



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

G01R 29/26 (2018.05); G01M 11/0207 (2018.05); G01M 11/331 (2018.05)

(21)(22) Заявка: 2017136195, 12.10.2017

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
12.10.2017

Дата регистрации:
21.08.2018

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 12.10.2017

(45) Опубликовано: 21.08.2018 Бюл. № 24

Адрес для переписки:

105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, ЦЗИС, для Пнёва А.Б.
(НОЦ "Фотоника")

(72) Автор(ы):

Пнев Алексей Борисович (RU),
Степанов Константин Викторович (RU),
Жирнов Андрей Андреевич (RU),
Нестеров Евгений Тарасович (RU),
Чернуцкий Антон Олегович (RU),
Борисова Алина Вадимовна (RU),
Шелестов Дмитрий Алексеевич (RU),
Кошелев Кирилл Игоревич (RU),
Карасик Валерий Ефимович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Московский государственный
технический университет имени Н.Э.
Баумана (национальный исследовательский
университет)" (МГТУ им. Н.Э. Баумана) (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: CN 106525256 A, 22.03.2017. US
4918373 A, 17.04.1990. US 2003112442 A1,
19.06.2003. CN 102426062 A, 25.04.2012. RU
2569052 C1, 20.11.2015.

(54) ИЗМЕРИТЕЛЬ ФАЗОВЫХ ШУМОВ УЗКОПОЛОСНЫХ ЛАЗЕРОВ, ОСНОВАННЫЙ НА
СОСТОЯЩЕМ ИЗ РМ-ВОЛОКНА ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ МАХА-ЦЕНДЕРА

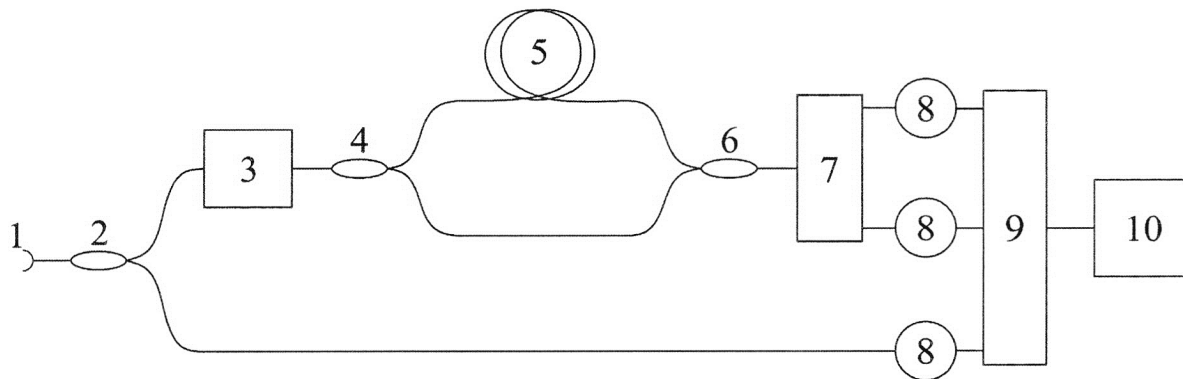
(57) Реферат:

Изобретение относится к устройствам измерения фазового шума методом частотного дискриминатора, в качестве которого выступает интерферометр Маха-Цендера, и может быть использовано для аттестации узкополосных высокостабильных лазеров, применяемых в линиях связи, гидрофонах, лидарных системах, а также в фазочувствительной рефлектометрии. Измеритель фазовых шумов узкополосных лазеров включает в себя: оптический ответвитель, формирующий два канала: первый, регистрирующий мгновенные значения мощности источника, и второй, записывающий два

интерференционных сигнала; поляризатор во втором канале, формирующий линейно-поляризованное излучение на входе в разбалансированный волоконный интерферометр Маха-Цендера, выполненный из волоконно-оптического разделяющего ответвителя (1×2) на основе волокна с сохранением состояния поляризации на входе интерферометра, дополнительного волокна с сохранением состояния поляризации, вносящего разность фаз, и объединяющего волоконно-оптического ответвителя (2×1) на основе волокна с сохранением состояния поляризации на выходе

интерферометра; расположенный после интерферометра Маха-Цендера поляризационный светоделитель, разделяющий два интерференционных сигнала от ортогонально поляризованных волн; три приемника оптического излучения, два из которых находятся после поляризационного светоделителя во втором канале, а один - в первом канале; аналого-цифровой преобразователь, на который приходят сигналы со всех трех приемников, и после него блок обработки цифровых сигналов для вычисления спектральной плотности мощности

фазового шума за счет выполнения функций в следующем порядке: нормировка интерференционного сигнала на мгновенные значения сигнала, пропорционального мощности лазера, с целью компенсации относительного шума интенсивности лазера; высокочастотная фильтрация с целью компенсации температурной нестабильности; вычисление флуктуаций фазы и расчет спектральной плотности мощности фазового шума. Техническим результатом является минимизация погрешности измерения фазовых шумов узкополосного лазера. 2 ил.



