

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.5.1>

УДК: 531.715.1

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВИДНОСТИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ КАРТИНЫ В ТРЕХЗЕРКАЛЬНОМ ЛАЗЕРНОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ-ДАЛЬНОМЕРЕ

И.С. Булатов<sup>1</sup>, Н.А. Коробов<sup>1</sup>, Д.В. Александров<sup>2</sup>, М.Н. Дубров<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер. 9

<sup>2</sup> Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 141190, Московская обл., г. Фрязино, пл. Введенского 1

Статья поступила в редакцию 29 апреля 2022 г.

**Аннотация.** Исследуются прецизионные радиооптические методы измерения больших длин и расстояний с интерференционной точностью. Экспериментально получены и проанализированы зависимости видности интерференционной картины от изменения длины резонатора лазера при различных значениях длины измерительного плеча трехзеркального интерферометра. Зависимости видности от расстояния до внешнего отражателя содержат характерных точки, определяемые соотношением между длиной резонатора лазера и указанным измеряемым расстоянием. Полученные зависимости нужны для оптимальной настройки частоты лазера при реализации высокоточных методов измерения длины и перемещений. Показано, что с помощью трехзеркального лазерного интерферометра-дальномера, работающего в двухмодовом режиме может быть достигнута интерференционная точность измерения длины и малых перемещений на расстояниях до 100 км.

**Ключевые слова:** лазер, резонатор, интерферометр, дальномер

**Финансирование:** Данное исследование проводится в рамках государственного задания ИРЭ РАН.

**Автор для переписки:** Дубров Мстислав Николаевич, [mnd139@ire216.msk.su](mailto:mnd139@ire216.msk.su)

## Введение

Разработка прецизионных радиоэлектронных и оптических инструментов для измерения длин и расстояний с интерференционной точностью является актуальной задачей в современной геофизике, астрономии, навигации и других областях. Такие измерения в наши дни используются в наземных высокоточных инструментах для изучения деформаций и сейсмичности Земли [1, 2], а также в действующих и проектируемых орбитальных комплексах для картирования и мониторинга временных вариаций как локального гравитационного поля Земли [3], так и детектирования гравитационных волн, приходящих из дальнего космоса [4].

Для измерения километровых длин и расстояний с нанометровой точностью применяются перестраиваемые лазеры с возможностью прецизионного регулирования и стабилизации частоты излучения [5, 6]. Существуют различные схемы построения интерферометрических инструментов для таких измерений. Например, для повышения принимаемой оптической мощности в орбитальной измерительной системе [3] используется интерферометрическая схема с двумя синхронизированными по фазе лазерами, установленными на следующих друг за другом спутниках. Возможностью устойчивой работы при слабом уровне отраженного и рассеянного излучения обладают лазерные интерферометры с оптической обратной связью [7, 8], в частности, трехзеркальные интерферометры на основе частотно-фазовой модуляции лазерного излучения [9]. Схема трехзеркального оптического резонатора лежит в основе прецизионного лазерно-интерферометрического измерителя расстояний и перемещений [10] – оригинального инструмента, сочетающего в себе свойства как лазерно-интерферометрического, так и радио-оптического методов измерений.

Во всех перечисленных устройствах важной проблемой является выяснение зависимости видности интерференционной картины, определяющей в конечном итоге отношение сигнал/шум и точность каждого конкретного инструмента, от взаимного соотношения параметров лазерного резонатора и

внешнего измерительного плеча интерферометра. Исследованию этой задачи и связанных с ней вопросов посвящена данная работа.

## 1. Описание применяемых методов

Любой лазерный измерительный инструмент может быть представлен в виде простейшей электродинамической системы, включающей основной резонатор лазера и внешний отражающий (рассеивающий) объект – фотоприемник, линзы, зеркала и другие оптические элементы. По такой схеме строится трехзеркальный лазерный интерферометр-дальномер [10], включающий лазер, длиннобазовый интерферометр и систему управления видностью интерференционной картины путем регулировки оптических режимов лазера с помощью точного изменения длины его резонатора.

