

УДК 528.514

А.М. Воликова, Н.Н. Смолянинов, И.А. Лобач, С.И. КаблуковИнститут автоматизации и электрометрии
Сибирского отделения РАН, Новосибирск, Россия**ДАЛЬНОМЕР НА ОСНОВЕ ИТТЕРБИЕВОГО ВОЛОКОННОГО
ЛАЗЕРА С САМОСКАНИРОВАНИЕМ ДЛИНЫ ВОЛНЫ**

Представлен высокоразрешающий дальномер на основе иттербиевого волоконного лазера с самосканированием длины волны. С помощью дальномера демонстрируется возможность измерения расстояния до ~11 м с пространственным разрешением не хуже ~0,4 мм. Показано, что представленный дальномер имеет высокую чувствительность к вибрациям в измерительном канале.

Ключевые слова: дальномер, волоконный лазер, сканирование длины волны.

A.M. Volikova, N.N. Smolyaninov, I.A. Lobach, S.I. KablukovInstitute of Automation and Electrometry of the Siberia Branch of the Russian
Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation**RANGEFINDER BASED ON SELF-SWEEPING
YB-DOPED FIBER LASER**

In this paper a high-resolution rangefinder based on an ytterbium doped self-sweeping fiber laser is presented. The presented rangefinder demonstrates the ability to measure distances up to ~11 m with a spatial resolution of no worse than ~0.4 mm. It is shown that the presented rangefinder has high sensitivity to vibrations in the measuring channel.

Keywords: rangefinder, fiber laser, wavelength scanning.

Введение

Лазерные дальномеры находят свое применение как для военных, так и для гражданских целей (например, геодезия, топографическая съемка, навигация, и т.д.). По технике измерений различают геометрический и рефлектометрический методы [1, 2]. В первом методе расстояние до цели вычисляется по измерению угла в треугольнике «источник – объект – приемник», в котором источник зондирующего излучения и детектор разнесены друг относительно друга на известное расстояние. Во втором – регистрируется различие между отправляемым сигналом и его эхом, рассеянным от измеряемого объекта. Этот метод подразделяют на импульсный, фазовый и интерференционный [1, 2]. Импульсный

дальномер работает по принципу регистрации эха. Он широко используется для измерения больших расстояний, однако при измерении расстояний с субмиллиметровым разрешением ставит высокие требования к быстродействию электроники. В фазовом дальномере модулируется огибающая интенсивности зондирующего излучения по гармоническому закону. Огибающая интенсивности рассеянного объектом излучения приобретает сдвиг фазы относительно зондирующего сигнала, который пропорционален временной задержке. Фазовые дальномеры имеют высокое пространственное разрешение. Для устранения неоднозначности при определении целого числа длин волн в фазовой задержке измерения расстояния осуществляют последовательно для нескольких частот модуляции огибающей интенсивности. Принцип действия интерференционных дальномеров основан на анализе интерференции измерительного и опорного сигналов. Интерференционные лазерные дальномеры отличаются не очень большой дальностью измерения при высоком пространственном разрешении, которое может составлять менее 1 мкм. Все та же неоднозначность в целом числе длин волн, но уже не в модуляции огибающей, а в самом оптическом сигнале приводит к тому, что такие дальномеры при дальности до объекта ~50 м используются не столько для измерения самого расстояния до объекта, сколько для регистрации перемещений объекта на скоростях от 1 до 7 мм/с [1]. В последнее время получил популярность метод автодинной интерферометрии [3–6] (в англоязычной литературе *self-mixing interferometry*), при котором рассеянный от объекта свет повторно входит в резонатор и оказывает влияние на мощность генерации самого зондирующего лазера. Здесь влияние рассеянного излучения также периодически зависит от фазовой задержки, и для определения расстояния используют перестройку частоты зондирующего лазера.