Фиг.1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) ABSTRACT OF INVENTION

(52) CPC

G01R 29/26 (2018.05); G01M 11/0207 (2018.05); G01M 11/331 (2018.05)(21)(22) Application: **2017136195, 12.10.2017**(24) Effective date for property rights:
12.10.2017Registration date:
21.08.2018

Priority:

(22) Date of filing: **12.10.2017**(45) Date of publication: **21.08.2018 Bull. № 24**

Mail address:

**105005, Moskva, ul. 2-ya Baumanskaya, 5, str. 1,
MGТУ im. N.E. Bauman, TSZIS, dlya Pneva A.B.
(NOTS "Fotonika")**

(72) Inventor(s):

**Pnev Aleksej Borisovich (RU),
Stepanov Konstantin Viktorovich (RU),
Zhironov Andrej Andreevich (RU),
Nesterov Evgenij Tarasovich (RU),
Chernutskij Anton Olegovich (RU),
Borisova Alina Vadimovna (RU),
Shelestov Dmitrij Alekseevich (RU),
Koshelev Kirill Igorevich (RU),
Karasik Valerij Efimovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**federalnoe gosudarstvennoe byudzhethnoe
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego
obrazovaniya "Moskovskij gosudarstvennyj
tekhnicheskij universitet imeni N.E. Bauman
(natsionalnyj issledovatel'skij universitet)"
(MGТУ im. N.E. Bauman) (RU)****(54) MEASURING PHASE NOISE OF NARROW-BAND LASER BASED ON THE MACH-ZEHNDER INTERFEROMETER CONSISTING OF THE RM-FIBER**

(57) Abstract:

FIELD: measuring equipment.

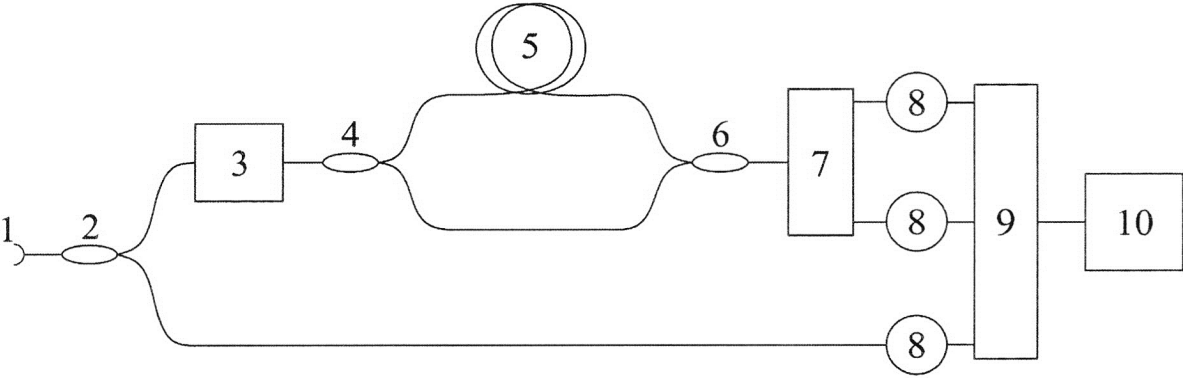
SUBSTANCE: invention relates to devices for measuring phase noise by the frequency discriminator method, which is a Mach-Zehnder interferometer, and can be used for attestation of narrow-band, highly stable lasers used in communication lines, hydrophones, lidar systems, and phase-sensitive reflectometry. Phase noise meter of narrow-band lasers includes: an optical coupler forming two channels: the first, recording the instantaneous values of the power of the source, and the second, recording two interference signals; a polarizer in the second channel, which forms linearly polarized radiation at the entrance to an unbalanced Mach-Zehnder fiber interferometer, made of a fiber optic splitter coupler (1×2) on the basis of a fiber with preservation of the polarization state at the input of the interferometer, additional fiber with preservation of the polarization state introducing the phase difference, and a combining fiber-optic coupler (2×1) on the basis of