Генерация излучения в трехзеркальном лазерном интерферометре происходит на собственных частотах, которые находятся путем решения дисперсионного уравнения, описывающего поведение электромагнитного поля в данном оптическом резонаторе. Для устройства с резонатором из трех сферических (цилиндрических) зеркал в приближении слабого внешнего отражения такие частоты определяются из [11]:

$$r_1 r_{23} \exp(-2ikl) = 1, \quad (1)$$

$$r_{23} = r_2 + r_3 \exp(-2ikL + \ln(t_2)), \quad (2)$$

$$v_{mq} = (m - a_q) c / (2l), \quad (3)$$

где:  $r_1, r_2, r_3$  – коэффициенты отражения зеркал ( $r_3 \ll 1$ ),  $l$  – оптическая длина (расстояние между зеркалами) резонатора лазера,  $k = v/c$  – волновое число ( $v$  – частота излучения,  $c$  – скорость света),  $L$  – оптическая длина внешнего резонатора-интерферометра (измеряемое расстояние),  $t_2$  – коэффициент пропускания среднего зеркала (выходного зеркала резонатора лазера),  $m$  – номер продольной моды,  $a_q$  – фазовая добавка, зависящая от соотношения между кривизной зеркал и длинами резонатора лазера и интерферометра [11]. При этом, частота межмодовых биений лазера равна:

$$\Delta v = c / (2l). \quad (4)$$

Как было ранее показано в [10, 12], видность интерференционной картины в рассматриваемой оптической системе зависит от соотношения параметров лазерного резонатора и интерферометра, а также от количества генерируемых продольных мод. В частности, для лазера, работающего в двухмодовом режиме [10]:

$$V(L, l) \approx V_0 \frac{\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + 2I_1 I_2 \cos(2\pi L/l)}}{I_1 + I_2}, \quad (5)$$

где:  $V_0$  – видность в одномодовом режиме работы лазера,  $L$  – расстояние между лазером и третьим измерительным зеркалом,  $I_1$  и  $I_2$  – интенсивности интерферирующих пучков.

Из формулы (5) видно, что при синфазной интерференции  $L = n l$  (где  $n$  – целое число,  $l$  – длина резонатора лазера) световые волны двух мод складываются и результирующая видность будет:  $V(L, l) \approx V_1$ , где  $V_1$  – видность интерференционной картины, сформированной световыми волнами в одномодовом режиме генерации. При противофазной интерференции, когда  $L = (n+1/2) l$ , зависимость видности содержит особые точки, в которых величина видности претерпевает резкие изменения [12], что используется для точной настройки лазерного резонатора при реализации метода измерения длины и перемещений в трехзеркальном лазерном интерферометре-дальномере.

## 2. Результаты экспериментальных исследований

Схема экспериментальной установки, на которой проводились исследования, приведена на рисунке 1. В качестве источника излучения использовался He-Ne лазер (1) ОКГ-16, зеркала которого  $r_1$  и  $r_2$  вместе с внешним отражателем  $r_3$  образуют трехзеркальный интерферометр, работающий на принципе оптической обратной связи [7-9]. Излучение лазера (длина резонатора  $l = 16$  см) направляется на отражатель, установленный на расстоянии  $L_0 \approx 1,5$  м от лазера. Часть отраженного излучения возвращается в резонатор лазера и формирует интерференционную картину, интенсивность которой детектируется

фотоприемником (2) и наблюдается в виде максимумов  $I_{\max}$  и минимумов  $I_{\min}$  интерференционного сигнала на экране осциллографа (3).

Измерение видности  $V$  производится путем непрерывной регистрации этого сигнала с помощью аналого-цифрового преобразователя (4) и персонального компьютера (5). Вычисление величины  $V$  выполняется по стандартной формуле:

$$V = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}) \quad (6)$$

с применением специальной разработанной нами компьютерной программы, реализующей модифицированные алгоритмы обработки видео информации и графических изображений.

