

5. Жилкин В. А., Бондаренко А. П. Определение перемещений недеформируемых жестких тел методом спекл-интерферометрии.— Изв. вузов. Строительство и архитектура, 1977, № 6, с. 143—148.

Поступила в редакцию 6 декабря 1984 г.

УДК 531.715.1 : 621.375.826

В. С. МЕДВЕДЕВ, В. В. НЕСТЕРОВ, В. А. ПЕРВОМАЙСКИЙ
(Симферополь)

ИЗМЕРЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ ЛАЗЕРНЫМ ИНТЕРФЕРОМЕТРОМ-ДЕФОРМОГРАФОМ С ВОЛОКОННОЙ ОПТИКОЙ

Лазерный интерферометр в настоящее время — один из наиболее точных приборов для измерения перемещений [1, 2]. Одно из применений большебазовых лазерных интерферометров — их использование в качестве деформографов в геофизических исследованиях [3, 4]. Основным фактором, ограничивающим точность и достоверность таких измерений, является нестабильность метеорологических условий в измерительном объеме: температуры, давления, влажности. Кроме того, тепло, выделяемое лазером, вызывает нестационарные тепловые потоки, приводящие особенно при долговременных измерениях к трудно учитываемым погрешностям.

В настоящей работе рассмотрен лазерный интерферометр-деформограф с волоконной оптикой, вносящий малые изменения метеорологических условий в измерительном объеме, и система слежения за интерференционной полосой. Приводятся результаты измерений стабильности температуры и давления в пещере. Показано, что пещера с определенной морфологией обладает высокой стабильностью метеорологических условий и может быть успешно использована для проведения прецизионных геофизических измерений средствами лазерной интерферометрии. В работе даны некоторые результаты измерений колебаний земной коры лазерным интерферометром, установленным в пещере.

Измерения проводились в одной из карстовых полостей Крыма — пещере Эмине-Баир-Хасар. Пещера имеет узкий вход, за которым находятся залы большого объема. Общий объем пещеры 100 000 м³. Выбор пещеры с такой морфологией позволил обеспечить не только высокую стабильность температуры, но также слабую чувствительность к изменениям внешнего атмосферного давления. Следуя [5], влажность в карстовой пещере обладает высокой стабильностью и составляет величину порядка 100%.

Для измерения малых изменений температуры в пещере разработан электротермометр с датчиком, выполненным по мостовой схеме. В качестве чувствительного элемента использовано термосопротивление КМТ-17В. Чувствительность такого электротермометра 0,001°С. Изменение температуры в пещере записывалось на самописец. На поверхности температура измерялась 1 раз в час промышленным электротермометром ЭТП-М. На рис. 1 представлены результаты измерений изменения температуры на поверхности (а) и вблизи интерферометра в пещере (б) за 10 ч. Как следует из рисунка, изменения температуры в пещере за 10 ч не превышают 0,02°С.

Колебания давления в пещере вблизи интерферометра и на поверхности измерялись барографами. На рис. 2 представлены графики зависимости изменения давления на поверхности (а) и в пещере (б) в течение одной недели. Как следует из рисунка, пульсации давления в пещере

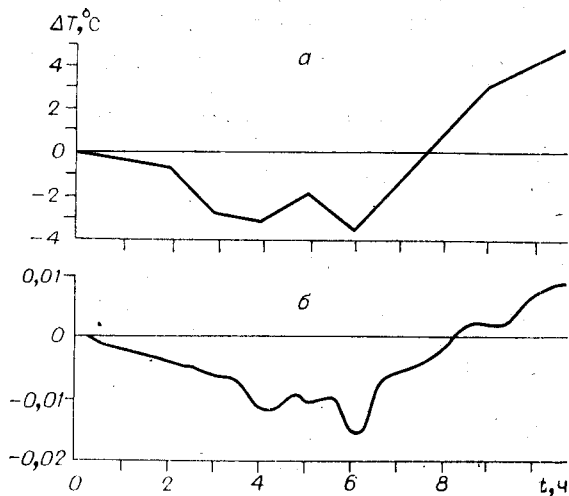


Рис. 1.

линзы 3 вводится в многомодовый световод 4 с диаметром световедущей жилы 60 мкм и числовой апертурой $NA \sim 0,2$. Спекл-структура на выходе световода коллимируется телескопической системой 5 и направляется на светоделительный кубик 6, на котором делится на два пучка, один из которых затем отражается от зеркала 7, а другой — от зеркала 8, приклеенного к пьезокерамике 9. Две одинаковые спекл-структуры интерферируют на светоделительном кубике, и получающаяся картина линзой 10 фокусируется в плоскости фотодиода 11.

