петербург, 30 сентября – 10 октября 1991г, с. 103-104.

[11] С.Н. Багаев, Ю.М. Кишин, С.Ю. Кузнецов, И.В. Мещеряков, В.А. Орлов, А.Ю. Рыбушкин, В.М.

Семибаламут, Ю.Н. Фомин. Исследование динамических характеристик деформаций земной коры в БРЗ с помощью высокочувствительной лазерной аппаратуры. В сб. научных трудов: Развитие методов и средств в экспериментальной геофизике. 1993, вып. 1 с. 38-51.

[12] С.Н. Багаев, В.А. Орлов, А.Ю. Рыбушкин, В.М. Семибаламут, Ю.Н. Фомин. Гетеродинный лазерный интерферометр для дистанционных измерений малых перемещений. Тез. докл. Международной конференции: Оптика лазеров. С-Петербург, июнь 1993, часть 2, с. 555.

[13] С.Н. Багаев, С.Ю. Кузнецов, В.А. Орлов, С.В. Панов, А.Ю. Рыбушкин, В.М. Семибаламут, Ю.Н. Фомин. Гелий-неоновые лазерные системы для измерения линейных перемещений и малых скоростей. Труды международного семинара: Лазерные измерения и диагностика. Раубачи, февраль 1994г.

[14] Semibalamut V.M., Fomin Yu. N., Timofeev V.Yu., Rybushkin A. Yu., Gribanova E.I., Kuznetsov S.Yu., Popov M.E., Sarycheva Y.K. Tidal parameters from results of laser deformographic measurements in the south-west part of the Baikal rift. Marees terrestres bulletin d'informations, Bruxelles, 10 octobre 1995, N123.

[15] V.Yu. Timofeev, L.V. Anisimova, V.M. Semibalamut, A.Yu. Rybushkin, Yu.N. Fomin. Long-term crystal movements at south-west of the Baikal rift by tilt, strain and absolute laser gravity measurements. 29-th general assembly of IASPEI, Греция, Солоники, 18-28 августа 1997 г.

[16] В.А. Орлов. Лазерные системы и методы измерения малых перемещений и скоростей и их применение в физических экспериментах. Учебное пособие. НГУ. Новосибирск. 2008. Ч. 1. 108 с.

[17] Материалы в машиностроении. Справочник. Том 3. Специальные стали и сплавы. М., Машиностроение, 1968 г, стр. 297.

[18] 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.

[19] 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.

[20] 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.

Юрий Николаевич Фомин – научный сотрудник Института Лазерной физики СО РАН, заведующий лабораторией Сибирской опытно-методологической лазерной экспедиции СО РАН.



Владимир Михайлович Семибаламут – заместитель директора Института лазерной физики СО РАН, начальник Сибирской опытно-методологической лазерной партии, доцент НГТУ кандидат физико-математических наук, руководитель разработки.

E-mail: wladim28@yandex.ru



Денис Терешкин, аспирант кафедры Автоматики НГТУ, автор 15 научных статей. Область научных интересов и компетенций – теория автоматического управления, лазерная физика, программные системы.

E-mail: todin.dirihle@gmail.com



Вадим Жмудь – заведующий кафедрой Автоматики в НГТУ, профессор, доктор технических наук, автор 200 научных статей. Область научных интересов и компетенций – теория автоматического управления, электроника, лазерные системы, оптимизация, измерительная техника.

E-mail: oao_nips@bk.ru



Валерий Александрович Орлов – заведующий лабораторией в Институте лазерной физики СО РАН, профессор кафедры Лазерных систем в НГТУ, доктор физико-математических наук, руководитель научного коллектива, разработавшего ряд измерительных комплексов, внедренных и используемых в настоящее время.

Complex for Measuring of Hyper Small Tidal Deformations of Rocks on the Base of He-Ne Laser

VLADIMIR SEMIBALAMUT,
DENIS TERESHKIN, VADIM ZHMUD,
VALERY ORLOV

Abstract: The paper describes complex, which allows measuring of the difference of the transverse and longitudinal deformations of the rocks under the force of tidal lunisonar cyclical changings of gravity forces.

Key words: precursors of earthquakes, laser metrology, measuring of hyper small movements and vibrations