fiber with preservation of the polarization state at the output of the interferometer; located after the Mach-Zehnder interferometer, a polarizing beam splitter separating two interference signals from orthogonally polarized waves; three receivers of optical radiation, two of which are located after the polarizing beam splitter in the second channel, and one – in the first channel; an analog-to-digital converter that receives signals from all three receivers, and thereafter a digital signal processing unit for calculating the spectral power density of the phase noise by performing the functions in the following order: normalization of the interference signal to instantaneous values of the signal proportional to the laser power, in order to compensate for the relative noise of the laser intensity; high-frequency filtering to compensate for temperature instability; calculation of phase fluctuations and calculation of the spectral power density of phase noise.

EFFECT: minimization of the error in measuring

the phase noise of a narrow-band laser.

1 cl, 2 dwg



Фиг.1

RU 2 6 6 4 6 9 2 C 1

RU 2 6 6 4 6 9 2 C 1

Область техники

Изобретение относится к устройствам измерения фазового шума методом частотного дискриминатора, в качестве которого выступает интерферометр Маха-Цендера, и может быть использовано для аттестации узкополосных высокостабильных лазеров, применяемых в линиях связи, гидрофонах, лидарных системах, а также в фазочувствительной рефлектометрии.

Уровень техники

Частотная нестабильность, вызванная спонтанными переходами, оптическими потерями и техническим шумом, связанным с вибрациями и температурными флуктуациями в резонаторе лазера, оказывает существенное влияние на качество работы линий связи, ограничивая спектральную ширину линии, на системы мониторинга состояния объектов с помощью когерентной фазочувствительной рефлектометрии. Наиболее общей характеристикой частотной нестабильности лазера является спектральная плотность мощности флуктуаций фазы - фазовый шум. Одним из основных методов измерения фазового шума является метод когерентного частотного дискриминатора, преимущества которого заключаются в возможности измерения чрезвычайно узкой ширины линии спектра лазера, измерении характеристики в широком спектральном диапазоне, а также возможность измерения изменения частоты от времени. В методе частотного дискриминатора флуктуации частоты лазерного излучения за счет разности плеч в волоконном интерферометре преобразуются во флуктуации разности фаз интерферирующих волн. Эта разность фаз определяет интенсивность интерференционной картины. Регулируя время реализации, можно варьировать частотное разрешение; увеличение времени реализации позволяет измерять спектральную плотность фазового шума на низких частотах. Дополнительное измерение мощности лазера дает возможность учесть относительный шум интенсивности и компенсировать его влияние на результат вычисления фазового шума.

В патенте США US 5995223A (опубл. 30.11.1999) описано устройство для быстрой фазовой интерферометрии. Данный прибор выполняет восстановление фазы интерференционного сигнала от тестовой среды с пространственно меняющейся оптической длиной. Устройство также использует принцип разделения по состоянию поляризации и внесение дополнительной разности хода в одну из поляризационных компонент. Регистрируемые интерференционные сигналы смещены по фазе на 90 градусов, что позволяет восстанавливать интерферометрическую фазовую картину тестовой среды от 0 до 2π радиан. Предложенная схема может использоваться для измерения фазовых шумов, однако в данном патенте это не основная задача устройства. Достоинством данного прибора является устойчивости к вибрациям и нестабильностям условий окружающей среды.

Основной его недостаток, обусловленный областью применения устройства, заключается в его пространственной реализации, которая, по сравнению с волоконной, имеет большие габариты и большие потери мощности излучения, а также очень сложную периодическую юстировку.

В патентной заявке США US 20110122906 A1 (опубл. 26.05.2011) описана установка, использующая волоконный несбалансированный интерферометр Маха-Цендера и отведенный эталонный сигнал от лазера для измерения длины волны источника излучения.

Однако предложенная схема в данном патенте не используется для измерения фазовых шумов лазера, а только для контроля испускаемого лазером излучения. Также недостатком патента является наличие только одного интерферометра Маха-Цендера,

а это приведет к высокой нестабильности измерений при наличии внешних факторов.

Устройство, описанное в патенте США US 5671301 А (опубл. 23.09.1997), основано на измерении разности фаз между опорным и измерительным сигналами и обработки полученных данных. Устройство выполнено на основе интерферометра Маха-Цендера, в опорном плече которого установлен фазовращатель, контролируемый пьезоэлектрическим элементом через блок обработки сигнала. Таким образом, сформирована обратная связь, что негативно сказывается на стоимости данного устройства.

