

УДК 531.715.1

Исследование лазерного инструмента для высокоточного измерения длины и перемещений

И.С. Булатов¹, Н.А. Коробов¹, Ю.Б. Минин^{1,2,3}, М.Н. Дубров^{1,3}, М.В. Федоров²

¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) ²Сколковский институт науки и технологий

³Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Высокоточные измерения больших длин важны для детализации гравитационного поля и сейсмичности Земли, а также для создания прототипа космической антенны для детектирования гравитационных волн [1, 2]. В таких измерениях используются стабильные перестраиваемые лазеры с возможностью точного регулирования частоты излучения [3]. Известные высокоточные измерительные приборы и установки основаны либо на радиооптическом (модуляционном), либо на интерферометрическом методе определения расстояний.

Предлагаемое устройство повышает точность измерений в различных областях. Например, при его использовании точность выше для таких действий, как мониторинг строительной устойчивости высотных зданий; разведка природных ресурсов (например, сейсмоакустический каротаж); прогнозирование стихийных бедствий; и обнаружение гравитационных волн.

В данной работе мы исследуем предлагаемый способ и устройство для высокоточного измерения расстояний и перемещений [4], сочетающий в себе преимущества лазерно-интерферометрического и радиооптического методов измерений. Научная новизна метода заключается в объединении преимуществ радиооптического и интерферометрического методов определения расстояний и перемещений, а именно таких преимуществ, как: интерференционная точность (доли длины волны), малогабаритность (нет необходимости в перемещении каких-либо внешних зеркал по всей измерительной базе) и возможность измерять как на коротких ($\sim 10^{-2}$ м), так и на больших ($\sim 10^4$ м) расстояниях. Это означает, что предлагаемое устройство [5] не потребует перемещения какого-либо громоздкого оборудования (обеспечивающего точное перемещение зеркала) и будет обладать точностью измерения расстояния до отражающего объекта порядка точности интерферометра. Предлагаемое устройство использует амплитудную модуляцию излучения при генерации оптических мод, количество которых задается параметрами He-Ne-лазера. Кроме того, в предлагаемом устройстве используется управление видностью интерференционной картины путем регулировки оптических режимов лазерного резонатора с помощью точного изменения длины резонатора. Характерное измеряемое расстояние находится в диапазоне порядка от 1 см до 100 км (практическая реализация составляет 100 м).

Полученные формулы

$$V_1 = \frac{2\sqrt{\delta_1}}{1 + \delta_1}; V_2(\ell, L) = \frac{\sqrt{1 + \delta_2^2 + 2\delta_2 \cos\left(\frac{4\pi\Delta\nu(L)\ell}{c}\right)}}{1 + \delta_2}; V(\ell, L) = V_1 V_2(\ell, L)$$

описывают зависимость видности $V(\ell, L)$ (одномодовый и двухмодовый режим лазера) от геометрического расстояния между лазером и третьим зеркалом ℓ , от частоты межмодовых биений $\Delta\nu(L)$ и от соотношений интенсивностей δ_1 (световые лучи одной моды) и δ_2 (световые лучи двух мод). Таким образом, при синфазной интерференции ($\ell = Lw$, где w – целое число, L – длина резонатора лазера) световых волн двух мод результирующая видность будет: $V(\ell, L) \approx V_1$, где V – видность интерференционной картины, сформированной одномодовым режимом.

Эксперименты проводились с использованием в качестве источника излучения лазера ОКГ-16 (длина резонатора $L=16$ см) в схеме трехзеркального интерферометра. Видность измерялась при изменении положения отражающего объекта ℓ и изменении длины резонатора L . Зависимости видностей $V(\ell = 4 \text{ см}, L)$, $V(\ell = 8 \text{ см}, L)$, $V(\ell = 12 \text{ см}, L)$ от времени самонагрева (увеличение длины резонатора)

лазера представлены (рис. 1a, b, c) при положениях отражающего объекта на расстояниях от лазера ℓ 4 см, 8 см, 12 см соответственно. Данные кривые описывают периодическое изменение значений видности со временем из-за изменения длины резонатора L лазера при самонагреве лазера. На кривой видности $V(\ell = 8 \text{ см}, L)$ получены наиболее (по сравнению с другими кривыми) резкие изменения