Среди интерференционных дальномеров можно также отметить сканирующие по частоте дальномеры на основе перестраиваемых лазеров [7] (в англоязычной литературе *frequency-modulated-continuous-wave, FMCW*). В этом случае отраженное от объекта излучение было сгенерировано в более ранний период и поэтому имеет другую частоту в сравнении с непрерывно перестраиваемым лазером. Частота биений двух сигналов пропорциональна скорости сканирования и времени задержки при прохождении света до объекта и обратно. Для этого подхода требуется относительно небольшой

диапазон сканирования лазера (может составлять несколько ГГц), так как разность частот измеряется с помощью обычного фотодетектора. В работе [8] сообщается о высокоточной системе измерения дальности с использованием прямой модуляции недорогого коммерческого вертикально-излучающего лазерного VCSEL-диода. Пространственное разрешение такого дальномера составило 0,36 мм на расстоянии 2 м. В работе [9] продемонстрирован компактный дальномер на аналогичном принципе работы на основе кремниевого фотонного чипа с использованием оптических фазированных решеток для управления лучом. Помимо измерения расстояния в диапазоне 2 м и с пространственным разрешением 20 мм предложенная схема позволила также измерять скорость объекта.

Ключевым элементом в рассмотренном подходе является перестраиваемый лазер. Как правило, для перестройки оптической частоты используют дорогостоящие перестраиваемые фильтры. Также стоит отметить, что в дальномере на основе перестраиваемого лазера особое внимание должно быть уделено линейности перестройки или системам калибровки перестройки частоты. Более простой альтернативой классическим перестраиваемым лазерам может быть волоконный лазер с самосканированием длины волны [10]. Помимо простой конструкции схемы из-за отсутствия внешних перестраиваемых фильтров лазеры с самосканированием длины волны обладают высокой линейностью перестройки лазерной частоты. Это связано с тем, что лазерная частота может принимать только дискретные значения, определяемые длиной резонатора. Подобные источники уже себя зарекомендовали для опроса волоконных датчиков [11, 12], измерения оптических спектров [13] и характеристики спектральных свойств оптических элементов [14, 15]. Исходя из положительных свойств самосканирующего лазера, вполне ожидаемо, что он может быть использован в задаче измерения расстояний. В работе представлены первые результаты по созданию лазерного интерферометрического дальномера на основе волоконного самосканирующего лазера. Принцип работы дальномера основан на зависимости частоты модуляции сигнала интерференции от измеряемого до объекта расстояния. В частотности, показана возможность измерения расстояния до ~11 м с пространственным разрешением не хуже ~0,4 мм. Показано влияние вибраций объекта на результаты измерений.

Экспериментальная установка и методика измерений

Ключевым элементом предлагаемого лазерного дальномера является волоконный иттербиевый лазер с самосканированием длины волны [10]. Схема самого лазера аналогична схеме из работы [12]. Лазер генерирует последовательность микросекундных импульсов, каждый из которых состоит из одной продольной моды [12]. С каждым новым импульсом оптическая частота уменьшается строго на частоту межмодовых биений резонатора ($\delta\nu \sim 5,5$ МГц). По этой причине можно говорить о строгой линейности частоты в зависимости от номера импульса. Выходные параметры лазера, используемого в эксперименте: область сканирования 1057 – 1076 нм, частота повторения импульсов $\nu_{rep} \sim 45$ кГц, длительность импульсов 3,4 мкс, спектральная ширина импульса не более 1 МГц, средняя мощность 28 мВт.

Оптическая схема предлагаемого дальномера приведена на рис. 1. В схеме все элементы основаны на волокне с сохранением поляризации. На выходе лазера установлен изолятор с дополнительным контрольным портом, в котором измерялся опорный сигнал для нормировки мощности. Расстояние до мишени измерялось с помощью интерферометра Маха – Цендера, образованного из двух волоконных разветвителей 10/90 (№ 1 и 3). В одном из плечей интерферометра (измерительное) вставлены волоконный разветвитель 50/50 №4 и коллиматор (F220APC-1064, Thorlabs с эффективным фокусным расстоянием асферической линзы 11 мм) для вывода излучения из волоконной части интерферометра и заведения рассеянного излучения обратно. Между коллиматором и мишенью свет распространяется по воздуху. На выходном разветвителе №3 интерферометра формируется интерференция за счет смещения сигнала лазера с его копией, отраженной от исследуемой мишени. Дополнительный волоконный разветвитель 5/95 (№ 2) используется для уменьшения мощности и улучшения контраста интерференционной картины. Опорный и интерференционный сигналы регистрировались двумя быстрыми InGaAs фотодетекторами ФД1 и ФД2 соответственно с полосой пропускания ~ 1 ГГц. Каждое измерение расстояния проводилось в течение 10 с.

