

УДК 681.7.068, 621.37, 537.86

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-1-1-23

ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОФОТОНИКИ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРАХ

Е.В. Востриков^a, Е.В. Литвинов^a, С.А. Волковский^a, А.С. Алейник^a, Г.А. Польте^b

^a Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^b Технический университет Ильменау, Ильменау, 98693, Германия

Адрес для переписки: e.v.vostrikov@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 02.12.19, принята к печати 29.12.19

Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: Востриков Е.В., Литвинов Е.В., Волковский С.А., Алейник А.С., Польте Г.А. Применение радиофотоники в волоконно-оптических измерительных приборах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 1. № 1. С. 1–23 doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-1-1-23

Аннотация

Радиофотоника является новым научно-техническим направлением, которое образовалось в результате интенсивного развития таких областей, как волоконная, интегральная и нелинейная оптика, лазерная физика, опто- и микроэлектроника. В последние десятилетия наблюдается положительная динамика по созданию радиофотонных устройств, эта тенденция связана с возможностью создавать устройства ультравысоких и сверхвысоких частот с параметрами, недостижимыми обычными электронными устройствами. Характеристики радиофотонных измерительных систем сопоставимы с характеристиками традиционных волоконно-оптических датчиков, данная технология может быть использована как для создания новых измерительных приборов, так и для усовершенствования уже существующих измерительных систем других типов. В работе представлен аналитический обзор способов применения радиофотонных технологий в волоконно-оптических измерительных приборах. В первой части обзорной статьи рассмотрен общий принцип построения радиофотонных волоконно-оптических измерительных приборов. Представлены ключевые элементы подобного рода систем — радиофотонные фильтры. Описаны технологии их построения с указанием особенностей, преимуществ и недостатков. Рассмотрены способы создания радиофотонных фильтров с конечной импульсной характеристикой с положительными и отрицательными коэффициентами. Последующие разделы посвящены непосредственно анализу радиофотонных волоконно-оптических измерительных приборов и содержат классификацию таких устройств по их принципу работы. Предложена классификация спектральных и интерферометрических радиофотонных волоконно-оптических измерительных приборов с указанием их отличительных признаков. Представлены и проанализированы экспериментальные данные, основные характеристики и области практического применения наиболее распространенных датчиков. Рассмотрены новые подходы и методы по созданию радиофотонных измерительных систем и улучшению тактико-технических характеристик существующих приборов. Приведено сопоставление характеристик радиофотонных волоконно-оптических измерительных приборов и традиционных волоконно-оптических датчиков, по результатам которого можно сделать вывод о применимости современного типа измерительных приборов, а также о преимуществах их использования по сравнению с другими волоконно-оптическими датчиками.

Ключевые слова

радиофотоника, волоконная оптика, волоконно-оптические датчики, измерительные приборы, спектральные датчики, интерферометрические датчики

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-1-1-23

APPLICATION OF MICROWAVE PHOTONICS IN FIBER OPTICAL SENSORS

E.V. Vostrikov^a, E.V. Litvinov^a, S.A. Volkovskii^a, A.S. Aleinik^a, G.A. Polte^b

^a ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^b Technical University Ilmenau, Ilmenau, 98693, Germany

Corresponding author: e.v.vostrikov@yandex.ru

Article info

Received 02.12.19, accepted 29.12.19

Article in Russian

For citation: Vostrikov E.V., Litvinov E.V., Volkovskii S.A., Aleinik A.S., Polte G.A. Application of microwave photonics in fiber optical sensors. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 1–23 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-1-1-23

Abstract

Microwave photonics is a new scientific and technical area of research, which was formed as a result of intensive development of such fields as fiber, integrated and nonlinear optics, laser physics, optoelectronics and microelectronics. A positive trend in the field of microwave photonic devices development has appeared in recent decades. The trend is related to the fact that these devices can operate in ultra-high and super-high frequencies and microwave ranges, and have parameters, which are unattainable by conventional electronic devices. Technical characteristics of microwave photonic measuring systems are comparable with those of traditional fiber-optic sensors. This technology can be used both for creation of new measuring devices and improvement of existing other types of measuring systems. This paper presents an analytical review of microwave photonics application technologies in fiber-optic measuring instruments. The general design concept for microwave photonic fiber-optic measuring devices is considered in the first part of the review paper. Microwave photonic filters are presented, which are the key elements of microwave photonic fiber-optic measuring devices. Their design technologies are described with indication of the features, advantages and disadvantages. Methods for creation of microwave photonic finite impulse response filters with positive and negative coefficients are considered. The following sections are devoted directly to the analysis of microwave photonic fiber-optic measuring devices and contain classification of such devices according to their principle of operation. The classification of spectral and interferometric microwave photonic fiber-optic measuring devices with indication of their distinctive features is proposed. Experimental data of the most common sensors is presented and analyzed; the main characteristics and areas of their practical application are presented for each of them. New approaches and methods are considered for creation of microwave photonic measuring systems and improvement of tactical and technical characteristics of existing devices. Comparison between microwave photonic fiber-optic measuring devices and traditional fiber-optic measuring systems is performed. According to comparison results, conclusions can be drawn about applicability of microwave photonic fiber-optic measuring devices and advantages of their use compared to other fiber-optic sensors.

Keywords

microwave photonics, fiber optics, fiber-optic sensors, sensors, spectral sensors, interferometric sensors

Введение

За последние десятилетия скорость и объем передачи данных значительно возросли, что привело к необходимости создания новых методов сверхбыстрой передачи и обработки данных с использованием волоконно-оптических систем. Дополнительно бурный рост наблюдался в области беспроводной передачи данных. Эти предпосылки стали причиной развития гибридного направления, которое соответствует тенденциям развития современного мира. Таким направлением стала радиофотоника. Радиофотонные технологии все глубже проникают в нашу жизнь, необходимы специалисты высокого класса со знаниями в таких областях, как волоконная, интегральная, нелинейная оптика, ультравысокочастотная (УВЧ) и сверхвысокочастотная (СВЧ) электроника, оптоэлектроника, необходимо новое оборудование и измерительная техника, которые бы позволили вести контроль параметров радиофотонных систем, а также современная и доступная для понимания литература о радиофотонных технологиях. Помимо радиофотонных систем для передачи и обработки данных параллельно развивалась область, связанная с измерительными приборами. Радиофотонные волоконно-оптические измерительные приборы (РФВОИП) обладают преимуществами волоконно-оптических измерительных систем (небольшие размеры, малый вес, устойчивость к электромагнитным помехам, устойчивость к коррозии, низкие потери (менее 0,4 дБ/км), механическая гибкость, способность осуществлять измерения по всей длине оптического волокна), с чем связано их активное применение во многих областях науки и техники за последние годы. К сожалению, радиофотонные технологии не так часто встречаются в научно-популярных журналах, в связи с этим многие РФВОИП неизвестны не только научному сообществу, но и специалистам профессиональных сообществ, которые имеют к этому непосредственное отноше-

ние. В данной работе содержится подробный анализ РФВОИП, описаны их особенности, преимущества и недостатки. Представленная информация необходима для формирования комплекса знаний о применении радиофотонных технологий в волоконно-оптических измерительных приборах и должна быть полезна специалистам в данной области [1].