В патенте РФ RU 2569052 C1 (опубл. 20.11.2015) представлен способ компенсации дрейфа частоты опорного источника излучения в спектрометрическом приборе на основе фурье-интерферометра. Метод компенсации основан на получении и накоплении данных, представляющих опорную интерферограмму, которая зависит от частоты излучения опорного источника; а также данных, представляющий сигнальную интерферограмму, записанную фурье-интерферометром. Опорная и сигнальная интерферограммы сравниваются в арифметическом блоке для определения фазового сдвига, затем производятся математические преобразования для управления действием спектрометра для получения интерферограммы неизвестного образца.

Данная схема позволяет скомпенсировать шумы лазера, но при этом не измеряет непосредственно спектральную плотность фазового шума лазера.

В качестве прототипа была выбрана установка, описанная в патенте США US 4918373 (опубл. 17.04.1990). В данной установке сигнал от источника делится ответвителем на два компонента, один из которых поступает на волоконную линию задержки, вносящую определенное запаздывание в этот сигнал. Другая часть проходит через регулируемый фазовращатель, который смещает фазу подаваемого сигнала. Оба сигнала затем поступают на волоконный соединитель, результат смешения усиливается слабошумящим усилителем и затем подается на электрический анализатор спектра, который отображает частотное распределение фазового шума. Результат смешения сигналов зависит от относительной разности фаз и представляет изменения амплитуды. Другими словами, система преобразует фазовый шум исследуемого сигнала во флуктуации амплитуды интерференционного сигнала, которые затем исследуются на спектроанализаторе.

Основным недостатком прототипа является необходимость опорного высокостабильного источника излучения, а также схемы обратной связи для удержания рабочей точки интерферометра в области квадратуры.

Раскрытие изобретения

Задачами изобретения являются минимизация погрешности измерения фазовых шумов узкополосного лазера при отсутствии необходимости использования высокостабильного источника излучения и схемы обратной связи, обеспечивающей рабочую точку интерферометра.

Указанная задача решается предлагаемым измерителем фазовых шумов узкополосных лазеров, включающим в себя: оптический ответвитель, формирующий два канала: первый, регистрирующий мгновенные значения мощности источника, и второй, записывающий два интерференционных сигнала. Поляризатор во втором канале формирует линейно-поляризованное излучение на входе в разбалансированный волоконный интерферометр Маха-Цендера, выполненный из волоконно-оптического ответвителя 1×2 на основе волокна с сохранением состояния поляризации (РМ-волокна) на входе интерферометра, дополнительного волокна с сохранением состояния поляризации (РМ-волокна), вносящего разность фаз, и волоконно-оптического ответвителя 2×1 на основе волокна с сохранением состояния поляризации (РМ-волокна)

на выходе интерферометра. После интерферометра Маха-Цендера расположен поляризационный светоделитель, разделяющий два интерференционных сигнала от ортогонально поляризованных волн. Далее расположены три приемника оптического излучения, два из которых находятся после поляризационного светоделителя во втором канале, а один в первом канале, и аналого-цифровой преобразователь (АЦП), на который приходят сигналы со всех трех приемников, выходы которого подключены к блоку обработки его цифровых сигналов для вычисления спектральной плотности мощности фазового шума за счет выполнения функций в следующем порядке: нормировка интерференционного сигнала на мгновенные значения сигнала, пропорционального мощности лазера, с целью компенсации относительного шума интенсивности лазера; высокочастотная фильтрация с целью компенсации температурной нестабильности; вычисление флуктуаций фазы и расчет спектральной плотности мощности фазового шума.

Возможность проведения корректных измерений без опорного источника излучения достигается за счет формирования двух интерференционных сигналов для ортогонально поляризованных волн при помощи разбалансированного интерферометра Маха-Цендера, состоящего из волокна с сохранением состояния поляризации (РМ-волокна), дальнейшего разделения интерференционных сигналов с помощью поляризационного светоделителя в волоконном исполнении и последующего их анализа. В интерферометр поступает линейно поляризованное лазерное излучение, ориентированное под углом 45° по отношению к быстрой и медленной осям РМ-волокна, сформированное после прохождения лазерного пучка через поляризатор. Разбалансированный волоконный интерферометр Маха-Цендера включает в себя два ответвителя 1×2 , выполненных из РМ-волокна и делящих излучение в равном соотношении, а также дополнительного участка РМ-волокна, включенного в одно из плеч интерферометра. Часть излучения от исследуемого источника через волоконный ответвитель 1×2 поступает непосредственно на приемник излучения для измерения относительного шума интенсивности исследуемого лазера и компенсации его влияния на оценку фазового шума, вторая часть проходит поляризатор, интерферометр и поляризационный светоделитель, после чего интерференционные сигналы от ортогонально поляризованных волн с выходов поляризационного светоделителя также поступают на приемники излучения. Коэффициент деления первого ответвителя выбирается таким образом, чтобы величина сигнала на всех трех приемниках была одного порядка. Три оцифрованных при помощи АЦП сигнала формируют реализации, которые обрабатываются по определенному алгоритму с целью вычисления спектральной плотности мощности фазового шума.