Сигнал на выходе интерферометра состоит из импульсов, амплитуда которых изменяется с длиной волны излучения в результате ин-

терференции по гармоническому закону. Период амплитудной модуляции хранит информацию о местоположении мишени.

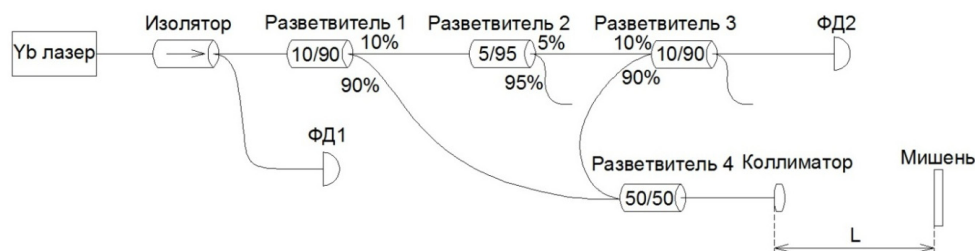


Рис. 1. Оптическая схема дальномера на основе иттербиевого волоконного лазера с самосканированием длины волны

В случае линейного изменения оптической частоты лазера со скоростью V сигнал интерференции будет иметь модуляцию во времени с частотой: $\nu_i = \frac{V}{\Delta\nu_i}$, где $\Delta\nu_i = c/2dL$ – область свободной дисперсии (ОСД)

интерферометра Маха – Цендера, dL – расстояние от мишени до точки, в которой плечи интерферометра выровнены. Множитель 2 в знаменателе ОСД интерферометра Маха – Цендера $\Delta\nu_i$ соответствует двукратному (в прямом и обратном направлении) прохождению расстояния сигналом в промежутке от разветвителя 50/50 до мишени. В случае лазера с самосканированием длины волны скорость сканирования имеет вид: $V = \delta\nu \Delta\nu_{rep}$. Таким образом, измеряемое расстояние связано с частотой модуляции интерференционного сигнала следующим образом:

$$dL = \frac{c}{2\delta\nu} \frac{\nu_i}{\nu_{rep}}. \quad (1)$$

Из выражения можно установить, что максимальное расстояние, на которое может быть удалена мишень, определяется межмодовой частотой используемого лазера и определяется как $L_{max} = \frac{c}{4\delta\nu} = 13,6$ м. Это условие является следствием теоремы Котельникова: для корректного восстановления частоты осцилляций интерферограммы ν_i (которая в нашем случае пропорциональна длине dL) период модуляции $1/\nu_i$ должен быть, по крайней мере, в 2 раза больше шага регистрации $\nu_i \leq \nu_{rep}/2$.

Одним из недостатков лазера с самосканированием частоты является флуктуация частоты повторения импульсов. Это приводит к тому, что частота осцилляций интерферограммы также непостоянна во времени. Однако стоит отметить, что несмотря на это, лазер имеет высокую линейность в зависимости от номера импульса. Для компенсации указанных флуктуаций сигнал интерференции переводился из временной шкалы в частотную. Для этого строилась зависимость амплитуды сигнала интерференции от номера импульса, каждый из которых соответствует одной оптической частоте. Кроме того, шаг в частотной области от импульса к импульсу фиксирован, и частота лазера изменяется на значение межмодовых биений. Восстановление частоты осуществлялось путем умножения номера импульса i на межмодовую частоту лазера: $\nu_i = i \cdot \delta\nu$. Поимпульсная нормировка выходного интерференционного сигнала с ФД2 на входной опорный с ФД1 производилась на микроконтроллере с последующей обработкой сигнала на ПК. Более подробное описание работы модуля можно найти в [16].

К сигналу интерференции было применено быстрое преобразование Фурье, в результате чего получалась рефлектограмма. Пространственная координата отражения от мишени пропорциональна частотной координате максимума в рефлектограмме. Другими словами, каждый пик в рефлектограмме соответствует какому-либо отражению в измеряемой линии. Отметим, что использование интерферометра Маха – Цендера и последующая процедура обработки с помощью преобразования Фурье являются достаточно стандартными (см., например, [8]). Разрешение при использовании такой методики ограничено диапазоном сканирования перестраиваемого лазера. В нашем случае время измерения 10 с соответствовало диапазону сканирования 10 нм. Точность измерения может быть существенно повышена при использовании интерполяции измеренных величин и калибровки измерений по известным длинам [8], но в нашей работе мы ограничились демонстрацией достигнутого разрешения.

