

# Исследование когерентности излучения и чувствительности длиннобазовых лазерных интерферометров

Дубров М. Н. ([mnd139@ire216.msk.su](mailto:mnd139@ire216.msk.su)) (1),  
Матвеев Р.Ф. (1), Медведев П. В. (2)

(1) Институт радиотехники и электроники РАН

(2) Московский физико-технический институт

Анализируются особенности работы лазерных интерферометров с длиной измерительных плеч до 500 м. Разработана методика учета эффектов нарушения когерентности лазерного излучения, связанных со свойствами активной среды лазера и с явлениями обратного рассеяния света. Приводятся способы калибровки и верификации измерительных систем с абсолютным разрешением около 1 пм при относительной чувствительности интерферометров порядка  $10^{-14}$  в диапазоне частот выше 1 кГц. Указывается на необходимость учета разрабатываемых подходов при создании и применении уникальных лазерно-интерферометрических систем в гравитационно-волновых астрофизических экспериментах.

## 1. Введение

Развитие метрологии протяженных длин, прецизионное измерение больших расстояний, а также необходимость повышения точности геодинимических и сейсмических измерений инициировали на рубеже 1960-1970 гг. создание качественно новых измерительных инструментов - длиннобазовых лазерных интерферометров [1-3]. Первые же эксперименты с этими приборами выявили ряд особенностей их работы, препятствующих достижению ожидаемой чувствительности. В последующие десятилетия были разработаны высокоточные способы стабилизации частоты лазеров и прецизионные методы измерения сдвигов интерферограммы, что позволило довести относительную точность интерферометров при измерении деформаций до  $dL/L = 10^{-12}$  и получить ряд новых геофизических результатов [4-6].

В настоящее время фундаментальные физические исследования и эксперименты в области гравитационно-волновой астрономии являются одним из основных стимулов для разработок новых схем лазерных интерферометров с большой базой и предполагают повышение их чувствительности на несколько порядков. По сравнению с современными узкополосными (резонансными) приемниками веберовского типа [7], детекторы гравитационного излучения на свободных, разнесенных в пространстве пробных массах, расстояние между которыми регистрируется длиннобазовыми лазерными интерферометрами, являются более перспективными, поскольку смогут принимать сигналы в широкой полосе частот одновременно от различных астрофизических объектов. С 1980-х годов в США реализуется лазерный проект LIGO [8], длина интерферометров 4 км, проектная чувствительность к импульсным возмущениям  $dL/L = 10^{-23}$ . Около 10 лет ведутся аналогичные работы в Европе по совместному проекту Великобритании и Германии GEO-600 [9], а также Италией и Францией - по проекту VIRGO [10]. Получены первые результаты в рамках проекта

ТАМА300 (Япония) [11], опубликован проект GWADIR [12], в рамках которого планируется создать в Пакистане лазерно-интерферометрическую антенну длиной 3 км.

Таким образом, широко ведущиеся разработки новых прецизионных экспериментальных установок с целью создания лазерно-интерферометрических гравитационных антенн, ставят на новый уровень задачу исследования факторов, препятствующих достижению предельно высоких точностей длиннобазовых лазерных интерферометров. Нарушение когерентности лазерного излучения является одним из основных среди этих факторов, в том числе и для равноплечих схем интерферометров [8-12].

В настоящей работе на примере исследований, проводимых в ИРЭ РАН в области длиннобазовой лазерной интерферометрии, иллюстрируются ряд особенностей этих уникальных инструментов с учетом требований, предъявляемых к лазерам как источникам когерентного излучения, а также к системам регистрации смещений интерферограммы, измеряющих вариации оптической длины интерферометра.