Первоначально необходимо изучить общий принцип построения РФВОИП. На рис. 1 представлена базовая блок-схема построения РФВОИП.

Радиочастотный сигнал (РЧ-сигнал) УВЧ- и СВЧ-диапазонов поступает на электрооптический модулятор (ЭОМ), посредством которого осуществляется электрооптическое преобразование. После ЭОМ спектр оптического сигнала будет содержать несколько боковых полос относительно частоты оптической несущей (ω). Оптическая система описывается передаточной функцией $H(\omega, \epsilon)$, которая изменяется при оказании внешнего воздействия ϵ . После прохождения оптической системы и попадания сигнала на модуль оптоэлектронного преобразования, РЧ-сигнал будет содержать информацию об оказанном воздействии. Основными компонентами РФВОИП являются: источник оптического излучения (ИОИ), оптическая система, в качестве которой используется оптическое волокно, модуль оптоэлектронного преобразования и ЭОМ. Представленные элементы являются обязательными при создании РФВОИП. В большинстве случаев анализ РЧ-сигнала осуществляется с помощью векторного анализатора электрических цепей. Также можно использовать другие устройства, принцип функционирования которых основан на синхронном детектировании РЧ-сигнала.

По сравнению с волоконно-оптическими измерительными приборами, оптическая несущая в РФВОИП модулируется РЧ-сигналом. Для работы с такими сигналами используются радиофотонные фильтры, конфигурация которых отличается от традиционных

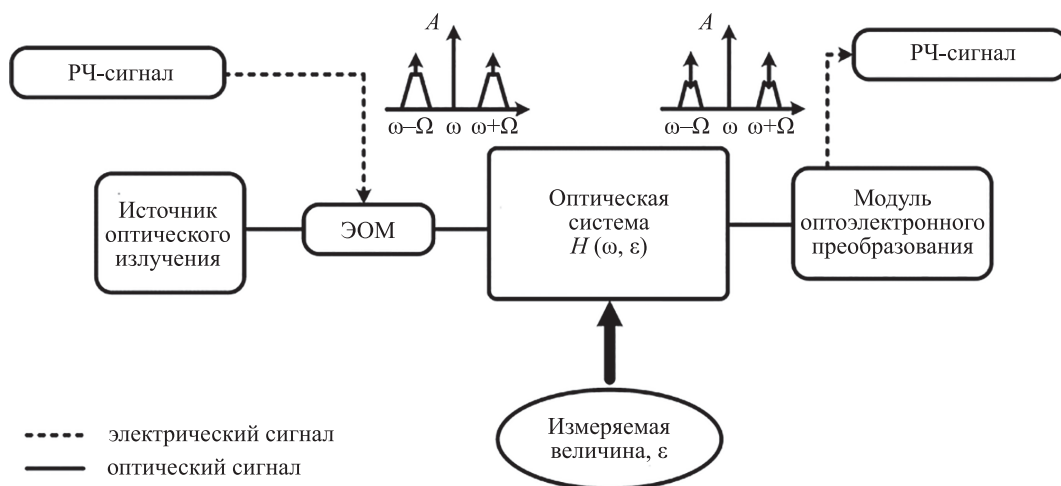


Рис. 1. Структурная схема радиофотонного волоконно-оптического измерительного прибора: A — амплитуда оптического сигнала; ω — центральная частота оптического сигнала; Ω — центральная частота РЧ-сигнала

оптических фильтров. Фильтры данного типа являются ключевыми элементами РФВОИП, поэтому их устройство и принцип работы требуют более подробного рассмотрения.

Радиофотонные фильтры

Радиофотоника позволяет создавать высокоскоростные, экономически выгодные, широкополосные устройства с низкими потерями [2]. Радиофотонные системы

используются для генерации и обработки РЧ-сигналов [3, 4]. В частности, радиофотоника позволяет создавать оптические фильтры УВЧ- и СВЧ-диапазонов, обладающие большой частотной полосой, высокой скоростью, малыми потерями [5]. Для анализа РФВОИП необходимо ознакомиться с основными типами радиофотонных фильтров.

На рис. 2 представлена структурная схема радиофотонного фильтра (радиофотонный фильтр № 1) с конечной импульсной характеристикой (КИХ).

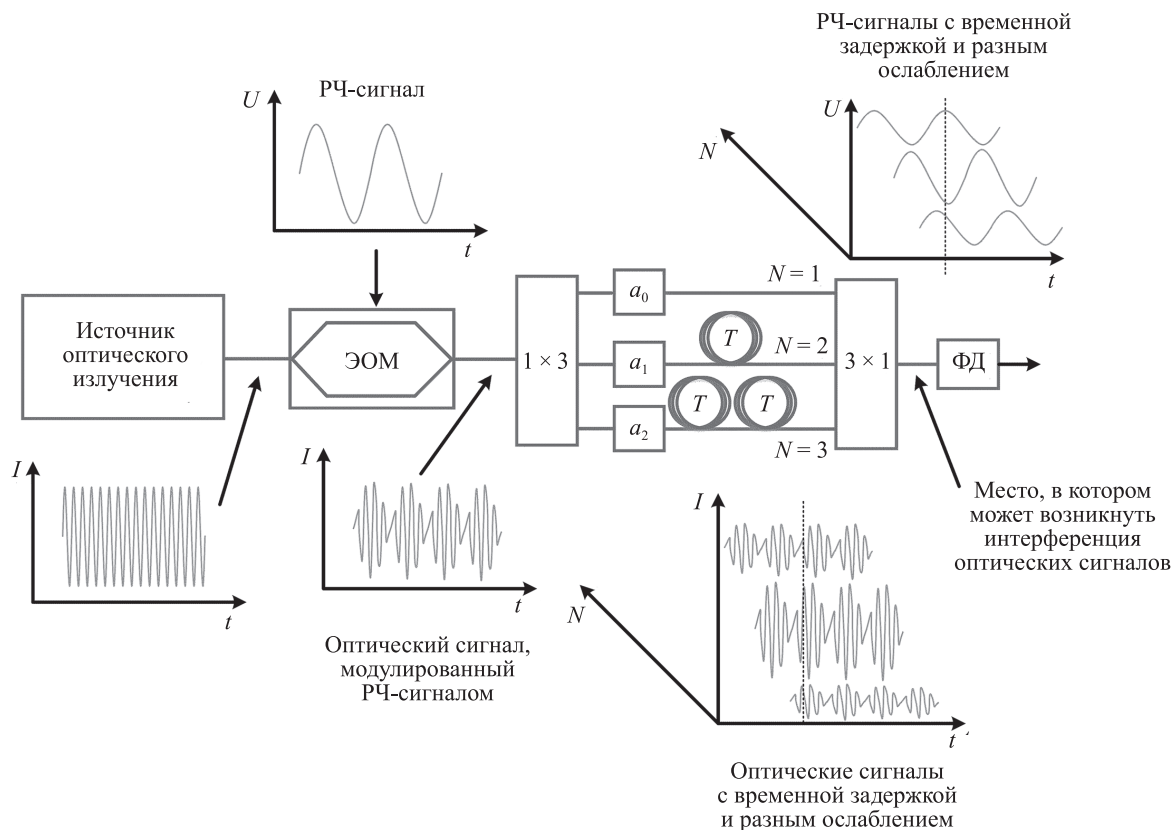


Рис. 2. Структурная схема радиофотонного фильтра (радиофотонный фильтр № 1): a_0, a_1, a_2 — коэффициенты радиофотонного фильтра; T — элемент задержки на основе оптического волокна; 1×3 — оптический разветвитель; 3×1 — оптический объединитель; ФД — фотодиод; U — напряжение; t — время; N — номер оптического сигнала; I — интенсивность оптического излучения

Оптическое излучение модулируется РЧ-сигналом, далее оптический сигнал делится на три части, каждая из которых ослабляется и задерживается. В зависимости от коэффициентов фильтра (a_0, a_1, a_2) и количества элементов задержки в каждом плече, можно изменять параметры радиофотонного фильтра.

