

ПРЕЦИЗИОННЫЙ ЛАЗЕРНО-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ РАССТОЯНИЙ И ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Ю. Б. МИНИН^{1,2,3}, Е. С. КРУПНИК¹, М. Н. ДУБРОВ^{1,3}

¹Московский физико-технический институт, 141700, Долгопрудный, Московская обл., Россия

²Сколковский институт науки и технологий, 143026, Инновационный центр, Россия

³Фрязинский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 141190, Московская обл., Россия
E-mail: mnd139@ire216.msk.su

Рассмотрен способ выполнения высокоточных измерений расстояния до отражающего объекта. Предлагаемый принцип измерения объединяет радиотехнический метод определения расстояний и интерферометрический метод регистрации перемещений с использованием измерителя дробной доли интерференционной полосы. Предложена принципиальная схема лазерного радиоинтерферометрического измерителя. Экспериментально подтверждена возможность использования изменений длины резонатора лазера и видности интерференционной картины в точных дальномерных измерениях.

Ключевые слова: лазер, интерферометр, дальномер, гелий-неоновый лазер

В радиооптических измерителях расстояний — светодальномерах — используются источники и модуляторы света, управляемые радиосигналами. Расстояние определяется путем подсчета пространственных периодов огибающей амплитудной модуляции $\Lambda_0/2$ (Λ_0 — длина волны радиосигнала), которые укладываются на измеряемой дистанции. Например, при $\Lambda_0/2=10$ см может быть достигнута погрешность измерений не более 0,1—0,2 мм [1]. Примерно такую же точность обеспечивают фазовые методы измерения длины с использованием высокочастотной амплитудной модуляции зондирующего лазерного сигнала, в том числе в двухчастотных и трехчастотных дальномерах [2, 3]. Интерферометрические методы определения расстояний позволяют достичь точности в доли $\lambda/2$ (λ — длина волны лазерного излучения). Целью настоящей работы является создание устройства — дальномера, — объединяющего преимущества интерферометрического и радиооптического методов определения расстояний и перемещений.

Работа дальномера основывается на амплитудной модуляции лазерного излучения, вызванной наличием оптических мод. Их количество определяется параметрами лазера: длиной резонатора, свойствами активной среды, кривизной зеркал и др. [4, 5]. Лазер включен в схему оптического интерферометра, работающего на нескольких оптических частотах, для его настройки используется зависимость видности интерферограммы от соотношения измеряемой длины и длины резонатора, а также от соотношения амплитуд генерируемых мод. Частота модуляции может изменяться путем увеличения длины резонатора, например, при нагреве. Оптимальная точность достигается путем настройки на частоту, соответствующую минимуму видности V интерференционной картины:

$$V(l) \approx V_0 \frac{\sqrt{U_1^4 + U_2^4 + 2U_1^2 U_2^2 \cos(2\pi \Delta\nu l/c)}}{U_1^2 + U_2^2}, \quad (1)$$

где V_0 — видность в одномодовом режиме, U_1 и U_2 — амплитуды интерферирующих волн, l — оптическая разность хода, c — скорость света.

Для точных измерений в интерферометре находится целое число укладывающихся на измеряемой длине интерференционных полос, период которых равен $\lambda/2$, и дополнительно определяется доля интерференционной полосы.

В схеме устройства используется He—Ne-лазер, $\lambda=633$ нм, ширина доплеровского контура усиления $\Delta\nu_D=1,5$ ГГц (в пределах которого может располагаться несколько оптических мод в зависимости от длины резонатора лазера). Двухмодовый режим реализуется для лазеров с $L=10—20$ см. Изменение температуры резонатора приводит к изменению расположения оптических мод относительно доплеровского контура, а значит, и амплитуды каждой оптической моды.

Экспериментальное исследование элементов дальномера проводилось на установке, включающей трехзеркальный лазерный интерферометр, работающий на принципе оптической обратной связи (излучателем являлся лазер ОКГ-16) [6, 7], и гетеродинный фотоприемник, обеспечивающий измерение частоты межмодовых биений. Применение нестандартной схемы лазерного интерферометра с оптической обратной связью позволяет контролировать уровень отраженного и возвращающегося оптического сигнала, а также использовать возникающую низкочастотную модуляцию лазерного излучения для интерференционных измерений [8]. Видность интерференционной картины и частота межмодовых биений изменялись за счет увеличения длины резонатора при нагреве. Сигнал с фотоприемника поступал на осциллограф.