## 2. Характеристики лазерно-интерферометрических установок

В течение многих лет в ИРЭ РАН ведутся исследования и разработки длиннобазовых лазерных интерферометров для сейсмического и деформографического мониторинга Земли, для изучения когерентных свойств лазерных пучков при передаче их на большие расстояния. Основной экспериментальной базой для этих работ с начала 1970-х годов является подземный лучеводный полигон ИРЭ во Фрязино [13]. Здесь впервые в стране нами были проведены исследования двулучевых интерферометров с разностью хода более 1 км [14] и создан уникальный 500-метровый равноплечий интерферометр, позволяющий фиксировать слабые сейсмические сигналы [15]. В настоящее время чувствительность аппаратуры, регистрирующей смещения интерферограммы, улучшена до величины  $dL = 0,001$  нм [16], а относительное разрешение интерферометра [15] доведено до  $dL/L = 10^{-14}$  в диапазоне частот от 1 кГц до 10 кГц. У нас накоплен опыт исследований с помощью лазерных интерферометров протяженностью от 4 м до 100 м на геодинамических полигонах в Таджикистане, на Камчатке, Казахстане и других регионах. В настоящее время в двух пунктах Подмосковья функционируют опытные установки, включающие: многокомпонентные интерферометры с одним вертикальным и несколькими горизонтальными измерительными плечами [16,17]. Ведутся работы с целью улучшения метрологических параметров этих инструментов, увеличения длины измерительной базы и полосы частот исследуемых сигналов.

По сравнению с другими отечественными разработками лазерных интерферометров с большой базой (ГОИ им. Вавилова, ИЛФ СО РАН, ТОИ ДВО РАН, ГАИШ МГУ им. Ломоносова и др.) исследования, ведущиеся на лучеводном полигоне ИРЭ РАН, и на сегодня являются наиболее продвинутыми как по точности измерений, так и по длине измерительной базы интерферометров, экранированных от влияния атмосферы (см., например, обзор и цитируемую литературу в работах [18а,б]).

## 3. Методы учета когерентности лазерного излучения

Для повышения интенсивности интерференционной картины на выходе лазерного интерферометра нередко используют многочастотные стабилизированные лазеры, генерирующие излучение одновременно на нескольких продольных модах - оптических частотах:

$$\dots \nu_{n-1}, \nu_n, \nu_{n+1}, \dots, \quad (1)$$

которые находятся в пределах доплеровски уширенной линии усиления активной среды лазера.

Расстояние между соседними оптическими частотами в нулевом приближении определяется расстоянием между ближайшими оптическими резонансами лазерного резонатора, которое, в свою очередь, задается его длиной  $l$  и выражается отношением  $c/2l$  ( $c$  - скорость света). Функция когерентности такого многочастотного излучения является периодической, а максимальная контрастность (видность) интерферограммы будет наблюдаться в точках, когда длина  $L$  измерительного плеча, например, несимметричного интерферометра Майкельсона будет кратна длине резонатора лазера. Этим свойством многочастотных лазеров пользуются при создании практических схем длиннобазовых лазерных интерферометров.

Однако в реальной ситуации, т.е. для лазера, состоящего из оптического резонатора и помещенной внутри него активной усиливающей среды, необходимо учитывать также и оптические свойства этой среды. В первом приближении расстояние между соседними лазерными частотами можно записать как

$$\nu_n - \nu_{n-1} = (c/2l) \cdot (1+S_\alpha),$$

где  $S_\alpha$  - коэффициент сдвига частоты, который определяется дисперсионными свойствами (зависимостью диэлектрической проницаемости от частоты) активной среды, способами ее накачки, превышением усиления над потерями и другими параметрами лазерного резонатора [2].

Величина коэффициента  $S_\alpha$  может быть определена экспериментально с помощью более точной зависимости, учитывающей также и такие тонкие эффекты, как затягивание и отталкивание частот лазера:

$$\nu_n - \nu_{n-1} = (c/2l) \cdot [1+S_\alpha(1-\delta^2 + \beta^2/3)],$$

где  $\delta = \Delta\nu / D$  - относительная расстройка (смещение частоты  $\Delta\nu$  относительно центра доплеровской линии усиления шириной  $D$ ),  $\beta$  - величина, пропорциональная обратному отношению добротностей лазерного резонатора и линии доплеровского контура активной среды.

На рис.1 изображена экспериментально измеренная нами зависимость  $\nu_n - \nu_{n-1}$  от  $\delta$  при перестройке частот лазера в пределах  $c/2l$  за счет продольного перемещения одного из зеркал его резонатора. Там же показаны периодические изменения выходной мощности  $P$  лазера, которые наблюдаются при этом. Цифрами 1 и 2 обозначены зоны одночастотного и двухчастотного режимов генерации лазера.