Далее оптическое излучение в каждом плече объединяется в оптическом объединителе и поступает на фотоприемник. Представленная структурная схема радиофотонного фильтра совпадает с традиционной схемой КИХ-фильтра¹, используемой в цифровой обработке сигналов (ЦОС) [6].

При создании большинства оптических фильтров используются некогерентные ИОИ. Это позволяет избежать интерференции сигналов после мультиплексирования, что может вносить нежелательные искажения в полезный сигнал. Оптическая схема радиофотонного фильтра в некогерентном режиме работы обладает только положительными коэффициентами фильтра (a_0, a_1, a_2), так как по своей природе невозможно получить отрицательное значение интенсивности оптического излучения. Согласно теории обработки сигналов, радиофотонный фильтр с положительными коэффициентами будет обеспечивать пропускание низких частот и подавление высоких частот. Для ряда применений, например, для разделения и фильтрации РЧ-сигналов, необходимо использовать полосовые фильтры, фильтры верхних частот или заградительные фильтры, при этом их реализация невозможна без наличия отрицательных коэффициентов фильтра.

Для создания отрицательных коэффициентов фильтра наиболее распространенным методом является

дифференциальное детектирование. На рис. 3 представлена структурная схема радиофотонного фильтра (радиофотонный фильтр № 2) [3], которая является одной из наиболее простых схем дифференциального детектирования и позволяет наиболее просто объяснить принцип создания отрицательных коэффициентов фильтра.

Оптический фильтр состоит из ИОИ, модулятора, оптического разветвителя, аттенуаторов с коэффициентами ослабления b_0 и b_1 , линии задержки и двух фотодиодов. Оптическое излучение модулируется РЧ-сигналом, после ответвителя часть оптического излучения поступает в плечо с линией задержки, другая часть поступает в плечо без линии задержки. После оптоэлектронного преобразования производится вычитание одного сигнала из другого [3].

Недостатком схемы с дифференциальным детектированием является использование дополнительного оптоэлектронного преобразования для вычитания двух сигналов. Существуют схемы, которые позволяют получить отрицательные коэффициенты с использованием только оптических компонентов. Для этого используется модуляция с перекрестным усилением (МПУ) в полупроводниковом оптическом усилителе (ПОУ), но в таком случае ПОУ работает в нестандартном режиме. Обычно ПОУ усиливает слабые сигналы и работает в активном режиме, однако, в данном случае при усилении входного сигнала большой мощности ПОУ переходит в режим насыщения, при котором коэффициент усиления уменьшается. На данном принципе работают преобразователи длины волны в системах спектрального уплотнения каналов [5, 7]. На рис. 4 представлена структурная схема МПУ с использованием ПОУ.

На вход ПОУ поступают два оптических сигнала с различной длиной волны: первый сигнал (λ_p) осуществляет накачку ПОУ и является непрерывным, второй

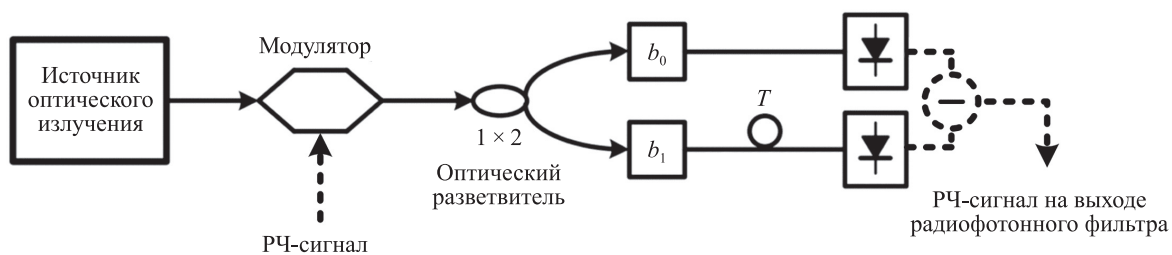


Рис. 3. Структурная схема радиофотонного фильтра с дифференциальным детектированием (радиофотонный фильтр № 2)

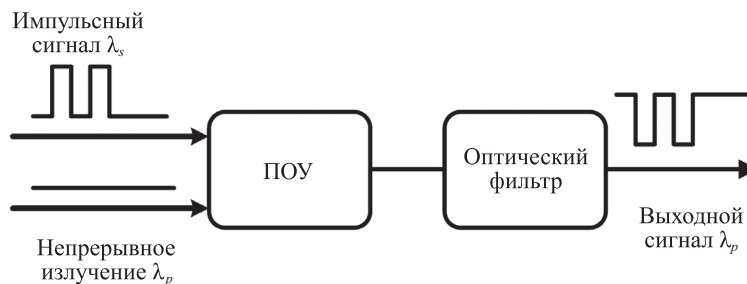


Рис. 4. Структурная схема модуляции с перекрестным усилением с использованием полупроводникового оптического усилителя

сигнал (λ_s) является импульсным [8, 9]. При отсутствии импульсного сигнала на выходе усилителя присутствует непрерывный оптический сигнал высокой мощности. При прохождении импульсного сигнала усиление ПОУ уменьшается, в связи с этим уменьшается и уровень оптической мощности непрерывного сигнала на выходе ПОУ. Для реализации МПУ используется оптический фильтр, который не пропускает исходное импульсное излучение (λ_s) [10–12]. На рис. 5 представлена схема радиофотонного фильтра (радиофотонный фильтр № 3) с использованием МПУ [8, 9].

Аналогичным способом создания отрицательных коэффициентов является использование лазерного диода Фабри–Перо (ЛДФП) с синхронизацией внешним сигналом (injection-locked) и массива ВБР (волоконной

брэгговской решетки), что было продемонстрировано в статье [13].

