

Лазерные интерферометры-деформографы: новые разработки и применение

Дубров М. Н. (mnd139@ire216.msk.su), Александров Д. В., Кравцов В.В.

**Фрязинский филиал института радиотехники и электроники
им В.А. Котельникова РАН**

Исследуются лазерные интерферометры-деформографы (ЛИД) на подземном лучеводном полигоне ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. Интерферометры протяженностью до 1,1 км в течение последних десятилетий остаются уникальными оптическими инструментами как по достигнутой точности регистрации малых деформаций земной поверхности $\Delta L/L = 10^{-12}-10^{-13}$ [1], так и по полученным физическим результатам при проведении сейсмических и геодинамических наблюдений [2-5]. Созданные инструменты превосходят другие отечественные разработки в данной области [6-8] по чувствительности, полосе регистрируемых частот, длине измерительной базы и в настоящее время не уступают лучшим зарубежным геофизическим приборам [9-11].

В последние десятилетия интенсивно разрабатываются и создаются новые уникальные лазерно-интерферометрические системы с большими базами: гравитационно-волновые детекторы LIGO (США), VIRGO (Италия-Франция), GEO (Германия), ТАМА (Япония), а также высокоточные геофизические лазерные интерферометры в рамках проектов Геоскоп (США) и др. [12, 13] Ставящиеся для этих систем задачи поднимают проблему достижения предельных точностей на более высокий, качественно новый уровень.

Исследования показывают, что решение данной проблемы не возможно без тщательного учета возникающих здесь как технологических, так и физических факторов. Среди них – точность и качество изготовления оптических элементов, а значит неизбежные искажения и обратное рассеяние света на неидеальных поверхностях и в мутных средах. Вклад в погрешность измерений за счет случайных флуктуаций интерференционной картины под влиянием эффектов даже слабой оптической обратной связи оказывается существенным. Инструментальная точность приборов по сравнению с проектируемой может снижаться на несколько порядков, если не предприняты специальные меры для контроля и обеспечения требуемой степени развязки лазера и внешней нагрузки [14]. Для решения этой проблемы нами предложен и развивается новый принцип лазерной интерферометрии, основанный на частотной модуляции (ЧМ) излучения внешними подвижными относительно лазерного резонатора отражателями и рассеивающими объектами [15]. На рис. 1 показана осциллограмма интерференционной картины в экспериментальном макете гетеродинного ЧМ лазерного интерферометра, работающего на длине волны $\lambda=633$ нм.

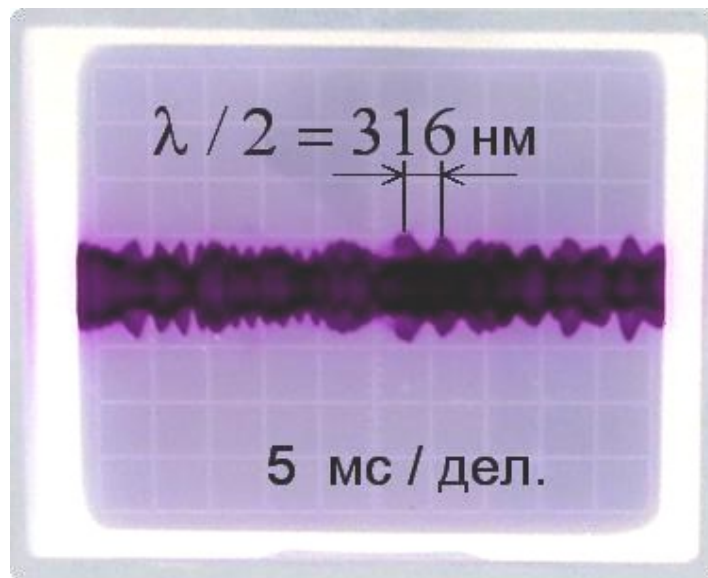


Рис.1. Сигнал на выходе частотного детектора интерферометра: разностная частота 650 МГц, полуволновая девиация частоты 200 кГц, скорость горизонтальной развертки 5 мс/дел

В устройствах, работающих на этом принципе, обратное рассеяние не является помехой, а наоборот – используется для выполнения весьма точных измерений. С применением оптических гетеродинных методов здесь возможно создание сверх - протяженных измерительных устройств таких, как, например, лазерные гравитационно-волновые обсерватории космического базирования в проекте ET-LISA (США, Западная Европа) [13]. Поставленная задача достижения точности $\Delta L = 10^{-9}$ см при длине плеча интерферометра $L = 10^6 - 10^7$ км, в том числе для равноплечих схем, может оказаться гораздо более трудоемкой, чем для схем, работающих на принципе оптической обратной связи.