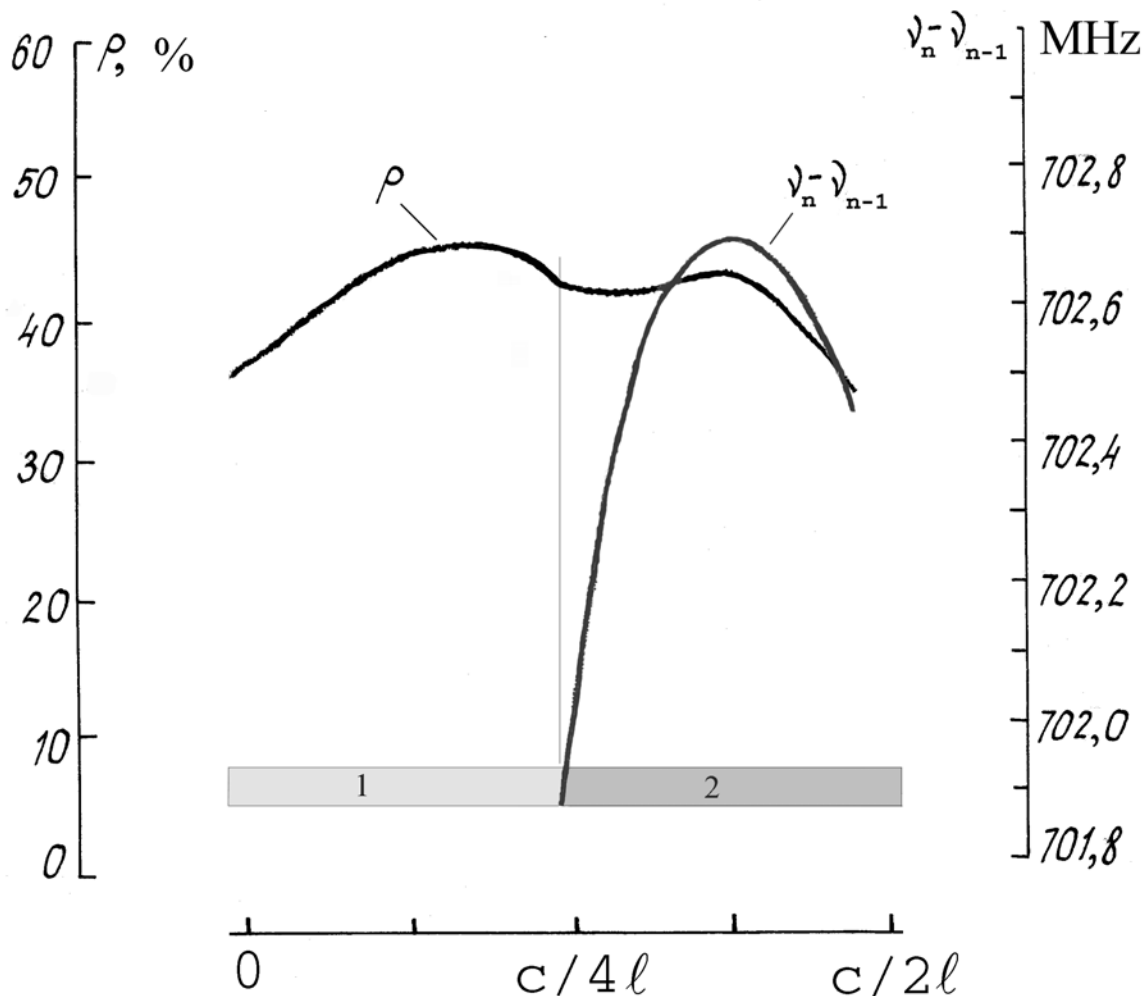


Рис.1.

Полученная из этих результатов величина коэффициента  $S_\alpha$  сдвига частоты оказывается равной:

$$S_\alpha = 0,012$$

(в расчетах нами были приняты следующие значения параметров лазера:  $l = 21,6$  см;  $D = 1010$  МГц;  $\beta = 0,35$ ).

Таким образом, чтобы добиться максимальной контрастности интерферограммы при точной настройке большого плеча интерферометра, его длину необходимо уменьшить на 1,2% по сравнению с грубым нулевым приближением  $L = n l$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots$  (Увеличению разности частот соответствует уменьшение длины резонатора лазера). Например, при длине интерферометра 10 м ( $n \approx 46$ ) величина поправки составит 12 см, что превышает половину длины резонатора лазера, т.е. величину, при которой контрастность интерферограммы становится минимальной.