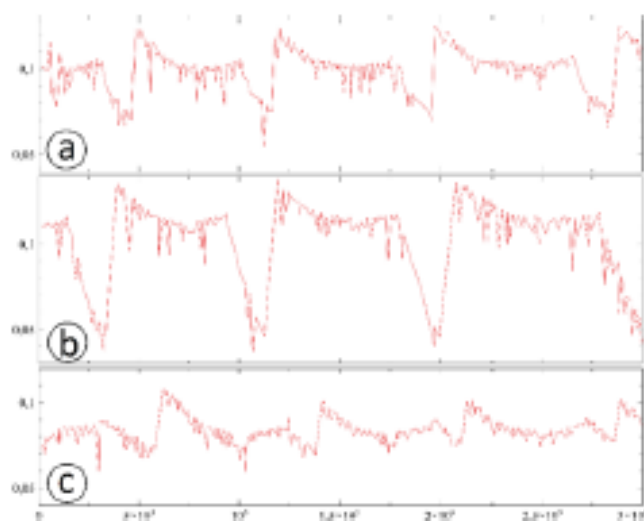


Рис. 1. Зависимость видности от времени

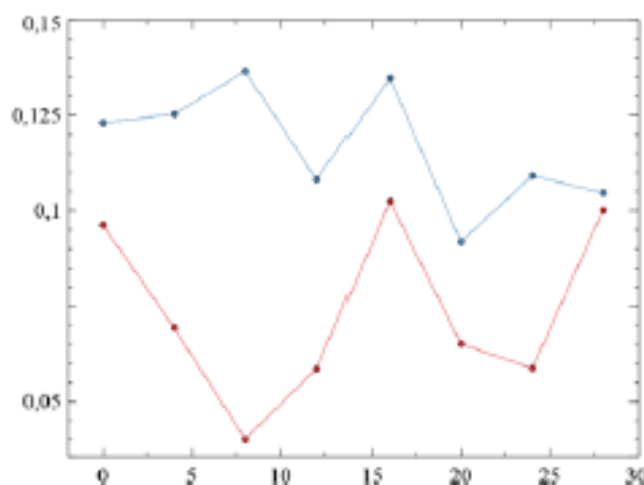


Рис. 2. Зависимость видности от расстояния (в сантиметрах) до отражающего объекта

видности вблизи (двухмодовый режим лазера) минимумов ($\approx 35 \text{ с}$, $\approx 110 \text{ с}$, $\approx 200 \text{ с}$). Кроме того, на каждой кривой видностей наблюдается периодичность участка, где градиент видности почти не меняется. Например, на кривой видностей $V(\ell=8 \text{ см}, L)$ малозначительные (по сравнению с областями в окрестности минимумов) изменения видности наблюдаются на таких участках, как 40–90 с, 120–180 с, 212–280 с (одномодовый режим лазера). Это связано с изменением режима лазера. Режим лазера периодически меняется между двухмодовым и одномодовым в связи с тем, что позиции m -й и $(m+1)$ -й мод (m -я мода $\nu_m = cm/(2L)$) сдвигаются по оси оптических частот влево относительно доплеровского контура усиления (ширина равна 1.5 ГГц) He-Ne-лазера при увеличении длины резонатора L , а величина межмодовых биений для лазера ОКГ-16 $\Delta\nu = c/(2L)$ составляет $\approx 0.94 \text{ ГГц}$ [6].

На рис. 2 изображены две кривые зависимостей экстремальных значений видности $V(\ell, L)$ от расстояния до отражающего объекта ℓ . Верхняя (нижняя) кривая – это совокупность периодичных во времени значений глобальных (минимумов) кривых видностей, изображенных на рис. 1. Данные экстремумы описывают характерные значения видностей при одномодовом (максимумы) и двухмодовом (минимумы) режимах. Наименьшее значение видности (равное 0.04) в двухмодовом режиме наблюда-

ется в точке 8 см, что соответствует половине длины резонатора лазера. Обе кривые являются периодическими с периодом 16 см, соответствующим длине резонатора L . Полученная экспериментальная зависимость видности соответствует выведенной теоретически (см. приведенную выше формулу для видности $V(\ell, L)$).