Все элементы оптической схемы интерферометра установлены на отдельных специально сконструированных столиках, которые можно закреплять как на горизонтальной, так и на вертикальной плоскости. Для уменьшения влияния температурного расширения столиков на результаты измерений все оптические элементы установлены по центру столиков.

существенно сглажены по сравнению с изменениями внешнего давления.

Равноплечий лазерный интерферометр с базой 5 м был установлен в пещере на расстоянии 300 м от входа. В качестве источника излучения использовался лазер ЛГ-79/1, излучение которого по многомодовому световоду длиной 300 м поступало на вход интерферометра. На рис. 3 приведена принципиальная схема интерферометра с системой слежения за интерференционной полосой. Излучение лазера 1 с помощью телескопической системы 2 и короткофокусной

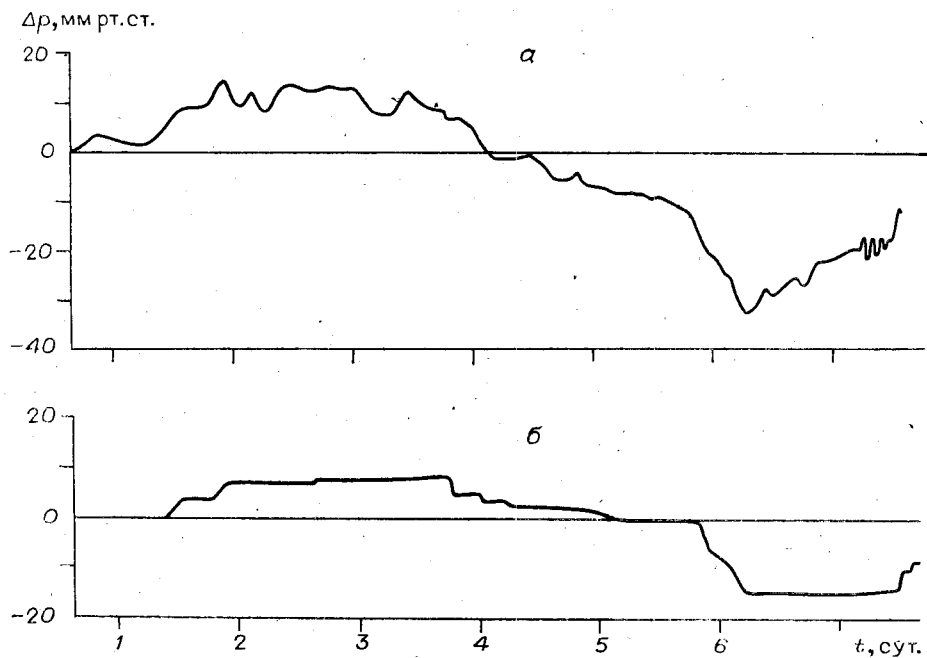


Рис. 2.

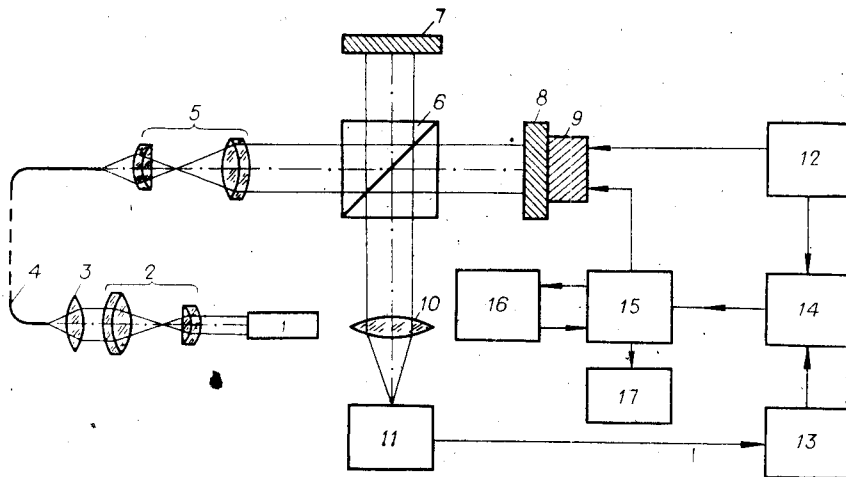


Рис. 3.

В измерительном объеме располагались оптическая часть интерферометра и резонансный предусилитель 11. Систему слежения за интерференционной полосой и лазер помещали в пещере на расстоянии 300 м от измерительного объема.