Обратимся к другому примеру нарушения когерентности лазерного излучения - рассмотрим вариации его параметров под действием обратного рассеяния [20]. Если часть излучения в виде отраженного или рассеянного света возвращается в резонатор лазера, то излучаемые частоты (1) оказываются возмущенными, что, в свою очередь,

приводит к дополнительным ошибкам интерференционных измерений. Использование оптических вентилях [2], затворов [18] или рециркуляторов [11], устанавливаемых между лазером и интерферометром, позволяет лишь ослабить эффект обратного рассеяния, но не устраняет его полностью.

Для рассмотренного выше двухчастотного лазера воздействие даже такого слабого источника, как рассеяние на брестеровских окнах газоразрядной трубки лазера, приводит к заметным девиациям разностной частоты  $\nu_n - \nu_{n-1}$  и интенсивности выходного излучения [21]. На рис.2 приведены результаты эксперимента, в котором измерялись вариации максимального значения разностной частоты (положение экстремума функции  $\nu_n - \nu_{n-1}$  на рис.1) во времени. Для этого осуществлялось периодическое сканирование длины резонатора лазера на небольшую величину  $\delta l$ , и одновременно проводилась регистрация разностной частоты на диаграмме самописца.

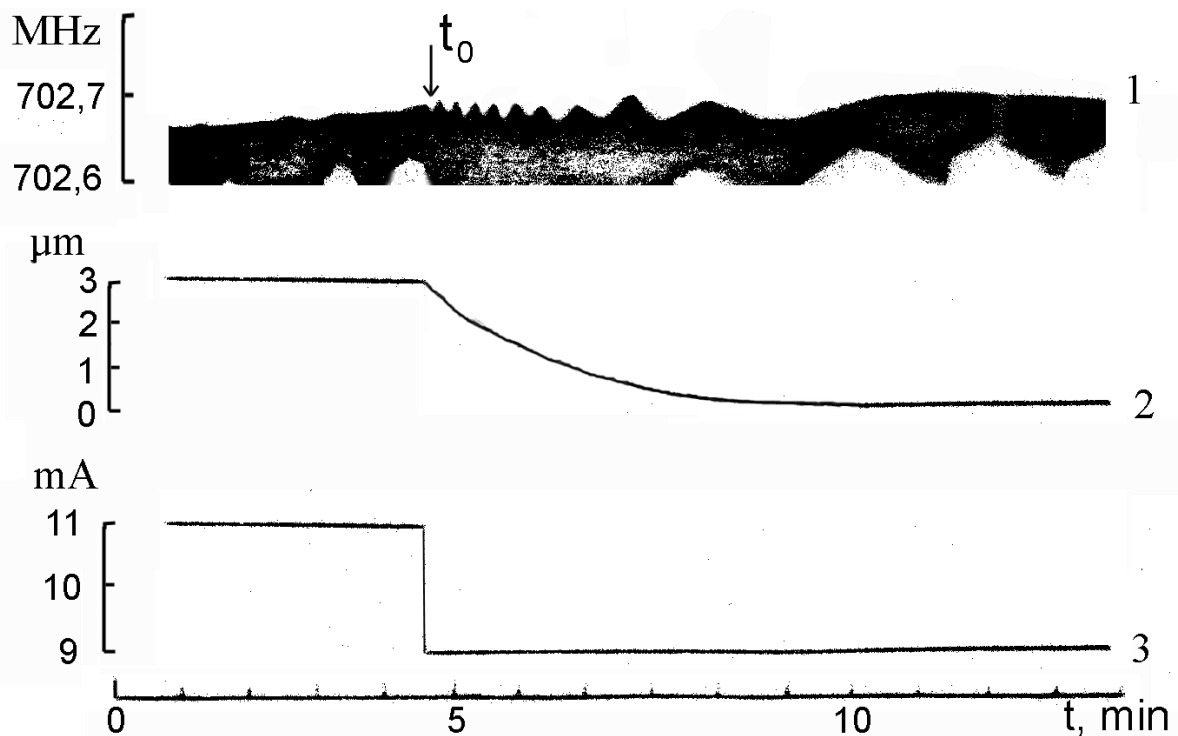


Рис.2.