Уменьшение погрешности измерений достигается за счет уменьшения влияния температурных нестабильностей и вибраций на интерферометр путем линейной фильтрации интерференционных сигналов, а также за счет компенсации относительного шума интенсивности лазера, который измеряется предложенным устройством путем записи мгновенных значений мощности излучения лазера. Предложенную схему можно рассматривать как два интерферометра для независимых состояний поляризации. Так как фактически интерферометр единый, то на оба выходных интерференционных сигнала влияют одинаковые внешние условия: температурные изменения, вибрации, давление. Перечисленные внешние воздействия представляют собой достаточно медленные процессы, в связи с чем интерферограммы будут коррелировать между собой, что позволяет при цифровой обработке применить высокочастотную фильтрацию и тем самым компенсировать влияние шумов интерферометра на измерение фазового

шума. Также за счет реализации двух интерферометров возможно компенсировать нелинейность рабочего участка интерферометра, которая имеет место в схемах с одним интерферометром без обратной связи и приводит к искажению интерференционного сигнала из-за возникновения колебаний на дополнительных частотах.

5 Перечень фигур

На фиг. 1 представлена схема предлагаемого измерителя.

На фиг. 2 представлены графики фазовых шумов, полученных экспериментально.

Осуществление изобретения

На фиг. 1 представлена схема предлагаемого измерителя. Измеритель содержит
 10 оптический разъем 1, к которому подключается исследуемый лазер; волоконно-оптический ответвитель на два канала (1×2) 2; поляризатор 3 с выходом, выполненным из РМ-волокна; волоконно-оптический ответвитель (1×2) с сохранением состояния поляризации 4, дополнительное РМ-волокно 5; волоконно-оптический ответвитель (2×1) с сохранением состояния поляризации 6 для объединения двух сигналов;
 15 поляризационный светоделитель 7; три приемника излучения 8; аналого-цифровой преобразователь 9 и блок цифровой обработки сигналов 10. Все компоненты от поляризатора 3 до приемников излучения 8 выполнены из РМ-волокна (волокна с сохранением состояния поляризации), которое позволяет передавать излучение с ортогональными состояниями поляризации независимо друг от друга и тем самым
 20 сформировать два интерференционных сигнала, которые впоследствии разделяются поляризационным светоделителем 7.

Исследуемый узкополосный лазер подключают к оптическому разъему 1, соединенному с волоконно-оптическим ответвителем (1×2) 2, делящим энергию излучения в долях, определяемых из условия обеспечения достаточного для корректной
 25 работы отношения сигнал/шум, при этом величина сигнала на всех трех приемниках должна быть одного порядка. Один из выходов ответвителя 2 подключают к поляризатору 3 излучения, второй - напрямую к одному из приемников излучения 8. Выход поляризатора 3 подключают к оптическому ответвителю (1×2) излучения на основе РМ-волокна 4, делящего излучение между двумя плечами интерферометра в
 30 соотношении 50% на 50%. При этом медленная ось входного волокна ответвителя (1×2) 4 должна быть ориентирована под углом 45° к направлению поляризации излучения после поляризатора, то есть к медленной или быстрой оси выходного РМ-волокна. В одно из плеч интерферометра включено РМ-волокно 5, вносящее определенную разность фаз между интерферирующими волнами, тем самым обеспечивая рабочую точку
 35 интерферометра. Длину волокна 5 подбирают таким образом, чтобы изменения в интенсивности интерференционного сигнала, обусловленные флуктуациями частоты лазера, возможно было зарегистрировать. При длине волокна 70 см оптическая разность хода в плечах интерферометра составляет 1 м ($\Delta = l \cdot n$, где l - длина волокна, n - показатель преломления), что позволяет измерять фазовые шумы лазера,
 40 нормированные на единицу оптической длины. Излучение после прохождения плеч интерферометра объединяется волоконно-оптическим ответвителем (2×1) 6, выход которого соединен с поляризационным светоделителем 7. Интерференционные сигналы от ортогонально поляризованных волн, сформированных на выходах поляризационного светоделителя 7, регистрируются приемниками излучения 8, подключенными к АЦП
 45 9. Оцифрованные сигналы с трех каналов АЦП передаются в блок цифровой обработки сигнала 10, в котором рассчитывается спектральная плотность фазового шума за счет выполнения функций в следующем порядке: нормировка интерференционного сигнала на мгновенные значения сигнала, пропорционального мощности лазера, с целью