Структура фильтра (радиофотонный фильтр № 4) показана на рис. 6. Модулированный оптический сигнал разделяется на два канала. Сигнал в верхнем канале подается на фотоприемник через оптическую линию задержки. В нижнем канале сигнал подается на ЛДФП с синхронизацией внешним сигналом. ЛДФП работает с несколькими продольными модами [14]. При вводе излучения в ЛДФП происходит синхронизация одной моды, другие продольные моды испытывают перекрестную модуляцию интенсивности (ПМИ) по аналогии с МПУ в ПОУ. Таким образом, несинхронизированные продольные моды ЛДФП модулируются инжектированным оптическим излучением. Затем мо-

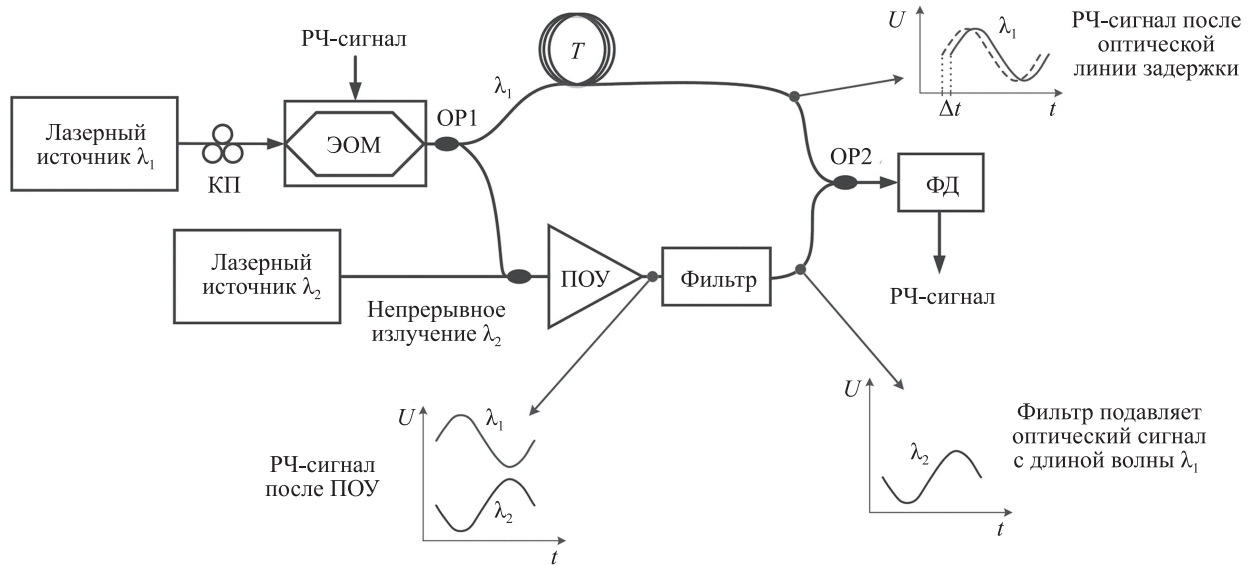


Рис. 5. Структурная схема радиофотонного фильтра с использованием модуляции с перекрестным усилением (радиофотонный фильтр № 3): КП — контроллер поляризации; ОР1 и ОР2 — оптические разветвители; U — напряжение; t — время; Δt — время задержки; λ_1 — неинвентурируемый сигнал; λ_2 — инвентурируемый сигнал

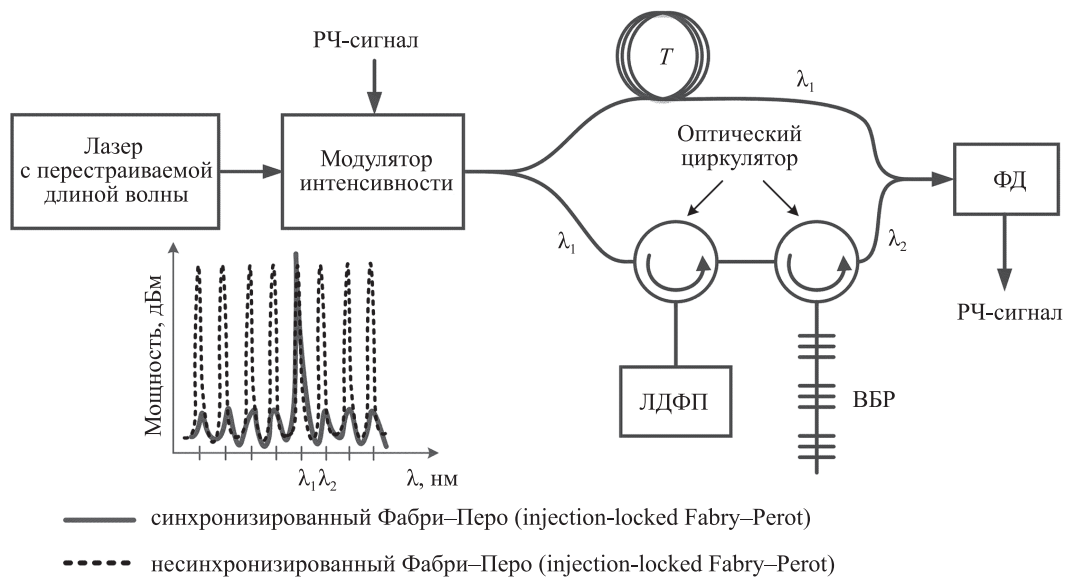


Рис. 6. Структурная схема радиофотонного фильтра с использованием перекрестной модуляции интенсивности и лазерного диода Фабри–Перо с синхронизацией внешним сигналом (радиофотонный фильтр № 4)

Таблица 1. Сопоставление основных параметров представленных радиофотонных фильтров

Номер фильтра	Основная особенность	Возможность создания отрицательных коэффициентов	Сложность реализации	Стоимость
1	Традиционная схема КИХ-фильтра, которая широко используется в ЦОС	Нет	Просто	Низкая
2	Использование оптоэлектронного преобразования для вычитания двух выходных сигналов	Да	Средняя сложность	Средняя
3	МПУ в ПОУ работает в нестандартном режиме — в режиме насыщения	Да	Сложно	Высокая
4	ПМИ с использованием ЛДФП	Да	Сложно	Высокая

дулированное излучение фильтруется ВБР и вместе с оптическим излучением верхнего плеча попадает на фотоприемное устройство [15].

Представленные радиофотонные фильтры обладают своими особенностями, отличаются в сложности реализации, стоимости и принципах работы. Сопоставление основных параметров представлено в табл. 1.

Данный раздел кратко описывает технологии создания радиофотонных фильтров, которые являются ключевыми элементами большинства РФВОИП. Использование широко распространенного принципа построения цифровых фильтров позволило осуществить высокоскоростную обработку РЧ-сигналов с использованием волоконно-оптических компонентов. Дальнейшее совершенствование радиофотонных технологий дало возможность реализовать более сложные радиофотонные фильтры, которые, несмотря на их сложность и дороговизну, широко используются в данной области ввиду своих уникальных характеристик. Помимо показанных в данном разделе типов радиофотонных фильтров существуют и другие, однако, представленные принципы построения являются общими для всех существующих фильтров и необходимы для дальнейшего анализа РФВОИП.