Результаты эксперимента

Для проверки работоспособности предложенной схемы измерялось расстояние до мишени. В качестве мишени была выбрана

стандартная микроподвижка со шлифованной черненой алюминиевой поверхностью. Измерения рефлектограмм проводились при разных дистанциях до мишени вплоть до максимального расстояния. Для увеличения оптического пути использовался набор поворотных зеркал. На рис. 2, *а* представлены примеры рефлектограмм при разных расстояниях до мишени.

На рис. 2 приведена оптическая длина. В случае волокна геометрическая длина на рефлектограмме в $n = 1,45$ раз меньше, где n – показатель преломления. Первый пик на расстоянии 1,4 м соответствует отражению от FC/APC коннектора, вставленного в коллиматор (см. рис. 2, *б*). Как результат, для данной конфигурации длин плеч в интерферометре максимальная длина воздушной линии оценивается как $13,6 - 1,4 = 12,2$ м. Отсюда можно оценить, что разность плеч интерферометра в точке нахождения коллиматора равна $\sim 1,4/n = 0,97$ м. По сути, эта величина определяет начало координат воздушной линии, где находится мишень. Это значение может быть уменьшено вплоть до нуля за счет добавления дополнительного волокна в опорное плечо интерферометра. Расстояния от коннектора до мишени указаны рядом со стрелками на рис. 2, *а*. Дополнительные, не отмеченные пики соответствуют отражениям от поворотных зеркал. Можно заметить, что с увеличением расстояния от коннектора до мишени с 1,72 до 11,06 м наблюдается уменьшение амплитуды пика рассеяния и увеличение его пространственной ширины с 0,16 до 0,4 мм соответственно. Также в ходе исследования было обнаружено, что вид пиков в рефлектограмме зависит от расположения мишени. Такое поведение связано с увеличением размера пучка, дрожанием оптических элементов и неоднородностью рассеивающей поверхности.

Во время предварительных измерений мы пробовали увеличивать расстояние, размещая лазер с интерферометром и мишень на разных оптических столах. Было установлено, что при размещении элементов оптической схемы на одном оптическом столе пик остается узким, его ширина составляет доли миллиметра (рис. 3, *а*). Однако при перемещении мишени всего на ~ 26 см на соседний оптический стол наблюдается «развал» пика (рис. 3, *б*), т.е. происходит уширение резонанса, уменьшение его амплитуды и появление дополнительных пиков. Данный результат подтверждает гипотезу, что измеряемый сигнал имеет высокую чувствительность к вибрационным возмущениям.

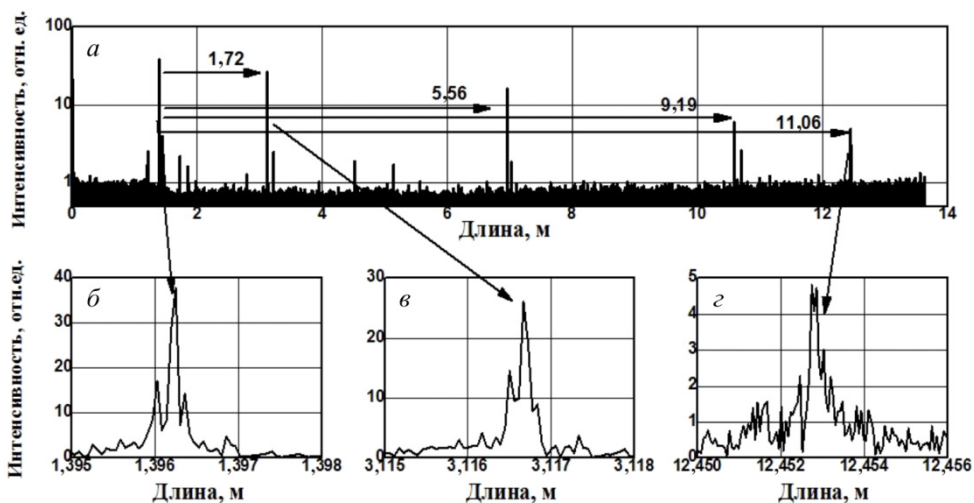


Рис. 2. Серия рефлектограмм для расстояний до мишени 1,72, 5,56, 9,19 и 11,06 м (а), отражение от FC/APC коннектора (б), пики рассеяния от мишени, соответствующие расстояниям 1,72 и 11,06 м соответственно (в, з)