Система слежения за интерференционной полосой построена по принципу экстремального регулирования со вспомогательной модуляцией. Гармонический сигнал от опорного генератора 12 с частотой 3,5 кГц подается по кабелю длиной 300 м на пьезокерамику 9, которая модулирует разность хода в плечах интерферометра. Резонансный усилитель 11 с центром полосы пропускания на частоте 3,5 кГц и полосой пропускания ~ 500 Гц выделяет первую гармонику интерференционного сигнала. Количество тепла, рассеиваемое фотоприемником с предусилителем, установленным в измерительном объеме, не превышает 1 мВт. Сигнал с предусилителя 11 по кабелю длиной 300 м поступает на вход усилителя переменного тока 13. С опорного генератора 12 и выхода усилителя 13 сигналы подаются последовательно на сумматор-выпрямитель 14, усилитель постоянного тока 15, пьезокерамику и систему сброса 16. Система слежения поддерживает постоянную разность хода в плечах интерферометра в пределах одной интерференционной полосы; при перемещении, большем одной полосы, происходит удержание следующей интерференционной полосы. Система имеет три выхода с временными усреднениями 0,1; 2; 120 с. Сигнал с выхода усилителя постоянного тока 15 записывается на самописец 17. Величина измеряемого перемещения пропорциональна напряжению на выходе усилителя 15. Перемещению $\lambda/2$ соответствует изменение напряжения на 10 В. Чувствительность интерферометра не хуже 5×10^{-5} мкм/Гц^{1/2} в полосе частот 0,01—10 Гц.

На рис. 4 представлен фрагмент записи колебаний земной коры, измеренных в пещере при времени усреднения 2 с, за время порядка 5 ч. Запись проводилась с 1 до 6 ч утра, изменение температуры на поверхности показано на рис. 1, а. Медленное изменение среднего уровня колебаний на рис. 4 можно объяснить изменением температуры на поверхности (см. рис. 1, а), которое вызывает деформацию, проникающую на глубину нескольких километров.

Чувствительность лазерного интерферометра с многомодовым световодом ограничивается спекл-шумами. Спекл-структура на выходе многомодового световода — результат интерференции мод, выходящих из световода. Причиной возникновения спекл-шумов является изменение фазовых соотношений между распространяющимися модами при перемещениях световода, что приводит к хаотическим изменениям спекл-структуры. При условии, что амплитуды и фазы пятен спекл-структуры статистически независимы, из [6] следует, что отношение сигнал/шум для

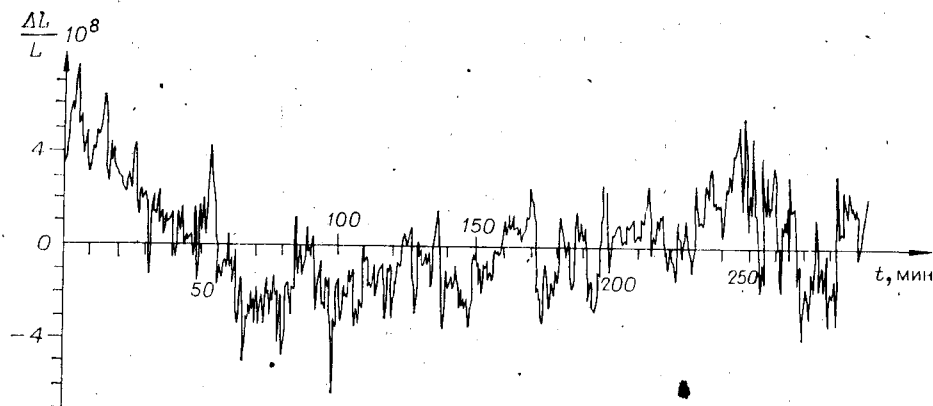


Рис. 4.

интерферометра с многомодовым световодом ступенчатого профиля показателя преломления равно

$$v_c/v_m = \pi d \alpha / \sqrt{2} 2\lambda, \quad (1)$$

где d — диаметр световедущей жилы световода; α — апертура оптической системы, формирующей спекл-структуру.

Соотношение (1) справедливо при условии, что разброс времен пробега различных мод по световоду значительно меньше длины когерентности используемого лазера. Это условие имеет вид

$$L_c (NA)^2 \Delta v / c n_c \ll 1. \quad (2)$$

Здесь L_c — длина световода; c — скорость света в вакууме; NA — числовая апертура световода; Δv — ширина спектра излучения лазера; n_c — показатель преломления сердцевины световода. Если условие (2) не выполняется, то соотношение сигнал/шум становится выше по сравнению с вычисленным по формуле (1).

В эксперименте использовался световод с диаметром световедущей жилы $d \sim 60$ мкм. Полагая, что апертура телескопической системы $\alpha \sim 0,2$ и на фотоприемнике получаются кольца бесконечной ширины, из (1) найдем $v_c/v_m \sim 25$. Для рассматриваемого интерферометра соотношение сигнал/шум значительно выше, так как не выполняется соотношение (2) и интерференционный сигнал проходит через узкополосный усилитель 11. Отношение сигнал/шум на выходе узкополосного усилителя 11, полученное экспериментально, ~ 800 .