Спектральные радиофотонные волоконно-оптические измерительные приборы

Принципы построения радиофотонных фильтров нашли широкое применение при построении спектральных и интерферометрических РФВОИП. В спектральных типах датчиков ИОИ является некогерентным, а детектирование воздействия физических величин определяется по изменению центральной длины волны и формы спектра оптического излучения. Оптоэлектронный генератор (ОЭГ) — одно из наиболее распространенных устройств, которое обеспечивает генерацию колебаний УВЧ- и СВЧ-диапазонов. Один из главных недостатков традиционных генераторов — уменьшение добротности резонансного контура, приводящее к повышению фазовых шумов при увеличении частотной полосы перестраивания [16]. Преимуществами ОЭГ являются высокая стабильность, широкая частотная полоса перестраивания (от 100 МГц до 100 ГГц), а также низкий уровень фазовых шумов [17]. На рис. 7 [18] представлена схема детектирования РЧ-сигнала на основе оптоэлектронного генератора (спектральный РФВОИП № 1). Основные элементы данной схемы: настраиваемый ИОИ, фазовый модуля-

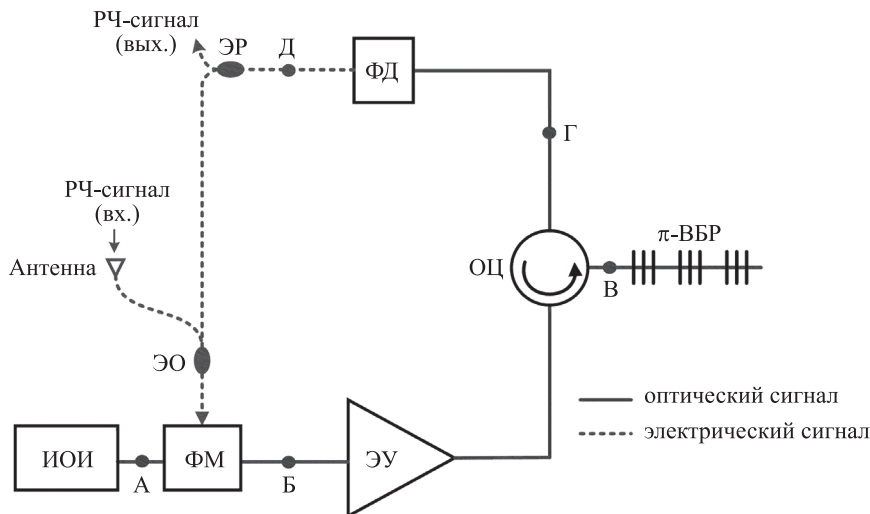


Рис. 7. Детектирование РЧ-сигнала заданной частоты с использованием оптоэлектронного генератора (спектральный РФВОИП № 1), где А, Б, В, Г, Д — участки схемы, на которых необходимо рассмотреть спектры оптического и электрического сигналов

тор (ФМ), эрбиевый усилитель (ЭУ), ВБР с π -сдвигом (π -ВБР), оптический циркулятор (ОЦ), фотодиод (ФД), электрический разветвитель (ЭР) сигналов, антенна и электрический объединитель (ЭО) сигналов [19]. Преимущество данной схемы — чувствительность к РЧ-сигналам малой мощности (менее -91 дБм) [20, 21].

На рис. 8 представлен принцип действия данной схемы. Изображенные рисунки показывают спектры оптического сигнала на разных участках схемы (рис. 7). На рис. 8, *а* изображен оптический спектр настраиваемого ИОИ, после фазовой модуляции в спектре появляются боковые полосы, направление которых указывает на разницу фаз π между верхней и нижней боковыми полосами (рис. 8, *б*). Затем оптический сигнал усиливается и попадает на оптический циркулятор, один из портов которого подключен к π -ВБР. На рис. 8, *в* представлен спектр модулированного оптического сигнала и спектр отражения π -ВБР, который имеет узкий спектр пропускания (благодаря сдвигу фаз π между несколькими одинаковыми ВБР). Принцип работы ОЭГ заключается в самовозбуждении колебаний СВЧ-диапазона на частоте, выделенной с использованием оптического фильтра [16]. Это происходит в результате преобразования фазовой модуляции, при которой происходит изменение частоты оптической несущей в модуляцию интенсивности, которую способен детектировать фотоприемник [22]. При фазовой модуляции частота оптической несущей изменяется в диапазоне от $(f_{\text{ц}} - f_{\text{рч}})$ до $(f_{\text{ц}} + f_{\text{рч}})$. В зависимости от частоты РЧ-сигнала может возникнуть такая ситуация, при которой оптическое излучение с частотой $(f_{\text{ц}} + f_{\text{рч}})$ пройдет через π -ВБР без отражения, вследствие чего уменьшится интенсивность на фотоприемнике. На рис. 8, *з* представлена ситуация, при которой оптическое излучение на частоте $(f_{\text{ц}} + f_{\text{рч}})$ не отразилось от π -ВБР. Уменьшение интенсивности является причиной возникновения модуляции интенсивности, что детектируется фотоприемным устройством (рис. 8, *д*) [18].

Наличие положительной обратной связи (ПОС) обеспечивает генерацию РЧ-колебаний. Оптический фильтр подбирается таким образом, чтобы полоса пропускания совпадала с частотой детектируемого РЧ-сигнала, в противном случае РЧ-сигнал не попадает в петлю ПОС, и колебания затухают. Максимальная глубина модуляции обеспечивается настройкой схемы ОЭГ на РЧ-сигнал заданной частоты.

На данном принципе основан датчик деформаций, представленный на рис. 9 (спектральный РФВОИП № 2). В таком случае π -ВБР расположена на пьезоподвижке, позволяющей регулировать удлинение участка волокна. В зависимости от приложенного к пьезоподвижке электрического напряжения происходит изменение центральной частоты режекторного фильтра на основе π -ВБР, тем самым изменяется центральная частота сигнала, поступающего на спектральный анализатор.

Частота работы ОЭГ зависит от воздействия на π -ВБР. Пьезоподвижка необходима для построения зависимостей смещения центральной частоты РФВОИП на основе ОЭГ от деформации π -ВБР. В случае использования данного датчика для реальных применений пьезоподвижка не используется. Вместо пьезоподвижки π -ВБР фиксируется на изделии, деформацию которого нужно измерить.

Необходимо обратить внимание на электрический сигнал, поступающий на ФМ. Линия задержки в одном из плеч ФМ позволяет реализовать дополнительный фильтр с двумя коэффициентами, чтобы дополнительно уменьшить полосу пропускания РФВОИП на основе ОЭГ. На рис. 10 представлены результаты проведенных экспериментов [23, 24]. Из графиков видна зависимость частоты ОЭГ от удлинения π -ВБР, частота микроволнового сигнала изменяется от 7 до 17 ГГц при деформации π -ВБР от нуля до 49 мкм/м.