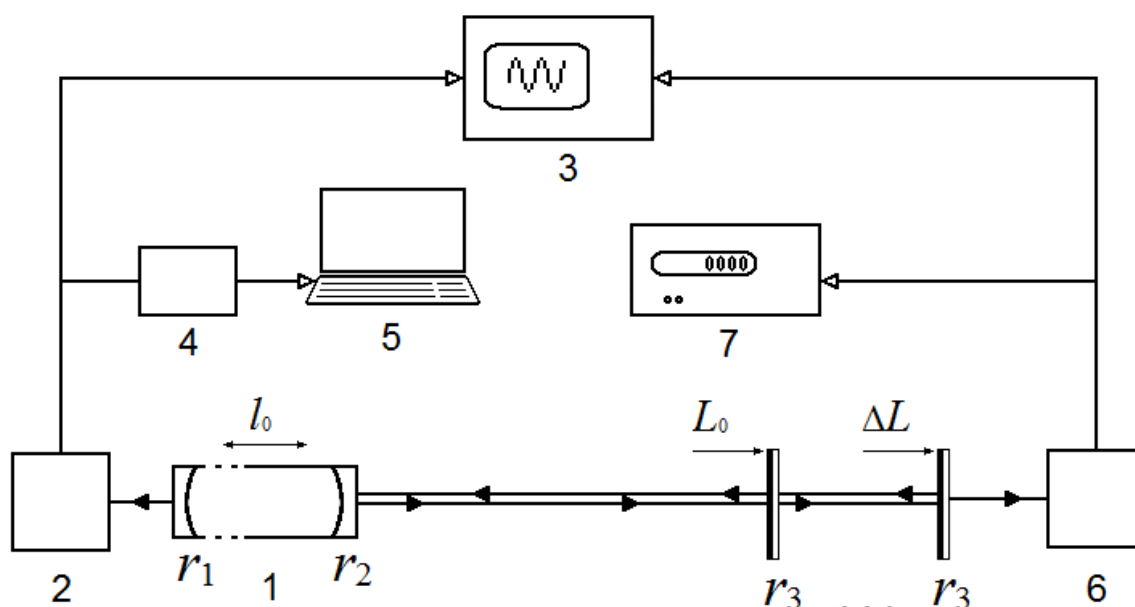


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – лазер, 2 – фотоприемник, 3 – осциллограф, 4 – аналого-цифровой преобразователь, 5 – персональный компьютер, 6 – гетеродинный фотоприемник, 7 – частотомер

Изменения видности регистрировались отдельными сеансами при различных положениях  $L$  внешнего отражателя  $r_3$  и непрерывном во времени изменении длины резонатора  $l$ .

На рисунке 2 представлены графические зависимости видности  $V(L, l)$  от времени нагрева лазера или, что то же – увеличения длины резонатора лазера в процессе его работы. Для каждого представленного на рисунке графика отражатель устанавливался на фиксированных расстояниях от лазера  $L_0 + \Delta L$ , где

$\Delta L = 0$  см, 4 см, 8 см, 12 см и 16 см – на рисунке кривые (а) – (д) соответственно. Данные зависимости описывают изменения значений видности (5) от времени из-за увеличения длины резонатора  $\Delta l$  лазера при его нагреве. Изменения видности происходят периодически при увеличении длины  $l$  на величину, кратную половине длины волны лазера:  $\Delta l = n \lambda/2, n=1, 2, \dots$