В результате анализа зарегистрированного сигнала получена зависимость видности интерферограммы от изменения длины ΔL резонатора лазера (рис. 1). При длине интерферометра ~ 1 м $V=0,02—0,14$. В точке минимума l_0 при $U_1 \approx U_2$ функция (1) имеет вид $k|l - l_0|$, коэффициент k зависит от амплитуд U_1 , U_2 и V_0 . Такое резкое изменение видности используется для оптимальной настройки частоты лазера при приблизительном измерении расстояния l .

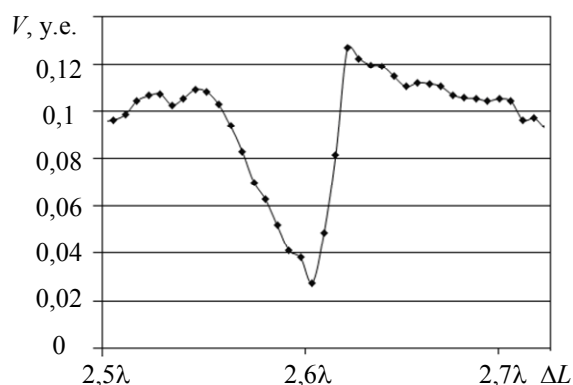


Рис. 1

Изменение частоты межмодовых биений в диапазоне 8,3—9,2 МГц имеет периодический характер, полный период изменения $\lambda/2 \approx 316,5$ нм, связанный с формой доплеровского контура [9] характер используется для управления расстоянием между частотами генерируемых мод.

Полученные результаты позволили разработать схему лазерного радиоинтерферометрического измерителя (рис. 2), состоящего из блока лазера (БЛ), блока третьего зеркала (БЗЗ), блока гетеродинного фотоприемника (БФПГ) и аналитического блока (АБ). Зеркала З1, З2 лазера формируют пучок, который через согласующий телескоп (СТ) поступает на подвижное зеркало З3, закрепленное на измеряемом объекте, и отражается обратно. З1, З2, З3 образуют трехзеркальный резонатор интерферометра, а СТ обеспечивает оптимальную расходимость лазерного пучка и соответственно — требуемую видность интерференционной картины при измеряемых расстояниях, существенно превышающих длину основного резонатора лазера. На выходе фотодиода (ФД) формируется интерференционный сигнал ch1 и сигнал ch2 меж-

модовых биений, которые с выхода БФПГ поступают на АБ. Микроконтроллер (МК) обрабатывает поступающие сигналы и управляет работой прибора. Если заданная точность измерений расстояний и перемещений $\lambda/2$, то требуются измерения частоты межмодовых биений с погрешностью не более:

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

Например, при длине интерферометра порядка 1 м относительная погрешность измерения частоты составляет 10^{-6} . Для более точных измерений расстояний определяется, например, с помощью устройства [6] доля интерференционной полосы. При увеличении измеряемой длины до 100 м [8] погрешность измерения частоты не должна превышать 10^{-8} , что обеспечивается введением в разработанную схему радиоинтерферометрического измерителя дополнительного устройства, а именно — усилителя-ограничителя, подавляющего нестабильности преобразованного оптического сигнала обратной связи на входе частотомера ЧЗ-34 (рис. 2).