компенсации относительного шума интенсивности лазера; высокочастотная фильтрация с целью компенсации температурной нестабильности; вычисление флуктуаций фазы и расчет спектральной плотности мощности фазового шума.

Таким образом часть излучения от исследуемого источника через волоконный ответвитель (1×2) с известным коэффициентом деления поступает непосредственно на приемник излучения, вторая часть проходит поляризатор, интерферометр и поляризационный светоделитель, после чего интерференционные сигналы от ортогонально поляризованных волн с выходов поляризационного светоделителя также поступают на приемники излучения. В интерферометр поступает линейно поляризованное лазерное излучение, ориентированное под углом 45° по отношению к быстрой и медленной осям РМ-волокна, сформированное после прохождения лазерного пучка через поляризатор. Разбалансированный волоконный интерферометр Маха-Цендера включает в себя ответвители (1×2) и (2×1), выполненные из РМ-волокна и делящие излучение в равном соотношении, а также дополнительный участок РМ-волокна, включенный в одно из плеч интерферометра. Три оцифрованных при помощи АЦП сигнала формируют реализации, которые обрабатываются по вышеуказанному алгоритму с целью вычисления спектральной плотности мощности фазового шума.

Интерферометр преобразует малые изменения частоты в изменения интенсивности, которые далее преобразуются приемниками в изменения фототока и, соответственно, напряжения. Так как на входе интерферометра направление вектора напряженности электрического поля поляризованного излучения отклонено на 45 градусов относительно быстрой и медленной осей РМ-волокна, по волокну распространяются две ортогональные компоненты E_x и E_y с разными скоростями, что при прохождении излучением волокна длиной L_w приводит к возникновению разностей фаз между двумя плечами интерферометра, различных для ортогональных поляризаций. Таким образом, предложенную схему измерителя можно рассматривать в виде двух интерферометров для независимых состояний поляризации. Полученные интерференционные сигналы описываются следующими выражениями:

$$\begin{cases} I_x = \frac{1}{2} \left[I_{ex}(t) + I_{ax}(t) \cos \left(\frac{2\pi\nu(t)}{c} \Delta_1(t) \right) \right] \\ I_y = \frac{1}{2} \left[I_{ay}(t) + I_{ax}(t) \cos \left(\frac{2\pi\nu(t)}{c} \Delta_2(t) \right) \right] \end{cases}$$

где $I_{BX}(t)$ - сигнал на входе, $\nu(t)$ - частота лазера, c - скорость света, $\Delta_1(t)$ и $\Delta_2(t)$ - оптические разности хода лучей в плечах интерферометра для ортогональных составляющих E_x и E_y , соответственно.

$$\Delta_1(t) = n_x L_w,$$

$$\Delta_2(t) = n_y L_w = (n_x + \Delta n) L_w,$$

$$\Delta n = \lambda / BL$$

где L_w - длина РМ-волокна, λ - длина волны лазера, n_x , n_y - показатели преломления медленной и быстрой осей, соответственно, Δn - разность в показателях преломления для ортогональных составляющих, $BL = 3 \dots 5$ мм - длина биений (параметр РМ-волокна, определяющий расстояние, при прохождении которого разность фаз между ортогональными поляризованными модами равна 2π).

Помимо интерференционных сигналов на протяжении интервала времени измерения записывается сигнал, пропорциональный мощности лазера I_l , которая может

использоваться для компенсации влияния шумов интенсивности лазера на результат интерференции. Данную компенсацию амплитудной нестабильности предлагается выполнять после вычисления коэффициента пропорциональности, отвечающего за отношение средних потоков от лазера и интерферометра:

$$k_1 = \frac{\langle I_x \rangle}{\langle I_l \rangle},$$

где $\langle I_x \rangle$ - среднее значение интенсивности интерференционного сигнала от компоненты, поляризованной вдоль быстрой оси РМ-волокна, $\langle I_l \rangle$ - среднее значение мощности лазера.