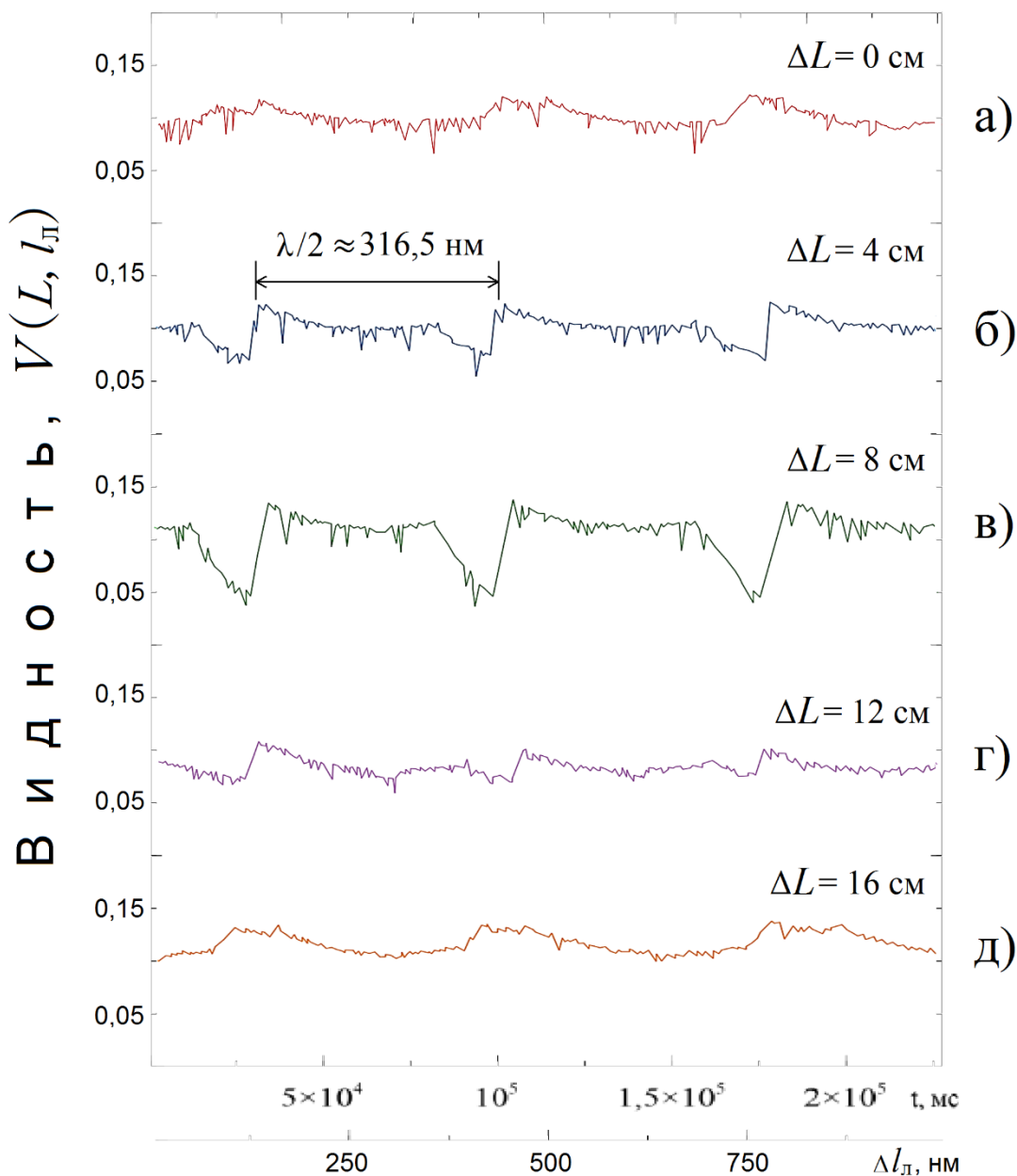


Рис. 2. Зависимость видности  $V(L, l)$  от изменения длины  $\Delta l$  резонатора лазера при различных положениях  $\Delta L$  отражателя

На рисунке 3 изображены две кривые, характеризующие зависимость экстремальных значений видности  $V(L, l)$  от расстояния  $L$  до отражателя. Верхняя кривая (а) – это совокупность периодических во времени значений

глобальных максимумов  $V_{\max}$  для кривых видности, изображенных на рис. 2. Нижняя кривая (б) отображает соответственно положение глобальных минимумов  $V_{\min}$  при установке отражателя на различных расстояниях от лазера. Значение видности изменяется в пределах от  $V_{\min} = 0,04$  до  $V_{\max} = 0,14$  при перемещении отражателя в диапазоне  $\Delta L = 0 \dots 28$  см.