В последние несколько лет широкое распространение получили РФВОИП на основе поляризацион-

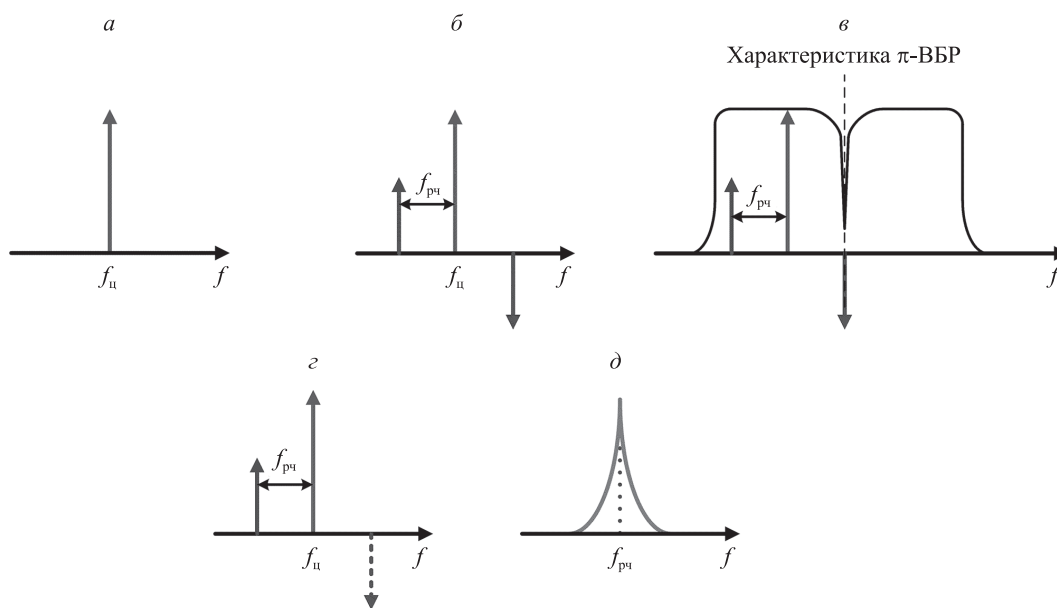


Рис. 8. Оптические спектры оптоэлектронного генератора в разных точках схемы (а–д), где $f_{\text{ц}}$ — частота оптической несущей; $f_{\text{рч}}$ — частота РЧ-сигнала

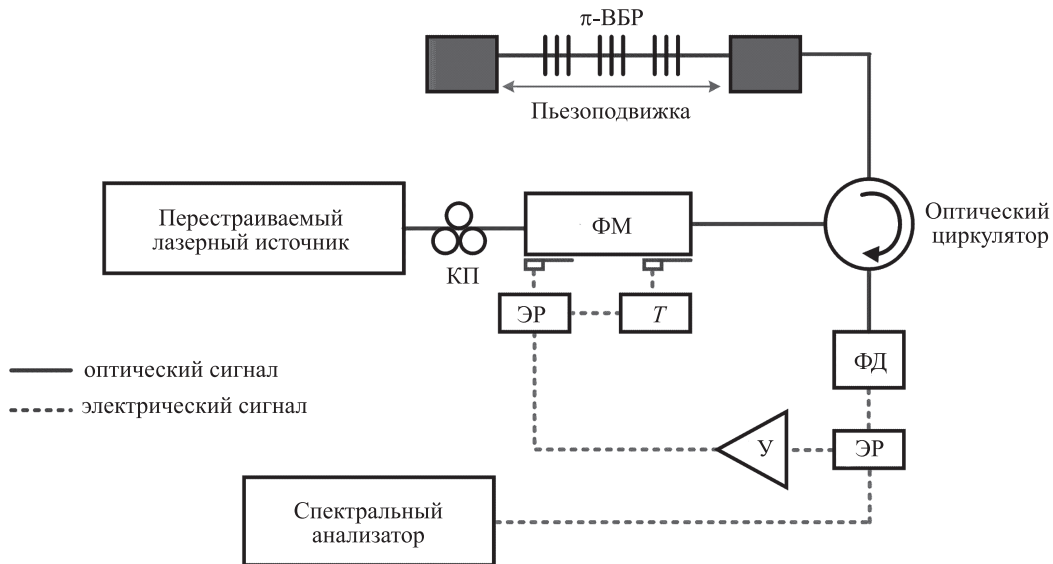


Рис. 9. Радиофотонный волоконно-оптический измерительный прибор на основе оптоэлектронного генератора для измерения деформаций (спектральный РФВОИП № 2), где КП — контроллер поляризации; У — электрический усилитель [23, 24]

ной модуляции [25]. В статье [26] демонстрируется новая структура РФВОИП на основе радиофотонного фильтра, ключевой особенностью которого является технология мультиплексирования с поляризационным разделением и поляризационной модуляцией. Представленный РФВОИП на основе радиофотонного фильтра имеет регулируемую временную задержку и переменную ширину спектра, такой фильтр имеет большой рабочий диапазон частот и обеспечивает возможность настраивать центральную частоту без изменения конфигурации схемы [7, 26, 27]. На рис. 11 представлена схема РФВОИП на основе радиофотонного полосового фильтра (спектральный РФВОИП № 3) [26].

Принцип работы подобного рода РФВОИП может быть затруднен для понимания. В основе принципа работы данного измерительного прибора лежит поляризационный интерферометр Маха–Цендера, а основными его составляющими являются блок поляризационного мультиплексирования с разделением поляризаций (ПМРП) и поляризационный модулятор (ПМ). Блок ПМРП вносит постоянную задержку между ортогональными поляризациями с помощью настраиваемой

линии задержки (НЛЗ), в зависимости от которой меняется рабочая точка и период интерференционной картины, а воздействие РЧ-сигнала на ПМ изменяет интенсивность интерференционной картины по косинусоидальному закону. Таким образом, с определенной долей условности, можно сказать, что данный РФВОИП представляет собой фазо-модулируемый поляризационный интерферометр с регулируемой фазовой задержкой.

В представленном на рис. 11 РФВОИП используется широкополосный источник оптического излучения (ШИОИ), ширина спектра которого задается встроенным перестраиваемым оптическим фильтром с прямоугольной частотной характеристикой. Далее ШИОИ поляризуется с помощью поляризатора (Пол.1) для ввода оптического излучения в поляризационный контроллер (КП1). Линейно-поляризованная световая волна попадает на устройство разделения поляризации (УРП) и разделяется на две ортогонально поляризованные световые волны, мощности которых двух ортогонально поляризованных световых волн уравниваются настройкой КП1.

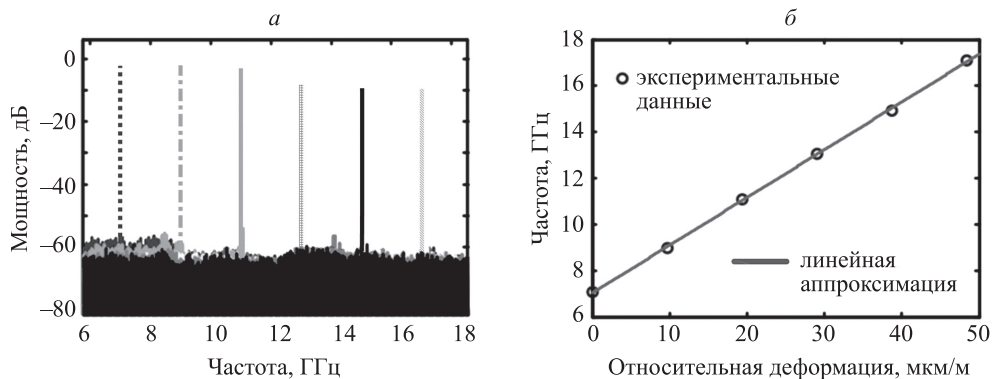


Рис. 10. Частотные спектры оптоэлектронного генератора при разной деформации π -ВБР (а); зависимость частоты оптоэлектронного генератора от относительной деформации π -ВБР (б)