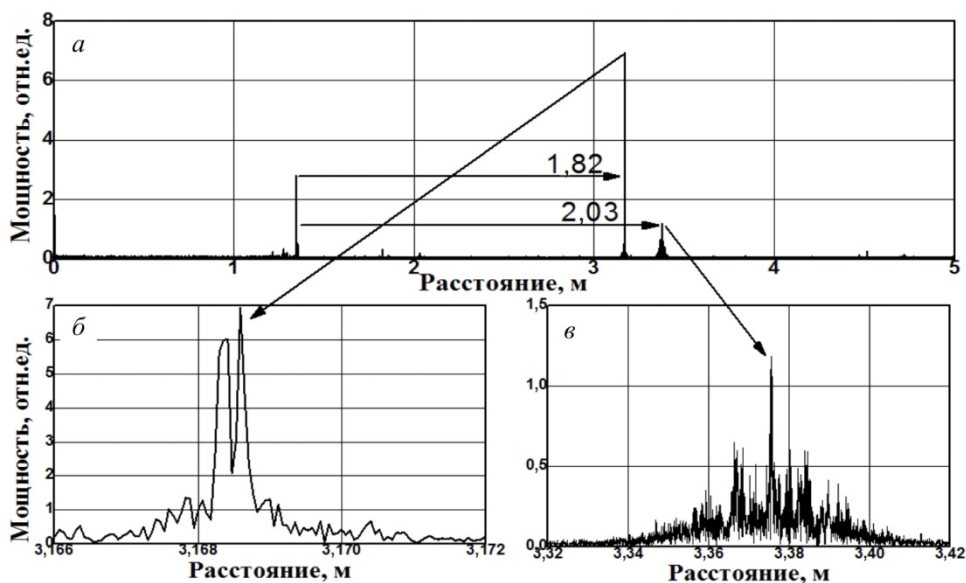


Рис. 3. Рефлектограммы линии с различным размещением мишени (а); расположение элементов оптической схемы (б) на одном, (в) на разных оптических столах

Заключение

В работе представлены первые результаты интерференционного дальномера на основе иттербиевого волоконного лазера с самосканированием длины волны, суть которого основана на когерентной частотной рефлектометрии [12], применяемой для диагностики волоконных линий. Достоинством предлагаемого дальномера является возможность получения высокого пространственного разрешения. Нами экспериментально продемонстрирована возможность измерения расстояний до ~11 м с пространственным разрешением ~0,4 мм при времени измерения 10 с (диапазон сканирования ~10 нм). При уменьшении времени измерения уменьшается спектральный диапазон перестройки и, как следствие, ухудшается пространственное разрешение дальномера. Потенциально продемонстрированное разрешение может быть уменьшено еще в два раза в случае использования всего диапазона сканирования лазера (~20 нм). Максимальная длина трассы для рассмотренного подхода может быть увеличена с помощью уменьшения скачка частоты между импульсами, что достигается за счет увеличения длины резонатора. В работе [17] показана возможность получения скачка частоты ~1 МГц, что потенциально может увеличить длину трассы в дальномере до ~75 м. В этом случае можно ожидать потребность в увеличении выходной мощности источника, что может быть достигнуто с помощью усилителей или волокон с увеличенной площадью моды, как это было реализовано в работе [18]. Также установлено, что на регистрируемый сигнал существенное влияние оказывают механические вибрации оптических элементов в измерительном плече интерферометра. Это накладывает определенные требования на стабильность элементов в процессе измерений. Также в экспериментах отмечалось, что интерференционная картина чувствительна к поляризационным свойствам оптической системы. В частности, небольшое рассогласование осей двулучепреломления на сварках приводило к уширению пика рассеяния на рефлектограмме от мишени. Можно предположить, что это связано с деградацией интерференции от сигналов с разной поляризацией.

Экспериментальное исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда (проект № 18-12-00243).

Список литературы

1. Лазерная дальнометрия / Л.А. Аснис [и др.]. – М.: Радио и связь. – 1995.