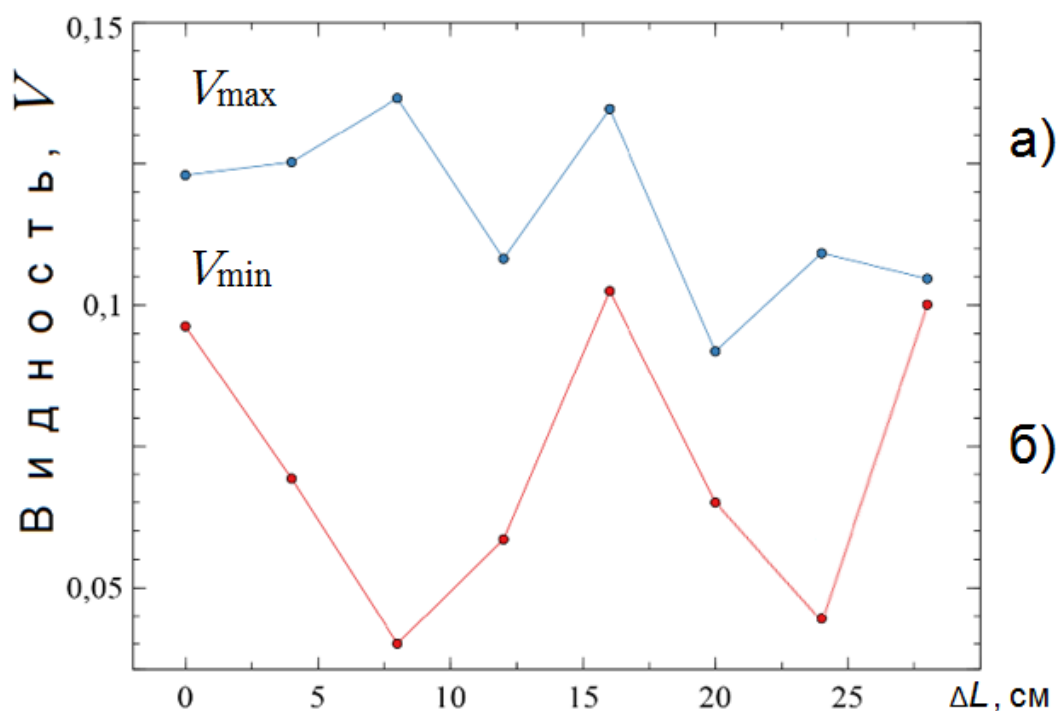


Рис. 3. Зависимость максимальных  $V_{\max}$  и минимальных  $V_{\min}$  значений видности от изменения расстояния  $L_0 + \Delta L$  до отражателя

### 3. Анализ полученных результатов

На каждой кривой видности (рис. 2, а-д) периодически наблюдаются участки, где скорость изменения видности незначительна. Например, на кривой видности, полученной для положения отражателя  $\Delta L = 8$  см (рис. 2 в), относительно небольшие (по сравнению с областями в окрестности минимумов) изменения видности наблюдаются при расширении резонатора на таких участках, как  $\Delta l = 130 \dots 370$  нм,  $450 \dots 690$  нм,  $790 \dots 910$  нм. Такой характер изменения видности в трехзеркальном интерферометре соответствует одномодовому режиму работы лазера. На кривой видности (рис. 2 в), по сравнению с другими кривыми (а, б) и (г, д), получены наиболее резкие

изменения видности вблизи минимумов:  $\Delta l \approx 120$  нм,  $\approx 430$  нм,  $\approx 770$  нм, соответствующих двухмодовому режиму работы лазера (5).

Наблюдаемые периодические вариации связаны с изменением модового состава излучения лазера в процессе непрерывного увеличения длины его резонатора при нагреве. Режим работы лазера периодически меняется между одномодовым и двухмодовым в связи с тем, что позиции  $m$ -й и  $(m+1)$ -ой мод сдвигаются по оси оптических частот влево (см. формулу (3)) относительно доплеровского контура усиления (его ширина около 1,5 ГГц для He-Ne лазера) при увеличении длины резонатора  $l$ , а частота межмодовых биений (4), т.е. межмодовое расстояние для лазера ОКГ-16 составляет  $\Delta\nu \approx 0,94$  ГГц. Изменение частоты биений на выходе гетеродинного фотоприемника (6) рис. 1, связанное с формой доплеровского контура лазера [10], происходит в пределах  $\pm 0,3 \dots 0,4$  МГц, имеет периодический характер (полный период изменения  $\Delta l = \lambda/2 \approx 316,5$  нм) и используется для управления расстоянием между частотами генерируемых мод.