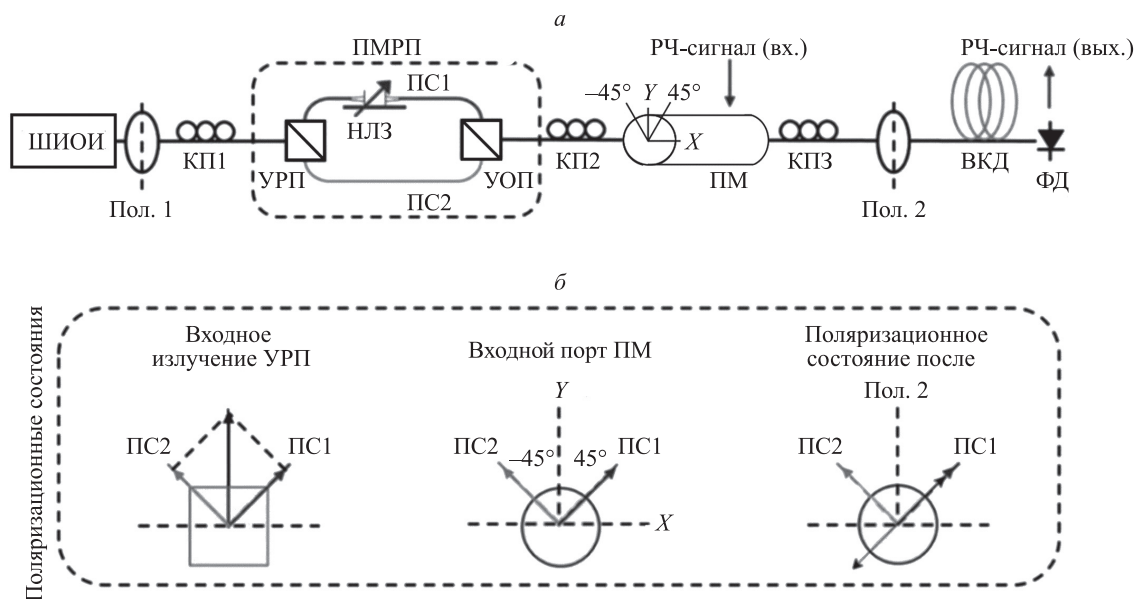


Рис. 11. Структурная схема радиофотонного волоконно-оптического измерительного прибора на основе радиофотонного полосового фильтра (а); ориентация поляризационных мод (спектральный РФВОИП № 3) (б)

Одна из двух ортогонально поляризованных световых волн направляется в измерительное плечо с поляризационным состоянием 1 (ПС1). Вторая световая волна распространяется по опорному плечу с поляризационным состоянием 2 (ПС2). Затем обе световые волны объединяются в устройстве объединения поляризаций (УОП), однако они не интерферируют из-за ортогональных поляризаций. Объединенные ортогональные световые волны отправляются на контроллер поляризации КП2 и ориентируются под углом $\pm 45^\circ$ к одной из основных осей ПМ, для того чтобы мощности на входе в ПМ обеих поляризационных мод были равны. ПМ представляет собой ФМ с противоположными индексами модуляции для каждой из двух осей (X и Y).

Ортогональные световые волны объединяются в ПМ под углом $\pm 45^\circ$ к оси Y и интерферируют. Изменение разности фаз между световыми волнами осуществляется с помощью модуляции РЧ-сигналом. Затем интерференционный сигнал с поляризационной модуляцией поступает на поляризатор Пол. 2, который ориентирован под тем же углом, что поляризация в измерительном плече датчика ПС1. Оптическое излучение с направлением поляризации, параллельным оси Пол. 2, проходит через него, а оптическое излучение с ортогональной поляризацией относительно оси Пол. 2 будет заблокировано. Оптическое излучение после поляризатора Пол. 2 распространяется через волокно с компенсацией дисперсии (ВКД) и детектируется фотодиодом ФД. Для удобства анализа полученного сигнала используется преобразование Фурье. Оптическое излучение на выходе поляризатора Пол. 2 выражается с помощью функций Бесселя [26]:

$$E_{\text{пол.2}}(\Omega) \propto J_0(\beta)E(\Omega)e^{-j\Omega\Delta\tau} + jJ_1(\beta)[E(\Omega - \omega_m) + E(\Omega + \omega_m)], \quad (1)$$

где \propto — символ пропорциональности; j — мнимая единица; J_n — функции Бесселя; β — индекс фазовой

модуляции ($\beta = \pi V_m/V_\pi$); V_m — напряжение модуляции; V_π — полуволновое напряжение; $\Delta\tau$ — временная задержка оптического излучения между опорным и измерительным плечами; E — напряженность электрического поля; ω_m — частота модуляции; Ω — частота оптической несущей.

Первое слагаемое $J_0(\beta)E(\Omega)e^{-j\Omega\Delta\tau}$ трансформировалось из оптической компоненты с поляризационным состоянием ПС1, тем самым в большей степени на данное слагаемое влияет временная задержка измерительного плеча. В частотной области первое слагаемое следует интерпретировать как оптическую несущую. Остальные слагаемые $jJ_1(\beta)[E(\Omega - \omega_m) + E(\Omega + \omega_m)]$ получены из оптической компоненты с поляризационным состоянием ПС2 и в частотной области являются верхней и нижней боковыми полосами. Формула (1) позволяет оценить изменение фазы оптической несущей для каждой частоты оптического спектра при неизменности фазы боковых полос.

На рис. 12 представлено изменение фазы оптической несущей для нескольких частот оптического спектра.

Угол φ (рис. 12) изменяется периодически при варьировании частоты оптического спектра, это приводит к непрерывному изменению фазы для всех частот оптического спектра. Данный процесс является причиной возникновения модуляции интенсивности. Эта модуляция может быть детектирована фотоприемным устройством (рис. 13).

Периодичность изменения фазы оптической несущей определяется временной задержкой $\Delta\tau$, которая может быть настроена путем изменения длины измерительного плеча. ВКД позволяет преобразовать оптический сигнал из частотной области во временную, для того чтобы детектировать сигнал фотоприемником.

На рис. 14 представлено преобразование оптического сигнала из частотной области во временную [28].