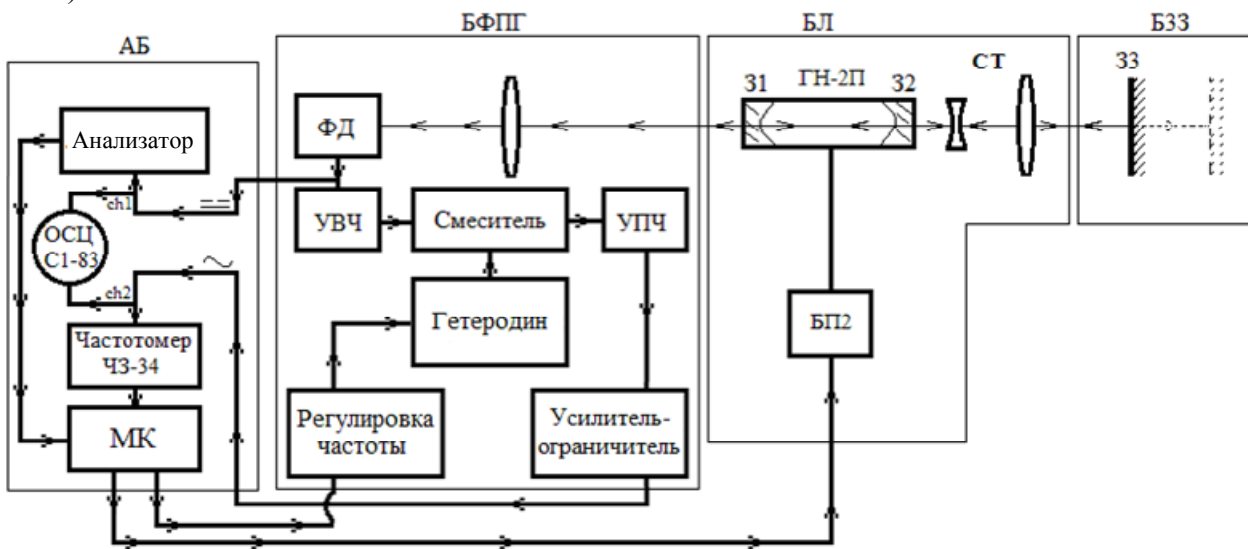


Рис. 2

По этой схеме может быть разработан прецизионный прибор для измерения деформаций земной поверхности в стабильных условиях подземного [8] или вакуумированного [10] плеча длиннобазового интерферометра с требуемой относительной точностью измерений на 1—2 порядка выше. Предложенный подход может быть развит с целью повышения точности комбинированных орбитальных высокоточных средств измерения расстояний [3], в частности, в условиях открытого космоса [11].

В работе предложен способ высокоточного измерения расстояния до отражающего объекта, объединяющий радиотехнический метод определения расстояний и интерферометрический метод регистрации перемещений с использованием измерителя дробной доли интерференционной полосы. Экспериментально подтверждена возможность использования измененной длины резонатора лазера и видности интерференционной картины в точных дальномерных измерениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилов Е. А., Кочегаров И. И., Фильчиков Р. С. Анализ методов лазерной дальнометрии высокой точности // Университетское образование (МКУО-2015). Пенза, 2015. С. 111—113.
2. Оуэнс Д. Лазеры в метрологии и геодезии // Применения лазеров / Пер. с англ. под ред. В. П. Тычинского. М.: Мир, 1974. С. 85—181.

3. Прилепин М. Т., Андреев В. Ю., Григорьевский В. И., Садовников В. П., Хабаров В. В. Погрешности измерения расстояний лазерными спутниковыми дальномерами, обусловленные рефракционными свойствами атмосферы при наличии фазовой неоднородности в пучке лазера // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54, № 1. С. 78—80.
4. Ярив А. Квантовая электроника / Пер. с англ. под ред. Я. И. Ханина. М.: Сов. радио, 1980. 498 с.
5. Дубров М. Н. Длиннобазовая лазерная интерферометрия: учет обратного рассеяния. М.: МФТИ, 2011. 20 с.
6. Dubrov M. N. Laser Feedback and New Principle of Heterodyne Interferometry // Proc. of the 8th Intern. Conf. on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling. June 29—July 1, 2006. P. 92—95. DOI: 10.1109/LFNM.2006.251989
7. Donati S., Taghi Fathi M. Transition from Short-to-Long Cavity and from Self-Mixing to Chaos in a Delayed Optical Feedback Laser // IEEE J. of Quantum Electronics. 2012. Vol. 48, N 10. P. 1352—1359.
8. Шатров А. Д., Дубров М. Н., Александров Д. В. Исследование электродинамической системы, состоящей из лазерного резонатора и внешнего слабо отражающего элемента // Квантовая электроника. 2016. Т. 46, № 12. С. 1159—1162. DOI: 10.1070/QEL16176
9. Лэмб У. Квантовая оптика и квантовая радиофизика. М.: Мир, 1966. 452 с.
10. Agnew D. C., Wyatt F. K. Long-base laser strainmeters: a review. SIO Technical Report 2, Web Access: Scripps Institution of Oceanography, 2003 [Электронный ресурс]: <<http://repositories.cdlib.org/sio/techreport/2/>>.
11. Yu Y., Mitryk S., Mueller G. Experimental validation of dual/modified dual arm locking for LISA // Classical and Quantum Gravity. 2011. Vol. 28, N 9. P. 094009 [Электронный ресурс]: <<http://iopscience.iop.org/0264-9381/28/9/094009>>.

Сведения об авторах

- Юрий Борисович Минин** — студент, инженер; Московский физико-технический институт, Факультет физической и квантовой электроники; Сколковский институт науки и технологий, Центр вычислительной и ресурсоемкой науки и техники; Фрязинский филиал ИПЭ им. В.А. Котельникова РАН, Лаборатория электродинамики искусственных сред и структур; E-mail: yurii.minin@phystech.edu
- Екатерина Сергеевна Крупник** — студентка; Московский физико-технический институт, Факультет инновационных и вычислительных технологий; E-mail: krupnik.es@phystech.edu
- Мстислав Николаевич Дубров** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Фрязинский филиал ИПЭ им. В.А. Котельникова РАН, Лаборатория электродинамики искусственных сред и структур, вед. науч. сотрудник; Московский физико-технический институт, Кафедра радиоэлектроники и прикладной информатики; E-mail: mnd139@ire216.msk.su

Поступила в редакцию
г.