Другим важным источником погрешностей интерференционных измерений на больших базах является нелинейность субволновых систем оптической регистрации. Разработаны и исследуются прецизионные лазерно-интерферометрические устройства, основанные на принципе следящих систем с оптикоэлектронной и тепловой автоподстройкой. Для работы в нанометровом диапазоне перемещений используется метод кратного деления периода интерферограммы на целое число $N = 2, 4, 16, \dots, 160$. Диапазон непрерывно регистрируемых (отображаемых) перемещений уменьшается в N раз, хотя их общая измеряемая величина остается значительной: динамический диапазон 180-190 дБ при абсолютном инструментальном разрешении $\Delta L \sim 1$ пм (10^{-12} м) [16].

Достижение рекордного уровня рабочих параметров ЛИД позволило расширить области их применения в геофизике и сейсмологии. Предложен новый метод повышения точности при определении характеристик сейсмических колебаний на основе совместной регистрации смещений и деформаций земной поверхности. Многокомпонентная система в полосе частот 0.7-2.1 Гц обеспечивает подавление микросейсмической помехи при выделении продольных сейсмических волн по сравнению с другими известными методами. В качестве примера для обработки были использованы данные регистрации землетрясения (Китай, 20.03.2008 г., $M_b = 5,9$).

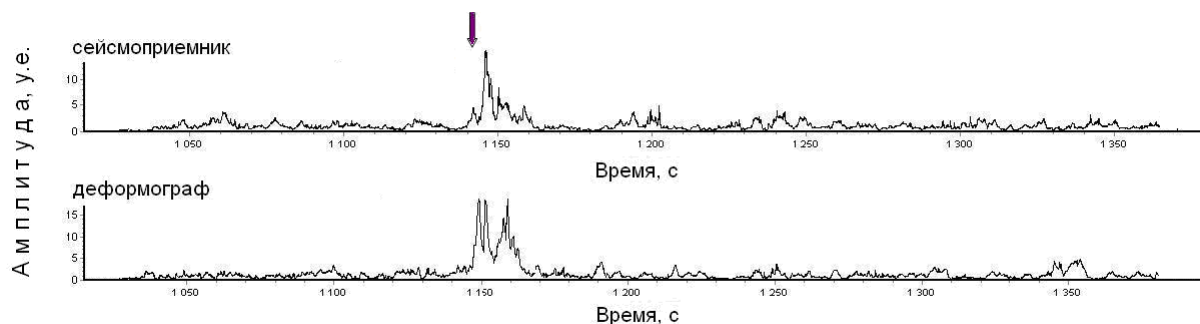


Рис. 2. Результаты обработки данных регистрации сейсмического и деформационного каналов 6-компонентного ЛИД во Фрязино (выделяемый на 1145-й секунде сигнал от землетрясения показан вертикальной стрелкой [4])

С помощью адаптивного оптимального метода обработки [4] на деформационном канале (рис. 2) получено большее по сравнению с сейсмическим каналом отношение сигнал/помеха.

Благодаря высокой чувствительности к деформациям земной поверхности ЛИД регистрируют не только сейсмические колебания почвы, вызванные уже происшедшим землетрясением, но и позволяют проследить пространственно-временную динамическую микроструктуру деформационных процессов, предвещающих землетрясение, изучить стадии его подготовки. С помощью ЛИД впервые исследовано такое малоизученное явление, как сверхбыстрое распространение сейсмической энергии от мощных импульсных источников. Впервые начаты исследования связи микроструктуры деформаций земной поверхности с колебаниями уровня подземных вод и сопоставление их с вариациями распределения электронной плотности ионосферы Земли и тропическим циклогенезом.

Создана уникальная пространственно распределенная лазерно-интерферометрическая система регистрации сейсмо-деформационных процессов в земной коре. Отдельные элементы системы разнесены друг от друга на расстояния 100-500 м (ЛИД на лучеводном полигоне во Фрязино) и до 140 км (ЛИД на геофизических станциях в Подмоскowie). С ее помощью изучены атмосферно-литосферные возмущения, перемещающиеся вдоль земной поверхности со скоростями 30-50 км/ч, обнаружена их связь с циклонической активностью атмосферы и сейсмичностью Земли. Совместная параллельная обработка данных, зарегистрированных ЛИД с разнесением в пространстве на 10^3 - 10^4 км (Фрязино – Владивосток – Камчатка) [17, 18] показывает возможность изучения геофизических процессов глобального характера.