Рассмотрим, как реагирует интерферометр Майкельсона на продольную длиннопериодную волну, распространяющуюся по поверхности, при условии, что длина волны Λ сравнима с диаметром Земли. Такие волны возникают в результате приливных деформаций и собственных колебаний Земли. Продольную волну, распространяющуюся по поверхности земли, запишем в виде

$$a(t) = a \cos(\bar{K}\bar{r} - \Omega t); \quad (3)$$

$$\bar{K} = 2\pi/\Lambda, \quad (4)$$

где a — амплитуда волновых колебаний; \bar{r} — радиус-вектор; Ω — частота колебаний.

Рассмотрим интерферометр Майкельсона, плечи которого имеют длины b и c и расположены под углом 90° . При падении продольной волны под углом φ к плечу интерферометра длиной b амплитуда колебаний ε , регистрируемая интерферометром, имеет вид

$$\varepsilon = (2\pi a/\Lambda) |(b + \mu c) \cos^2 \varphi - (c + \mu b) \sin^2 \varphi|, \quad (5)$$

где μ — коэффициент Пуассона породы, на которой установлен интерферометр. Из (5) следует, что для продольной волны, распространя-

ющейся вдоль одного из плеч равноплечего интерферометра, чувствительность в $(1 + \mu)$ раз больше, чем в случае разноплечего интерферометра. На рис. 5 приведены диаграммы отклика разноплечего (при $c = 0$) (а) и равноплечего (б) интерферометров на продольную волну, приходящую под разными углами, для $\mu \sim 0,3$.

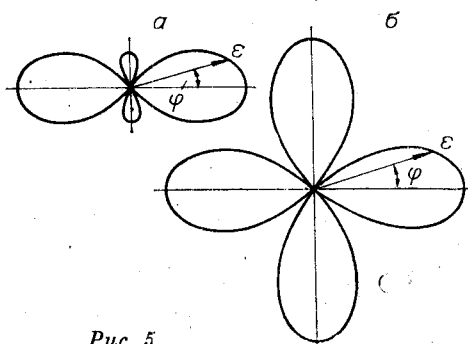


Рис. 5.

Полученные результаты показывают, что рассмотренный лазерный интерферометр-деформограф с волоконной оптикой может быть

использован для измерения малых перемещений труднодоступных объектов без нарушения метеорологических условий измерения. Показано, что пещеры являются объектами с высокой стабильностью метеорологических условий и их использование для геофизических наблюдений средствами лазерной интерферометрии перспективно.

Показано, что применение многомодового световода в лазерном интерферометре не приводит к существенному ограничению его чувствительности. Получено соотношение для амплитуды колебаний, регистрируемой интерферометром Майкельсона при воздействии продольной длиннопериодной волны, распространяющейся по поверхности земли и приходящей под углом к плечам интерферометра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коронкевич В. П., Ленкова Г. А. Применение лазерных интерферометров для точных измерений.— *Автометрия*, 1972, № 6, с. 69—75.
2. Карташов А. А., Эцин И. М. Методы измерения малых изменений разности фаз в интерферометрических устройствах.— *УФН*, 1972, т. 106, № 4, с. 687—719.
3. Вэли В. Сейсмические измерения с помощью лазеров.— *УФН*, 1971, т. 103, с. 127—138.
4. Алешин В. А., Дубров М. Н. Лазерные интерферометры с разностью хода до 1 км.— *Квант. электрон.*, 1977, т. 4, № 10, с. 2260.
5. Дублянский В. Н., Ломаев А. А. Карстовые пещеры Украины.— Киев: Наукова думка, 1980.
6. Daino V., De Marchis G. and Piazzolla S. Speckle and modal noise in optical fibres. Theory and experiment.— *Optica Acta*, 1980, v. 27, N 8, p. 1151—1159.

Поступила в редакцию 20 января 1984 г.

УДК 621.375 : 535

М. И. ЗАХАРОВ, В. Д. ПРИЛЕПСКИХ

(Новосибирск)

АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОЛУЧЕВОГО АНИЗОТРОПНОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

В последние годы большое внимание уделяется многолучевым интерферометрам с анизотропными элементами [1—3]. Один из таких интерферометров, содержащий две фазовые пластинки, частично исследовался в работах [4—6]. В настоящей статье более детально рассматривается влияние параметров отдельных элементов анизотропного интерферометра (АИ) на его амплитудно-частотные характеристики (АЧХ).