Разрабатываемые нами методы могут быть востребованы для обеспечения безопасности энергетических сооружений (плотин, ГЭС, фундаментов АЭС) и для строительства высотных зданий, особенно в сейсмически активных регионах (Камчатка, Япония, Кавказ, Филиппины, Малайзия и т.д.). Кроме того, интерферометрическая точность предлагаемого прибора может быть использована при выполнении сейсмического мониторинга и для обнаружения предвестников землетрясений в виде аномальных, зачастую весьма слабых движений земной поверхности.

Данная работа была проведена в рамках государственного задания 0030-2019-0014.

Литература

1. *Barish B. C., Weiss R.* LIGO and the detection of gravitational waves // *Phys. Today* 52. 1999. P. 44–50.
2. *Bortoluzzi D., Lio M. D., Oboe R., Vitale S.* Spacecraft high precision optimized control for free-falling test mass-tracking in LISA-pathfinder mission // *The 8th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*. 2004. AMC '04. P. 553–558.
3. *Hechenblaikner G., Wand V., Kersten M., Danzmann K., Garcia A., Heinzel G., Nofrarias M., Steier F.* Digital laser frequency control and phase-stabilization loops in a high precision space-borne metrology system // *IEEE J. Quantum Electron.* 2011. 47. P. 651–660.
4. *Минин Ю. Б., Дубров М. Н., Шевченко В. М.* Метод и устройство для лазерно-интерференционного измерения расстояний и перемещений // Патент РФ № 2721667, 21 мая 2020.
5. *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.
6. *Яриш А.* Квантовая электроника и нелинейная оптика. Москва : Сов. Радио, 1980. 488 с.

УДК 53.06: 004.056.53

Противодействие несанкционированному доступу к сетевому трафику в ВОЛС при помощи снятия оптического излучения на оболочке волокна при микроизгибе

М.А. Гаманова, Д.С. Клюев, А.О. Фролов

ФГБОУ ВО Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики

При формировании модели угроз для аттестуемых систем особое внимание уделяется проверке возможности реализации угроз из банка данных угроз Федеральной службы по техническому и экспортному контролю (далее – БДУ). В данной работе будет рассмотрена возможность реализации угрозы безопасности информации (далее – УБИ) 116 из БДУ в волоконно-оптических линиях связи (далее – ВОЛС) и способы противодействия данной угрозе.

Суть УБИ.116 заключается в угрозе в возможности перехвата осуществления несанкционированного доступа к сетевому трафику, передаваемому по вычислительной сети. ВОЛС с каждым днем набирают все большую популярность как среда передачи данных. Многие интернет провайдеры уже заменили витую пару, приходящую в каждый дом, оптоволоком. Следовательно, разработка способов защиты от несанкционированного доступа к сетевому трафику, передаваемому по ВОЛС, является актуальным.

Одним из вариантов съема информации с волоконно-оптической линии связи (далее – ВОЛС) основан на снятии оптического излучения, которое проникает через оболочку оптоволокну, при очень маленьком резком изгибе (микроизгибе). Пример такого микроизгиба представлен на рис. 1.

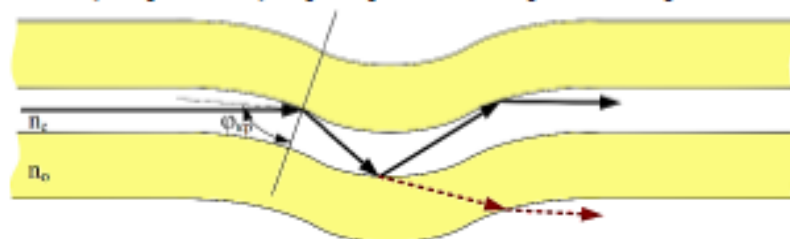


Рис. 1. Потери оптического излучения за счет микроизгиба