Методология исследований состоит из следующих экспериментальных и вычислительных процедур [19]. Крупномасштабные пространственные и временные возмущения деформаций земной поверхности регистрируются пространственно распределенной системой ЛИД, а пространственные и временные модификации полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы отслеживаются микроволновым ионосферным профилометром, работающим на основе обработки данных спутников GPS. На рис.3 деформационно-барические возмущения, зарегистрированные ЛИД во Фрязино и

модификации ПЭС по данным станции GPS в Менделеево, сопоставлены с циклонической активностью в Атлантическом океане (диаграмма слева). Здесь приведены данные, полученные с помощью 100-метрового ЛИД и вариации скорости изменения ПЭС ионосферы, выделенные путем обработки радиосигналов от спутника GPS в течение трех суток 22-24 09 2001 г.

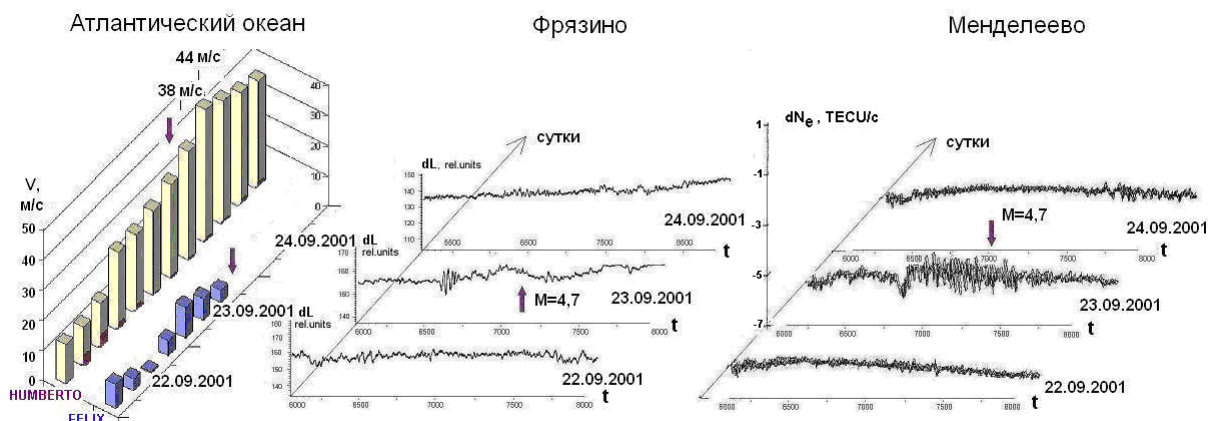


Рис.3. Активность тропических циклонов в Северной Атлантике (скорость ветра в м/с), деформационно-барические колебания (Фрязино) и модификации ионосферы (Менделеево) 22-24 сентября 2001 г. [19]

На записях, полученных во Фрязино и Менделеево, отмечается импульсно-волновое возмущение 23 сентября 2001 г., которое возникло за 1-2 часа до землетрясения у берегов Греции (21h 16.1m, 37.73N, 21.04E, M=4.7, h=33 км, показано вертикальными стрелками) – ближайшего к Московскому региону сейсмического события за указанный 3-суточный интервал времени. Характерной особенностью приведенных данных является корреляция наблюдавшихся явлений с прохождением тропических циклонов FELIX и HUMBERTO в Северной Атлантике. Именно в день 23.09.2001 г. первый из них разрушился, прекратив свое существование, а второй – достиг стадии тайфуна (урагана), превысив максимальную скорость ветра 33 м/с.

Аналогичные или близкие данные получены для ряда сильных землетрясений и мощных тропических циклонов в Тихом и Индийском океанах. Таким образом, применение разработанной методики позволяет сделать предположение, что отмеченные возмущения возбуждаются одновременно в трех соприкасающихся и взаимодействующих геосферах, а именно: в литосфере, атмосфере и ионосфере Земли. Сопровождающие их мощные стихийные бедствия (ураганы, тайфуны, землетрясения) имеют близкие энергетические и пространственно-временные масштабы. Для разработки адекватных физических моделей отмеченных явлений требуется проведение регулярных длительных наблюдений.

Полученные результаты могут быть использованы для развития новых методов сейсмического мониторинга, а также для разработки технологии краткосрочного обнаружения физических предвестников, снижения риска и уменьшения ущерба от разрушительных землетрясений и других природоопасных катастрофических явлений.