Ссылка для цитирования: Минин Ю. Б., Крупник Е. С., Дубров М. Н. Прецизионный лазерно-интерферометрический измеритель расстояний и перемещений // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 10. С. 892—896.

**ПРЕЦИЗИОННЫЙ ЛАЗЕРНО-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ
РАССТОЯНИЙ И ПЕРЕМЕЩЕНИЙ**

Ю. Б. Минин^{1,2,3}, Е. С. Крупник¹, М. Н. Дубров^{1,3}

¹Московский физико-технический институт, 141700, Долгопрудный, Московская обл., Россия

²Сколковский институт науки и технологий, 143026, Инновационный центр, Россия

³Фрязинский филиал ИПЭ им. В.А. Котельникова РАН, 141190, Московская обл., Россия
E-mail: mnd139@ire216.msk.su

Рассмотрен способ выполнения высокоточных измерений расстояния до отражающего объекта. Предлагаемый принцип измерения объединяет радиотехнический метод определения расстояний и интерферометрический метод регистрации перемещений с использованием измерителя дробной доли интерференционной полосы. Предложена принципиальная схема лазерного радиоинтерферометрического измерителя. Экспериментально подтверждена возможность использования изменений длины резонатора лазера и видности интерференционной картины в точных дальномерных измерениях.

Keywords: лазер, интерферометр, дальномер, гелий-неоновый лазер

REFERENCES

1. Danilov E.A., Kochegarov I.I., Fil'chikov R.S. *Universitetskoye obrazovaniye (MKUO-2015)* (University Education (ICUO-2015)), Penza, 2015, pp. 111–113. (in Russ.)
2. Owens J.C. *Laser Applications in Metrology and Geodesy*, Published by Ross M., Academic Press, NY, London, 1971.
3. Prilepin M.T., Andreyev V.Yu., Grigor'yevskiy V.I., Sadovnikov V.P., Khabarov V.V. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2009, no. 1(54), pp. 78–80. (in Russ.)
4. Yariv A. *Quantum Electronics*, John Wiley & Sons, 1989, 693 p.
5. Dubrov M.N. *Dlinnobazovaya lazernaya interferometriya: uchet obratnogo rasseyaniya* (Long-Base Laser Interferometry: Backscatter Accounting), Moscow, 2011, 20 p. (in Russ.)
6. Dubrov M.N. *Proceedings of the 8th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling*, 29 June –1 July 2006, pp. 92–95. DOI: 10.1109/LFNM.2006.251989
7. Donati S., Taghi Fathi M. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, no. 10(48), pp. 1352–1359.
8. Shatrov A.D., Dubrov M.N., Aleksandrov D.V. *Quantum Electronics*, 2016, no. 12(46), pp. 1159–1162. DOI: 10.1070/QEL16176
9. *Quantum optics and electronics*, NY, London, Paris, 1965.
10. Agnew D.C., Wyatt F.K. *Long-base laser strainmeters: a review*, SIO Technical Report 2, Web Access: Scripps Institution of Oceanography, 2003, <http://repositories.cdlib.org/sio/techreport/2/>.
11. Yu Y., Mitryk S, Mueller G. *Classical and Quantum Gravity*, 2011, no. 9(28), pp. 094009. <http://iopscience.iop.org/0264-9381/28/9/094009>.

Data on authors

- Юрий Б. Минин** — студент, инженер; Московский физико-технический институт, Факультет физической и квантовой электроники; Сколковский институт науки и технологий, Центр вычислительной и ресурсоемкой науки и техники; Фрязинский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Лаборатория электродинамики искусственных сред и структур; E-mail: yurii.minin@phystech.edu
- Екатерина С. Крупник** — студентка; Московский физико-технический институт, Факультет инновационных и вычислительных технологий; E-mail: krupnik.es@phystech.edu
- Мстислав Н. Дубров** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Фрязинский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Лаборатория электродинамики искусственных сред и структур, вед. науч. сотрудник; Московский физико-технический институт, Кафедра радиоэлектроники и прикладной информатики; E-mail: mnd139@ire216.msk.su

For citation: Минин Ю. Б., Крупник Е. С., Дубров М. Н. Прецизионный лазерно-интерферометрический измеритель расстояний и перемещений. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 10. P. 892–896 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-10-892-896