2. Лазерные приборы и методы измерения дальности: учеб. пособие / В.Б. Бокшанский [и др.]; под ред. В.Е. Карасика. – М., 2012.
3. Карих Е.Д. Определение параметров микровибраций слабоотражающих объектов по кепстру сигнала самосмещения в полупроводниковом лазере // Журнал Белорус. гос. ун-та. Физика. – 2017. – № 3. – С. 57–64.
4. Norgia M., Giuliani G., Donati S. New absolute distance measurement technique by self-mixing interferometry in closed loop // Proceedings of the 21st IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IEEE Cat. No. 04CH37510). – IEEE, 2004. – Т. 1. – С. 216–221.
5. Соболев В.С., Кашеева Г.А. Активная лазерная интерферометрия с частотной модуляцией // Автометрия. – 2008. – Т. 44, № 6. – С. 49–65.
6. Автодинная интерферометрия для определения расстояния при модуляции длины волны лазерного излучения / Д.А. Усанов [и др.] // Письма в журнал техн. физики. – 2016. – Т. 42, № 17. – С. 78–86.
7. McManamon P.F. Lidartechnologies and systems. – SPIE, 2019.
8. High-accuracy range-sensing system based on FMCW using low-cost VCSEL / T. Hariyama [et al.] // Optics express. – 2018. – Т. 26, № 7. – С. 9285–9297.
9. Coherent solid-state LIDAR with silicon photonic optical phased arrays / C.V. Poulton [et al.] // Optics letters. – 2017. – Т. 42, № 20. – С. 4091–4094.
10. Self-scanned single-frequency operation of a fiber laser driven by a self-induced phase grating / I.A. Lobach, S.I. Kablukov, E.V. Podivilov, S.A. Babin // Laser Phys. Lett. – 2014. – № 11. – P. 045103.
11. Ткаченко А.Ю., Лобач И.А. Устройство опроса волоконных сенсоров на базе волоконного лазера с самосканированием частоты // Прикладная фотоника. – 2016. – Т. 3, № 1. – С. 37–49.
12. Ткаченко А.Ю., Лобач И.А., Каблук С.И. Когерентный оптический частотный рефлектометр на основе волоконного лазера с самосканированием частоты // Квантовая электроника. – 2019. – Т. 49, № 12. – С. 1121–1126.
13. Tkachenko A.Y., Lobach I.A., Kablukov S.I. All-fiber Brillouin optical spectrum analyzer based on self-sweeping fiber laser // Optics Express. – 2017. – Т. 25, № 15. – С. 17600–17605.
14. Исследование поляризационных свойств генерации второй гармоники в световодах с периодически наведенной квадратичной нелинейностью / Е.И. Донцова [и др.] // Прикладная фотоника. – 2015. – Т. 2, № 4. – С. 342–357.
15. Генерация второй гармоники в волоконном световоде во вне-резонаторной и внутррезонаторной схемах / Е.И. Донцова [и др.] // Квантовая электроника. – 2016. – Т. 46, № 11. – С. 989–994.

16. Модуль обработки оптических сигналов с устройств на основе волоконного лазера с самосканированием частоты / Н.Н. Смолянинов, А.Ю. Ткаченко, И.А. Лобач, С.И. Каблуков // Приборы и техника эксперимента (в печати).

17. Single-frequency Bismuth-doped fiber laser with quasi-continuous self-sweeping / I.A. Lobach [et al.] // *Optics Express*. – 2015. – Т. 23, № 19. – С. 24833–24842.

18. Дробышев Р.В., Лобач И.А., Каблуков С.И. Волоконный итербиевый лазер с самосканированием частоты на основе волокна с увеличенной площадью поля моды // *Прикладная фотоника*. – 2016. – Т. 3, № 4. – С. 413–426.

References

1. Asnis L.A. et al. *Lazernaia dal'nometriia* [Laser ranging]. Moscow: Radio i sviaz', 1995.

2. Bokshanskii V.B. et al. *Lazernye pribory i metody izmereniia dal'nosti* [Laser devices and methods of measuring range]. Ed. V.E. Karasik. Moscow, 2012.

3. Karikh E.D. Opredelenie parametrov mikrovibratsii slabootrazhaiushchikh ob'ektov po kepstru signala samosmesheniia v poluprovodnikovom lazere [Determination of the parameters of microvibrations of low-reflecting objects from the cap-stream of the self-mixing signal in a semiconductor laser]. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Fizika*, 2017, no. 3, pp. 57-64.