Экстремумы видности  $V(L, l)$ , приведенные на рисунке 3 описывают характерные значения видности при одномодовом (максимумы) и двухмодовом (минимумы) режимах работы лазера. Наименьшее значение видности (равное 0,04) в двухмодовом режиме наблюдается в точке  $\Delta l = 8$  см, соответствующей перемещению отражающего объекта относительно его начального положения ( $\Delta l = 0$  см) на половину длины резонатора лазера. Обе кривые являются периодическими с периодом 16 см, который соответствует длине резонатора  $l$ .

Полученные экспериментальные кривые для видности (рис.2 и рис.3) качественно согласуются с теоретическими зависимостями [10, 12] (см. приведенную выше формулу (5) для видности  $V(L, l)$  в двухмодовом режиме).

Точность измерений расстояний и перемещений с помощью исследуемого метода зависит от стабильности оптической плотности среды, в которой распространяется лазерный пучок на измерительной трассе. Поэтому высокая



(интерференционная) точность измерений на километровых трассах возможна в стабильной среде подземного или вакуумированного плеча длиннобазового интерферометра [1, 6, 7], либо в условиях открытого космоса [3-5]. При этом точность измерений будет определяться стабильностью частоты (шириной линии) излучения применяемого лазера и точностью измерения частоты межмодовых биений при оптимальной настройке лазерного резонатора с использованием экстремальных значений видности интерференционной картины. Для достижения интерференционной точности измерения длины трассы протяженностью  $L$  требуется выполнение измерений частоты  $\Delta\nu$  межмодовых биений лазера с погрешностью [10]:

$$\delta(\Delta\nu) = c \delta l / (2 l L) \approx c \lambda / (2 l L). \quad (7)$$

Например, при длине интерферометра порядка 100 м [12] необходимая относительная погрешность измерения частоты составляет  $10^{-8}$ . При использовании существующих стандартных средств измерения частоты и времени с относительной точностью  $10^{-12}$  максимальная величина измеряемых расстояний может быть увеличена до  $10^5$  м. Для интерференционных измерений при таких разностях хода ширина линии оптического излучения должна быть не более 1 кГц, что обеспечивается применением стабильных промышленных He-Ne лазеров с внутренними зеркалами, устанавливаемых в термостатированных подземных помещениях, либо специализированных лазеров [5] с прецизионной фазовой синхронизацией частоты излучения, применяемых в геодезических орбитальных измерительных системах [3, 4].

## Заключение

В результате выполненной работы впервые экспериментально получены и проанализированы: а) зависимости видности интерференционной картины от изменения длины резонатора лазера для различных значений длины трехзеркального интерферометра (различных расстояний до внешнего отражателя); б) зависимости видности от расстояния до внешнего отражателя в характерных точках, определяемых соотношением между длиной резонатора

лазера и указанным расстоянием. Полученные зависимости нужны для оптимальной настройки частоты лазера при реализации высокоточных методов высокоточного измерения длины и перемещений.

Показано, что с помощью трехзеркального лазерного интерферометра-дальномера, работающего в двухмодовом режиме может быть достигнута интерференционная точность (доли длины волны) измерения длин и малых перемещений на расстояниях до  $10^5$  м. Полученные результаты позволят повысить точность существующих методов измерения длин и перемещений, что может быть использовано в различных прикладных и научных областях. С помощью такого инструмента возможен мониторинг характеристик объектов повышенной опасности, отслеживание как статических, так и динамических нагрузок в строительстве, инженерной геодезии и геофизике.

Среди таких задач: обеспечение безопасности при строительстве и эксплуатации высотных зданий, энергетических сооружений и плотин; эталонные измерительные комплексы для метрологического обеспечения навигационных спутниковых систем; поисковые исследования в области прогнозирования землетрясений и других стихийных бедствий.