Литература

1. Дубров М.Н., Матвеев Р.Ф., Медведев П.В. Исследование когерентности излучения и чувствительности длиннобазовых лазерных интерферометров, *Электронный журнал "Исследовано в России"*, 2002, 187, 2077-2085.
2. Алешин В.А., Борисюк Ю.А., Дубров М.Н., Луканенков А.В., Матвеев Р.Ф., Николаев А.В. О регистрации быстрораспространяющихся компонент сейсмических сигналов лазерным деформографом, *Вулканология и сейсмология*, 2004, №1, с.70-73.
3. Дубров М.Н., Казанцева О.С., Манукин А.Б., Понятовская В.И. Исследование синхронных деформаций земной поверхности и вариаций уровня подземных вод, *Физика Земли*, 2007, №5, с.71-79.
4. Николаев А.В., Луканенков А.В., Дубров М.Н. Новые возможности совместной обработки данных регистрации смещений и деформаций в поле сейсмической волны, *ДАН*, 2010, т.430, №6, с. 816-819.
5. Головачев С.П., Дубров М.Н., Волков В.А. Взаимосвязь тропического циклогенеза и сейсмической активности по данным спутниковых и наземных измерительных комплексов, «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 2011, т.8, №1, с.232-238.
6. Agnew D.C., Wyatt F.K. Long-Base Laser Strainmeters: A Review. January 6, 2003. Scripps Institution of Oceanography Technical Report. <http://repositories.cdlib.org/sio/techreport/2>
7. Amoruso A., Crescentini L. The geodetic laser interferometers at Gran Sasso, Italy: Recent modifications and correction for local effects, *Journal of Geodynamics*, 2009, v.48, N(3-5), pp.120-125.
8. Takemoto S. Progress of Laser Strainmeter Observations in Japan, *Annuals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, 2005, N48 B, 14 pp.
9. Долгих Г.И., Валентин Д.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В., Фищенко В.К. Применение лазерных деформографов вертикальной и горизонтальной ориентаций в геофизических исследованиях переходных зон, *Физика Земли*, 2002, N8, с.69-73.
10. Багаев С.Н., Орлов В.А., Фомин Ю.Н., Чеботаев В.П. Лазерные деформографы для прецизионных геофизических измерений, *Изв. АН СССР, Физ. Земли*, 1992, №1, с.85-95.
11. Милюков В.К., Клячко Б. С., Мясников А. В., Стриганов П.С., Янин А.Ф., Власов А.Н. Лазерный интерферометр–деформограф для мониторинга движений земной коры, *ПТЭ*, 2005, №6, с. 87–103.
12. Abadie J. et al., Predictions for the rates of compact binary coalescences observable by ground-based gravitational-wave detectors, *Classical and Quantum Gravity*, 2010, Volume 27, Number 17,173001 (25pp) <http://iopscience.iop.org/0264-9381/27/17/173001>
13. Yu Y., Mitryk S, Mueller G., Experimental validation of dual/modified dual arm locking for LISA, *Classical and Quantum Gravity*, 2011, Volume 28, N9, 094009 (11pp) <http://iopscience.iop.org/0264-9381/28/9/094009>

14. Александров Д.В., Дубров М.Н., Шатров А.Д. Особенности работы высокостабильных лазеров при подключении несогласованной оптической нагрузки, РЭ, 2011, т.56, № 9, с.1149-1152.
15. Dubrov M.N., Laser Feedback and New Principle of Heterodyne Interferometry, Proceedings of the 8-th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling, June 2006, pp.92-95 <http://ieeexplore.ieee.org>
16. Dubrov M.N., Medvedev P.V. Accurate laser interferometer system for displacement measurements with 1 pm resolution. Proceedings of the 4th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, CAOL 2008. DOI 10.1109/CAOL.2008.4671874, pp.165-167, Full Text: PDF (172 KB) <http://ieeexplore.ieee.org>
17. Dolgikh G.I., Dubrov M.N., Dolgikh S.G., Kovalev S.N., Ovcharenko V.V., Savvin E.A., Chupin V.A., Shvets V.A., Yakovenko S.V. Application of laser strainmeters to the study of earthquake physics, Acta Geophys., 2006, v.54, N2, pp.187-197
18. Александров Д. В., Дубров М.Н., Ларионов И.А. Применение лазерных интерферометров-деформографов для регистрации геофизических процессов в акустическом диапазоне частот, Сборник докладов V международной конференции «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений», с. Паратунка, Камчатский край, 2-7 августа 2010 г., Петропавловск-Камчатский, ИКИР ДВО РАН, 2010, с.312-315.
19. Дубров М.Н., Смирнов В.М. Взаимосвязанные возмущения земной поверхности, атмосферы и ионосферы Земли, Геомагнетизм и аэрономия, 2013, т.53, №1, с.53-63.