Далее производится вычитание постоянной составляющей из интерференционного сигнала с учетом шума интенсивности:

$$I_x^{(\kappa)}(t) = I_x(t) - k_1 I_l(t),$$

где $I_x^{(\kappa)}$ - колебания интерференционного сигнала для x-компоненты относительно среднего значения. Для получения гармонической составляющей необходимо нормировать на мгновенные значения интерференционного сигнала с учетом мощности лазера:

$$I_x^{(\text{гарм})}(t) = \frac{I_x^{(\kappa)}(t)}{k_1 I_l(t)}$$

Для компенсации влияния температурных нестабильностей интерферометра, анализируются фурье-спектры двух интерференционных сигналов и производится их фильтрация в области наибольшей корреляции. После произведенных операций вычисляются флуктуации фазы интерференционного сигнала как аргумент гармонической функции:

$$\Phi_1 = \arccos[I_x^\phi(t)],$$

где I_x^ϕ - фильтрованный интерференционный сигнал, Φ_1 - флуктуации фазы.

Спектральная плотность мощности фазового шума вычисляется по формуле:

$$S_\phi(f) = \frac{|F[\Phi_1]|^2}{T} = \frac{\Delta t^2}{T} \left| \sum_{n=1}^N I_x^\phi(n) e^{-i\omega n} \right|^2,$$

где T - время записанной реализации; $\Delta t = 1/f_\partial$ - период дискретизации АЦП, f_∂ - частота дискретизации. Варьируя параметры считывания АЦП: частоту дискретизации и время записи - возможно вычислять спектральную плотность в нужном спектральном диапазоне и с необходимым частотным разрешением.

Эффект компенсации влияния температуры достигается за счет фильтрации интерференционных сигналов в области наибольшей корреляции их спектров. Это связано с тем, что реализован единый интерферометр, то есть разность фаз обеих интерференционных картин изменяется одинаковым образом под влиянием внешних шумов: температурных изменений, вибраций, давления.

Уменьшение влияния шумов интенсивности источника достигается с помощью введения дополнительного канала, регистрирующего мгновенные значения мощности лазера и последующего использования этих данных в алгоритме цифровой обработки сигналов.

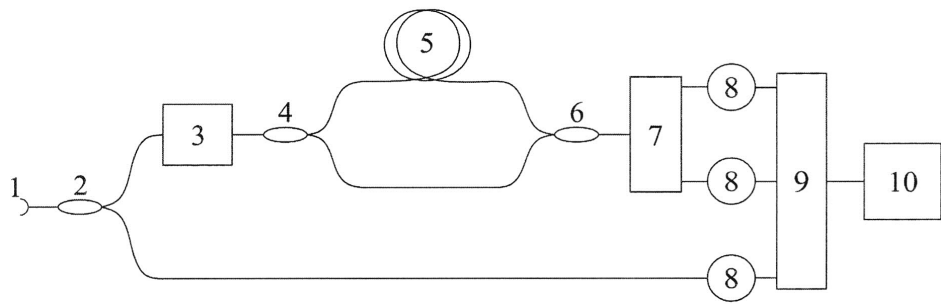
Предложенный измеритель позволяет также избежать возможной нечувствительности

интерферометра в связи с тем, что записываются два интерференционных сигнала, сдвинутых по фазе друг относительно друга на фиксированную величину, не зависящую от изменения внешних условий.