Амплитуда сканирования выбиралась в диапазоне  $\delta l \sim (0,03-0,05)\lambda$ , где  $\lambda = 633$  нм - длина волны излучения лазера; на оси частот (рис.1) это соответствует перемещениям до 10% от величины  $c/2l$ . Такая методика позволила исключить влияние систематических уходов разностной частоты путем подстройки длины резонатора  $l$  и смещения начальной точки сканирования  $\delta l$ . Таким образом, линия, огибающая сверху записываемый на диаграммной ленте процесс (рис.2-1), отражает ход экстремальной величины  $(\nu_n - \nu_{n-1})_{\max}$  во времени. При выполнении эксперимента в момент  $t_0$  было произведено изменение тока накачки газоразрядной трубки лазера на величину  $\delta I = -2$  мА, что вызвало ее остывание и перемещение брестеровского окна в виде переходного временного процесса (рис.2-2). Характерные колебания разностной частоты происходят с уменьшающейся скоростью в соответствии с замедлением скорости расширения трубки. При этом одно полное колебание огибающей линии соответствует перемещению брестеровского окна на величину  $\lambda/2 = 316$  нм. Максимальное изменение разностной частоты  $\delta(\nu_n - \nu_{n-1})$  достигает 20 - 30 кГц. Этот

результат может быть использован для оценки воспроизводимости частоты лазеров, стабилизированных по радиочастотным межмодовым биениям [14].

#### **4. Измерение малых сдвигов интерферограммы: калибровка и верификация результатов**

Важной задачей выполнения высокоточных интерференционных измерений является обеспечение линейности системы регистрации малых сдвигов интерферограммы одновременно в широком диапазоне перемещений, превышающих, например, несколько периодов картины. Применявшийся в первых образцах длинноволновых лазерных интерферометров [1] и усовершенствованный нами способ регистрации [3,14] позволил добиться разрешающей способности регистрирующих устройств на уровне 1 пм ( $10^{-12}$  м) при нелинейности менее 1% в динамическом диапазоне регистрируемых сигналов свыше 180 дБ [16]. В предложенных нами устройствах используется метод расширения динамического диапазона, который заключается в автоматическом переносе начала отсчета на величину  $+n\lambda/2m$  ( $n, m = 1, 2, 3, \dots$ ) или  $-n\lambda/2m$  при достижении амплитуды сигнала, пропорционального измеряемому перемещению, уровня  $-n\lambda/2m$  или  $+n\lambda/2m$  соответственно. Образующиеся разрывы в виде резких положительных и отрицательных ступенек на записи, которые учитываются при обработке результатов измерений, являются одновременно достаточно точной и надежной калибровкой прибора.

##### *4.1. Метод пробных сигналов*

Однако задача усложняется при повышении точности измерений. На практике нами реализованы приборы, обеспечивающие кратность деления периода интерферограммы  $m = 4 - 160$  [16,22]. Диапазон непрерывно измеряемых перемещений (величина автоматических переносов) при этом снижается до  $\pm 2$  нм, а разрешающая способность приборов опускается до пикометровых величин, прямая калибровка которых затруднена. Для верификации измерительных устройств в этом случае оказывается эффективным метод введения в измеряемую величину пробного сигнала, например, модуляция интерферограммы с помощью пьезоэлектрических или электрооптических модуляторов. Для имитации пробных сигналов в субнанометровом диапазоне перемещений электрооптические модуляторы оказываются предпочтительнее благодаря их линейности. На рис.3 приведены примеры регистрации спектральных пиков, соответствующих пробным сигналам, выделяемым в колебаниях интерферограммы 500-метрового интерферометра равноплечего типа [15]. Использовался модулятор на кристалле KDP, амплитуды имитируемых смещений интерферограммы  $\delta L = 0,2$  нм на частотах 1 кГц и 10 кГц (рис.3-1). С учетом полосы пропускания частотно-избирательных регистрирующих устройств нами получены оценки для спектральной плотности шумов этого интерферометра в диапазоне частот 0,2 - 2 кГц и 2 - 20 кГц (рис.3-2):

$$\Delta L / (L \times \text{Гц}^{1/2}) = 5 \times 10^{-14} \text{ Гц}^{1/2} \quad \text{и} \quad \Delta L / (L \times \text{Гц}^{1/2}) = 2 \times 10^{-14} \text{ Гц}^{1/2}$$