Перспективным направлением возможного применения разрабатываемого инструмента являются космическая геодезия и гравитационно-волновая астрономия – создание особо точных орбитальных измерительных систем для изучения локальной структуры гравитационного поля Земли и обнаружения сверхнизкочастотных вариаций пространства-времени, приходящих из глубин нашей Вселенной.

В заключение авторы выражают благодарность Ю.Б. Минину за любезно предоставленные результаты теоретического расчета видности интерференционной картины.

**Финансирование:** Данное исследование проводится в рамках государственного задания ИРЭ РАН.

## Литература

1. Takemoto S., Momose H., Araya A., Morii W., Akamatsu J., Ohashi M., Takamori A., Miyoki S., Uchiyama T., Tatsumi D., Higashi T., Telada S., Fukuda Y. A 100 m laser strainmeter system in the Kamioka Mine, Japan, for precise observations of tidal strains. *Journal of Geodynamics*. 2006. V.41. P.23-29. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2005.08.009>
2. Николаев А.В., Луканенков А.В., Дубров М.Н. Новые возможности совместной обработки данных регистрации смещений и деформаций в поле сейсмической волны. *Доклады Академии наук*. 2010. Т.430. №6. С.816-819.
3. Dehne M., Guzman F., Sheard B., Heinzl G., Danzmann K. Laser interferometer for spaceborne mapping of the Earth's gravity field. *Journal of Physics: Conference Series*. 2009. V.154. P.012023. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/154/1/012023>
4. Nardello M., Lintz M., C. Buy. Scattering paths in test optical bench for LISA mission. *Frontiers in Optics 2020*. OSA Technical Digest. Washington DC. United States. 2020. <https://doi.org/10.1364/fio.2020.jtu1a.6>
5. Hechenblaikner G., Wand V., Kersten M., Danzmann K., Garcia A., Heinzl G., Nofrarias M., and Steier F. Digital laser frequency control and phase-stabilization loops in a high precision space-borne metrology system. *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 2011. V.47. P.651-660. <https://doi.org/10.1109/JQE.2011.2108637>
6. Александров Д.В., Дубров М.Н., Кравцов В.В. Изучение работы управляемых лазер-интерферометров на больших базах. *Нелинейный мир*. 2015. Т.13. №2. С.5-6.
7. Дубров М.Н. Лазерные интерферометры с оптической обратной связью. *IV Школа-семинар-выставка «Лазеры и современное приборостроение»* (Санкт-Петербург 30-31 октября 1995 г.). С-Петербург. 1996. С.16-17.
8. Bosch T., Servagent N., Donati S. Optical feedback interferometry for sensing application. *Optical Engineering*. 2001. V.40. №1. P.20-27. <https://doi.org/10.1117/1.1330701>
9. Александров Д.В., Дубров М.Н., Кравцов В.В. Лазерный интерферометр на основе частотно-фазовой модуляции. *Нелинейный мир*. 2019. Т.17. №1. С.5-7.

10. Минин Ю. Б., Крупник Е. С., Дубров М. Н. Прецизионный лазерно-интерферометрический измеритель расстояний и перемещений. *Известия вузов. Приборостроение*. 2018. Т.61. №10. С.892-896. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2018-61-10-892-896>
11. Александров Д.В., Дубров М.Н., Шатров А.Д. Особенности работы высокостабильных лазеров при подключении несогласованной оптической нагрузки. *Радиотехника и электроника*. 2011. Т.56. №9. С.1149-1152.
12. Minin I., Bulatov I., Korobov N., Dubrov M., Fedorov M. Investigation of High-Precision Laser Instrument for Distance and Displacement Measurements. *Frontiers in Optics + Laser Science 2021*, C. Mazzali, T. Poon, R. Averitt, and R. Kaindl, eds. Technical Digest Series (Optica Publishing Group). Washington, DC, USA. 2021. <https://doi.org/10.1364/FIO.2021.JTu1A.108>

**Для цитирования:**

Булатов И.С., Коробов Н.А., Александров Д.В., Дубров М.Н. Исследование характеристик видности интерференционной картины в трехзеркальном лазерном интерферометре-дальномере. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2022. №5. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.5.1>