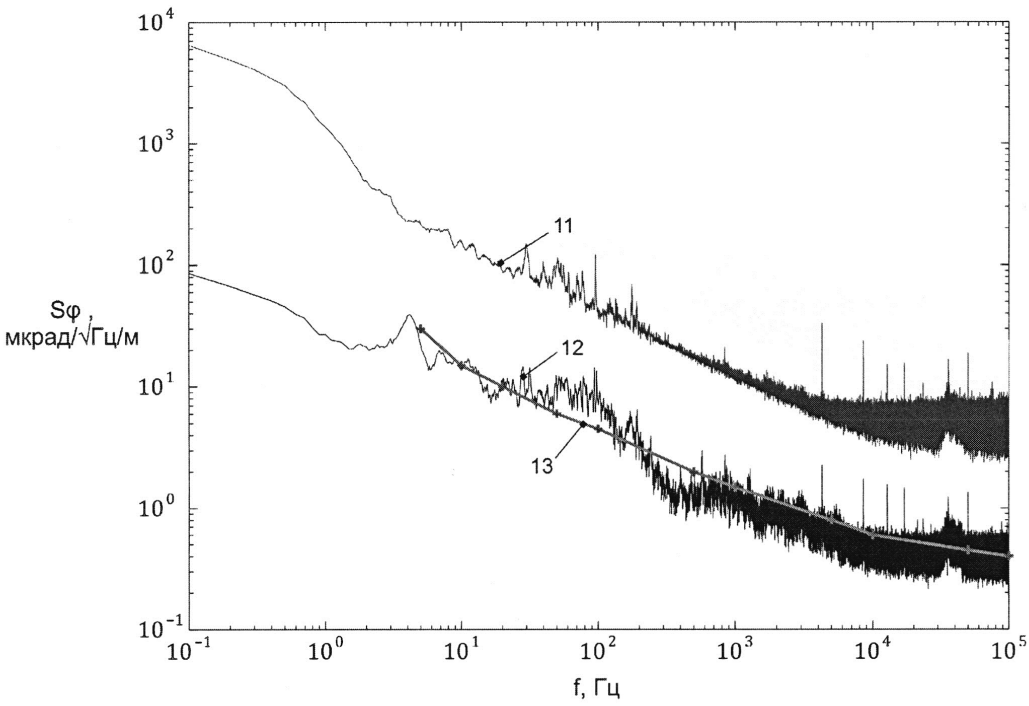
Предложенный алгоритм обработки был применен к интерференционным сигналам от нескольких лазеров. В статье Pnev Alexey B.; Stepanov Konstantin V.; Dvoretzkiy Dmitriy A.; Zhimov Andrei A.; Nesterov Evgeny T.; Sazonkin Stanislav G.; Chemutsky Anton O.; Shelestov Dmitriy A.; Fedorov Aleksey K.; Svelto Cesare; Karasik Valeriy E. Minimization of errors in narrowband laser phase noise measurements based on reference measurement channels // International journal of advanced biotechnology and research. (2016), - V. 7, - I. 4, - PP. 1445-1451 представлены результаты измерений спектральной плотности фазового шума лазера Redfem Integrated Optic (фиг. 2). Измеренные спектральные плотности фазового шума сравнивались со спектральной плотностью фазового шума, представленной в документации на данный лазер. Характеристика, полученная без применения алгоритма компенсации относительного шума интенсивности (график 11), на порядки превышает спектральную плотность фазового шума, представленную в документации производителя (график 13). При этом результаты измерения с применением алгоритма компенсации относительного шума интенсивности (график 12) совпадают с данными производителя. Такая качественная оценка показывает, что обработка интерференционных сигналов с применением представленного алгоритма приводит к уменьшению погрешности, что позволяет сделать вывод о его работоспособности. Минимизация погрешности измерений происходит за счет того, что мгновенные значения интерференционного сигнала уменьшаются пропорционально мгновенным значениям мощности лазера.

(57) Формула изобретения

Измеритель фазовых шумов узкополосных лазеров, включающий в себя: оптический ответвитель, формирующий два канала: первый, регистрирующий мгновенные значения мощности источника, и второй, записывающий два интерференционных сигнала; поляризатор во втором канале, формирующий линейно-поляризованное излучение на входе в разбалансированный волоконный интерферометр Маха-Цендера, выполненный из волоконно-оптического разделяющего ответвителя (1×2) на основе волокна с сохранением состояния поляризации на входе интерферометра, дополнительного волокна с сохранением состояния поляризации, вносящего разность фаз, и объединяющего волоконно-оптического ответвителя (2×1) на основе волокна с сохранением состояния поляризации на выходе интерферометра; расположенный после интерферометра Маха-Цендера поляризационный светоделитель, разделяющий два интерференционных сигнала от ортогонально поляризованных волн; три приемника оптического излучения, два из которых находятся после поляризационного светоделителя во втором канале, а один - в первом канале; аналого-цифровой преобразователь, на который приходят сигналы со всех трех приемников, и после него блок обработки цифровых сигналов для вычисления спектральной плотности мощности фазового шума за счет выполнения функций в следующем порядке: нормировка интерференционного сигнала на мгновенные значения сигнала, пропорционального мощности лазера, с целью компенсации относительного шума интенсивности лазера; высокочастотная фильтрация с целью компенсации температурной нестабильности; вычисление флуктуаций фазы и расчет спектральной плотности мощности фазового шума.



Фиг.1



Фиг.2