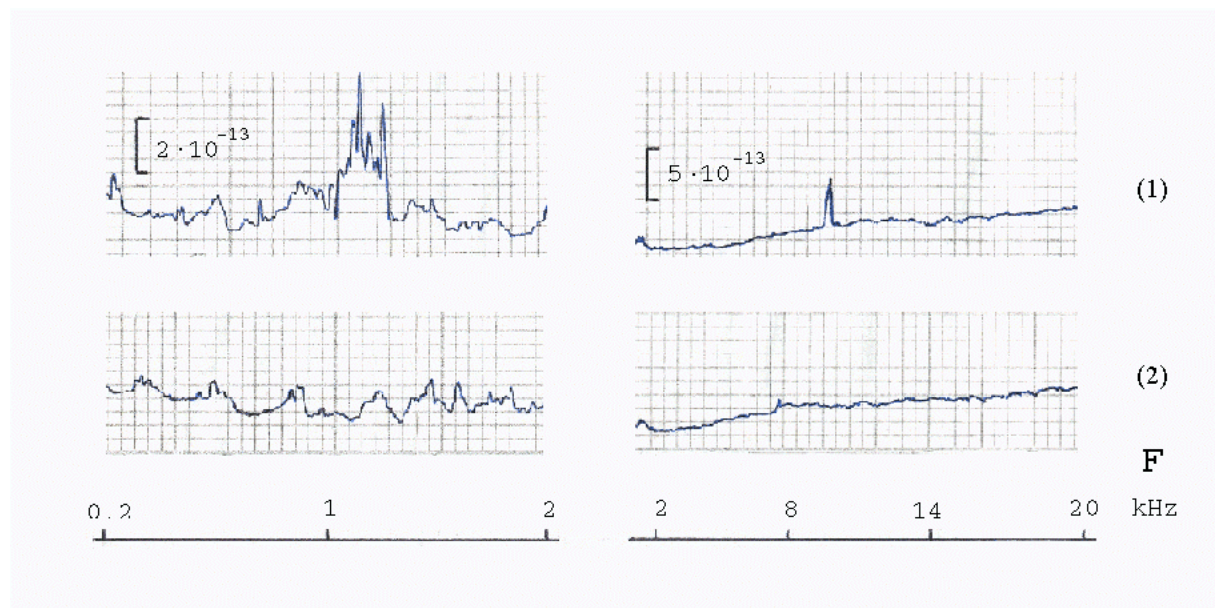


Рис.3.