4. Norgia M., Giuliani G., Donati S. New absolute distance measurement technique by self-mixing interferometry in closed loop. *Proceedings of the 21st IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IEEE Cat. No. 04CH37510)*. IEEE, 2004, vol. 1, pp. 216-221.

5. Sobolev V.S., Kashcheeva G.A. Aktivnaia lazernaia interferometriia s chastotnoi moduliatsiei [Active laser interferometry with frequency modulation]. *Avtometriia*, 2008, vol. 44, no. 6, pp. 49-65.

6. Usanov D.A. et al. Avtodinnaia interferometriia dlia opredeleniia rasstoianiiia pri moduliatsii dliny volny lazernogo izlucheniia [Autodyne interferometry for determining the distance when modulating the wavelength of laser radiation]. *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2016, vol. 42, no. 17, pp. 78-86.

7. McManamon P.F. *Lidartechnologies and systems*. SPIE, 2019.

8. Hariyama T. et al. High-accuracy range-sensing system based on FMCW using low-cost VCSEL. *Optics express*, 2018, vol. 26, no. 7, pp. 9285-9297.

9. Poulton C.V. et al. Coherent solid-state LIDAR with silicon photonic optical phased arrays. *Optics letters*, 2017, vol. 42, no. 20, pp. 4091-4094.

10. Lobach I.A., Kablukov S.I., Podivilov E.V., Babin S.A. Self-scanned single-frequency operation of a fiber laser driven by a self-induced phase grating. *Laser Phys. Lett.*, 2014, no. 11, 045103 p.

11. Tkachenko A.Iu., Lobach I.A. Ustroistvo oprosa volokonnykh sensorov na baze volokonnoho lazera s samoskanirovaniem chastoty [Fiber sensor interrogation device based on fiber laser with frequency self-scanning]. *Prikladnaia fotonika*, 2016, vol. 3, no. 1, pp. 37-49.

12. Tkachenko A.Iu., Lobach I.A., Kablukov S.I. Kogerentnyi opticheskii chastotnyi reflektometr na osnove volokonnoho lazera s samoskanirovaniem chastoty [Coherent optical frequency reflectometer based on fiber laser with self-scanning frequency]. *Kvantovaia elektronika*, 2019, vol. 49, no. 12, pp. 1121-1126.

13. Tkachenko A.Y., Lobach I.A., Kablukov S.I. All-fiber Brillouin optical spectrum analyzer based on self-sweeping fiber laser. *Optics Express*. 2017, vol. 25, no. 15, pp. 17600-17605.

14. Dontsova E.I. et al. Issledovanie poliarizatsionnykh svoystv generatsii vtoroi garmoniki v svetovodakh s periodicheski navedennoi kvadrachnoi nelineinost'iu [Study of the polarization properties of second harmonic generation in fibers with periodically induced quadratic nonlinearity]. *Prikladnaia fotonika*, 2015, vol. 2, no. 4, pp. 342-357.

15. Dontsova E.I. et al. Generatsiia vtoroi garmoniki v volokonnom svetovode vo vnerezonatornoi i vnutrirezonatornoi skhema [Second harmonic generation in an optical fiber in an extracavity and intracavity circuit]. *Kvantovaia elektronika*, 2016, vol. 46, no. 11, p. 989-994.

16. Smolianinov N.N., Tkachenko A.Iu., Lobach I.A., Kablukov S.I. Modul' obrabotki opticheskikh signalov s ustroystv na osnove volokonnoho lazera s samoskanirovaniem chastoty [Module for processing optical signals from devices based on a fiber laser with frequency self-scanning]. *Pribory i tekhnika eksperimenta* (v pechati).

17. Lobach I.A. et al. Single-frequency Bismuth-doped fiber laser with quasi-continuous self-sweeping. *Optics Express*, 2015, vol. 23, vol. 19, pp. 24833-24842.

18. Drobyshev R.V., Lobach I.A., Kablukov S.I. Volokonnyi itterbievyyi lazer s samoskanirovaniem chastoty na osnove volokna s uvelichennoi ploshchad'iu polia mody [Ytterbium self-scanning fiber laser based on fiber with increased mode field area]. *Prikladnaia fotonika*, 2016, vol. 3, no. 4, pp. 413-426.