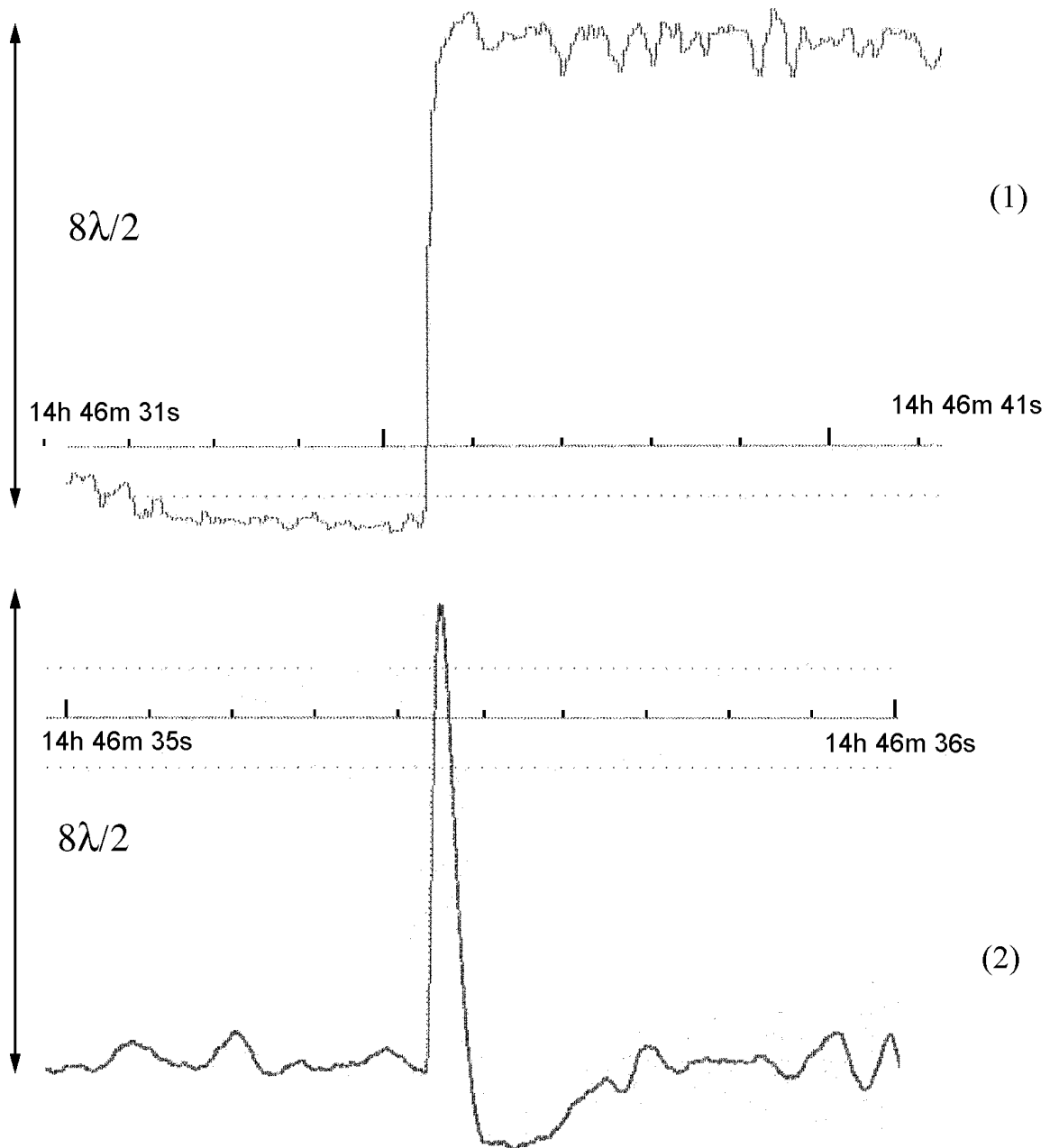
Аналогичные подходы при их определенной модификации могут быть использованы для калибровки и верификации результатов измерения с помощью сверхчувствительных интерферометров, таких, как, например [11]. Эта процедура является довольно существенным моментом в силу возможных эффектов обратного рассеяния, о которых шла речь в предыдущем разделе. Наличие нелинейностей в связанной электродинамической системе лазер - интерферометр [21] будет искажать процесс получения экспериментальных данных. Вопрос о метрологической проверке создаваемых измерительных систем может оказаться решающим при оценке достоверности получаемых с их помощью результатов.

#### 4.2. *Определение амплитудно-частотных характеристик*

При исследовании сигналов, регистрируемых лазерными интерферометрами в широкой полосе частот, возникает задача сопоставления результатов: 1) полученных одним и тем же интерферометром в различных частотных диапазонах и 2) полученных в одном и том же диапазоне частот, но разными по конструкции интерферометрами.

Традиционно считается, что лазерный интерферометр как измеритель деформаций, например, земной поверхности является широкополосным инструментом, и его амплитудно-частотная характеристика - постоянная величина во всем исследуемом диапазоне частот, скажем от  $10^{-8}$  Гц до  $10^2$  Гц [2,4]. Однако при рассмотрении каждой измерительной схемы лазерного интерферометра можно отметить ряд физических и технических факторов, искажающих первоначально идеальную - постоянную частотную характеристику прибора и делающей ее зависимой от частоты.

Для иллюстрации этого обстоятельства на рис.4 приведен пример записи, полученной двумя синхронно работающими цифровыми каналами регистрации, для одного и того же сигнала на выходе 300-метрового интерферометра во Фрязино. Лазерный интерферометр помехоустойчивого типа ЛИД-М [22] установлен на



15.11.2002

Рис.4.

лучеводном полигоне ИРЭ и фиксирует вариации длины лучевода на участке СИП16-СИП10 [13]. Система регистрации на основе динамического цифрового фазометра измеряет сдвиги интерферограммы с применением упомянутого в предыдущем разделе метода расширения динамического диапазона путем автоматического переноса начала отсчета на величину  $\pm 8\lambda/2$ . Аналоговый сигнал с выхода фазометра в каждом канале регистрации проходит через аналоговые фильтры и поступает на АЦП компьютера. Параметры каналов следующие: 1-й канал - фильтр низких частот 0-5 Гц, разрядность



АЦП  $2^{14}$ , частота опроса 18 Гц (рис.4-1); 2-й канал - полосовой фильтр 20 Гц - 2 кГц, разрядность АЦП  $2^{16}$ , частота опроса 8 кГц (рис.4-2). На приведенных фрагментах записи (рис.4) показан момент переноса начала отсчета системы регистрации на величину  $+8\lambda/2 = +2,53$  мкм. Амплитуды импульсов переноса служат для калибровки чувствительности, а формы переходных процессов используются для определения амплитудно-частотных характеристик каждого из каналов. Применяемая нами методика отличается своей простотой и эффективностью.

### 5. Заключение

Разработка методов учета когерентности излучения является важной задачей при повышении точности интерференционных измерений на протяженных базах. Применение симметричных (равноплечих) схем длиннобазовых интерферометров снижает требования к стабильности частоты лазеров, но не устраняет проблему нарушения когерентности полностью. Калибровка и верификация точности длиннобазовых лазерных интерферометров - неременное условие достоверности результатов, получаемых с помощью этих уникальных инструментов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект №02-05-64720.

### Литература

1. Вэли В. Сейсмические измерения с помощью лазера. //УФН, 1971, Т.109, Вып.1, с.127.
2. Д. Бергер, Применение лазерной техники в геодезии и геофизике, М.: Наука, 1977.
3. Дубров М. Н. //Известия АН СССР, Физика Земли, 1976, №5, с.90-93.
4. Levine J. //Ann. Rev. Earth Planet. Sci., 1977, v.5, pp.357-369.
5. Takemoto S. //Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., 1979, v.29, Part 2, N262, p.65.
6. Dubrov M. N., Alyoshin V.A., Yakovlev A.P. //Gerlands Beitr. Geophysik, 1989, v.98, s.292.
7. Bernard Ph., Gemme G., Parodi R., Picasso E. //Rev. Sci. Instrum., 2001, v.72, N5, p.2428.
8. Althouse W.E., Hand S.D., et al //Rev. Sci. Instrum., 2001, v.72, N7, pp. 3086-3094.
9. Casey M. M., Ward H., Robertson D. I. //Rev. Sci. Instrum., 2000, v.71, N10, p.3910.
10. Braccini S., Bradaschia C., Cobal M., et al //Rev. Sci. Instrum., 1993, v.64, N2, p.310.
11. Ando M., Arai K., Takahashi R., et al //Phys. Rev. Lett., 2001, V.86, N18, pp.3950-3954.
12. Farooqui S.Z., Karim M., et al //Astrophys. and Space Sci., 1998, v.258, N1-2, p.221.
13. Вардья В.П., Дубров М.Н., Коршунов И.П., Матвеев Р.Ф. //Радиотехника и электроника, 1978, т.23, N10, с.2069-2083.
14. Алешин В.А., Дубров М.Н. //Квантовая электроника, 1977, т.4, №10, с.2260-2262.
15. Алешин В.А., Дубров М.Н. //ОМП, 1979, №9, с.16-18.
16. Дубров М.Н., Алешин В.А. //Журнал радиоэлектроники (электронный журнал), 2000, N10, <http://jre.cplire.ru/jre/oct00/4/text.html>
17. Дубров М.Н., Матвеев Р.Ф. //Радиотехника и электроника, 1998, т.43, N9, с.1147.
- 18а. Нестеров В.В. Большебазовые лазерные интерферометры в геофизических исследованиях. Симферополь: Таврия, 1996, 285 с.
- 18б. Долгих Г.И. Исследование волновых полей океана и литосферы лазерно-интерференционными методами. Владивосток: Дальнаука, 2000, 160 с.
19. Ярив А. Квантовая электроника. /Пер. с англ. под ред. Я. И. Ханина, М.: Советское радио, 1980, 488 с.
20. Дубров М.Н. /В сб. Лазеры и современное приборостроение, С-Пб, 1991, с.71-84.
21. Дубров М.Н., Алешин В.А., Мальцев В.П. /Препринт №17(546), М.: ИРЭ, 1990, 31 с.
22. Дубров М.Н., Лукошков С.В., Посошенко и др. //ПТЭ, 1995, №5, с.201-203.