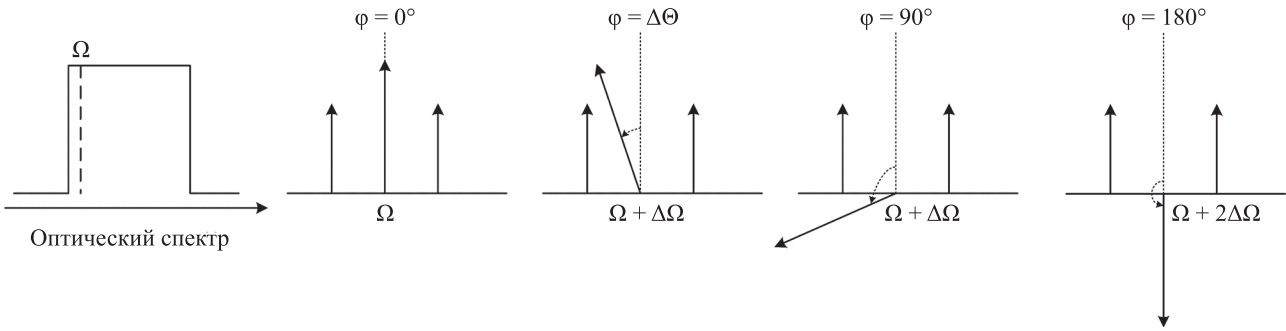


Рис. 12. Изменение фазы оптической несущей для нескольких частот оптического спектра: Ω — частотная составляющая оптического спектра; $\Delta\Omega$ — изменение частотной составляющей оптического спектра; φ — фаза частотной составляющей оптического спектра; $\Delta\Theta$ — изменение фазы частотной составляющей оптического спектра

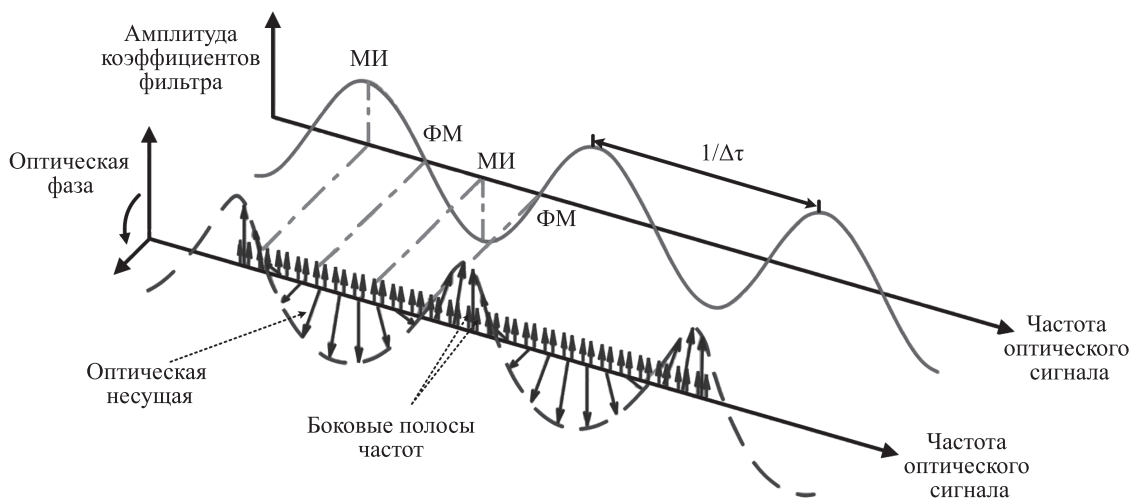


Рис. 13. Непрерывное чередование модуляции интенсивности (МИ) и фазовой модуляции (ФМ) в частотной области

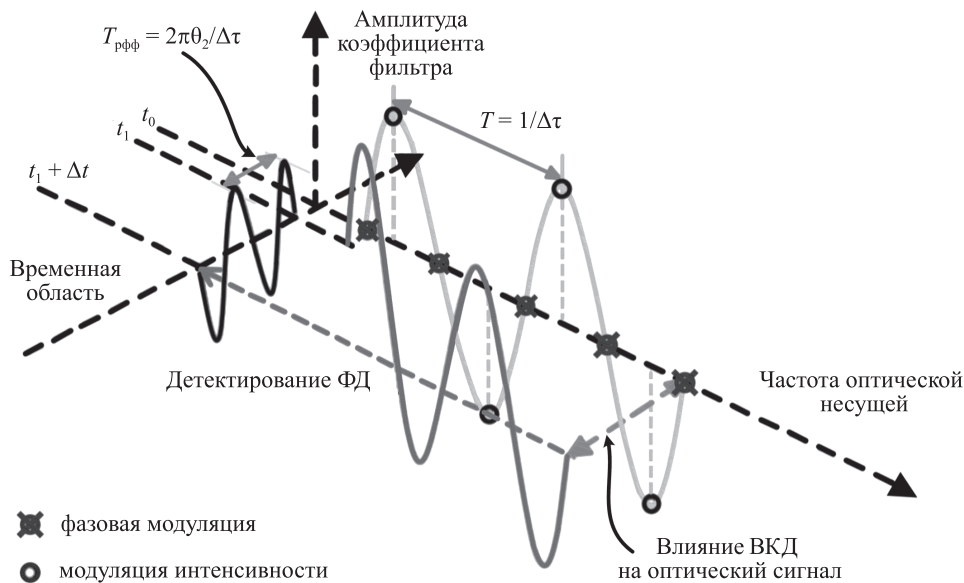


Рис. 14. Схема, поясняющая механизм преобразования оптического сигнала из частотной области во временную: $T_{рфф} = 2\pi\theta_2/\Delta\tau$ — период оптического сигнала во временной области; θ_2 — общая дисперсия; T — период сигнала в частотной области; t_0 — нулевой момент времени; t_1 — время, которое соответствует появлению оптического сигнала во временной области; Δt — длительность оптического сигнала во временной области [26]

Для того чтобы оценить РФВОИП на основе радиопотонного полосового фильтра, авторами ряда работ [26, 28] был проведен частотный анализ импульсной характеристики с использованием преобразования Фурье. На рис. 15 представлена нормированная амплитудно-частотная характеристика радиопотонного полосового фильтра (рис. 15, а) при различной ширине спектра ИОИ (рис. 15, б) [26]. Изменяя форму спектра ШИОИ, можно добиться плоской частотной характеристики полосового фильтра [29, 30].

На рис. 16 представлена амплитудно-частотная характеристика радиопотонного полосового фильтра в зависимости от временной задержки на НЛЗ от 0 до 71,4 пс при изменении центральной частоты полосового фильтра от 0 до 20 ГГц.

На данном принципе основан датчик деформаций, воздействие на измерительное плечо является причиной изменения центральной длины волны радиопотонного фильтра. На рис. 17 представлена зависимость изменения центральной длины волны радиопотонного фильтра от изменения длины измерительного плеча [31].

Представленные в данном разделе РФВОИП могут использоваться для многих задач в качестве датчиков абсолютных и относительных деформаций, давления, температуры. В табл. 2 представлены достоинства и недостатки описанных РФВОИП.

В разделе произведен анализ наиболее распространенных спектральных РФВОИП. Отдельным типом можно выделить датчики на основе схем ОЭГ, которые позволяют детектировать сигналы мощностью менее -91 дБм, снизить уровень фазовых шумов по сравнению с традиционными генераторами, а также усилить входной сигнал малой мощности на 10 дБ. Следующий тип спектральных РФВОИП создан на основе полосового фильтра, чья конструкция и принцип действия представляют новый подход к созданию радиопотонных фильтров. Преимуществом всех спектральных РФВОИП является отсутствие интерференционного сигнала, что упрощает процесс настройки таких устройств и стоимость оборудования на их основе, однако их точности может быть недостаточно для некоторых практических приложений.

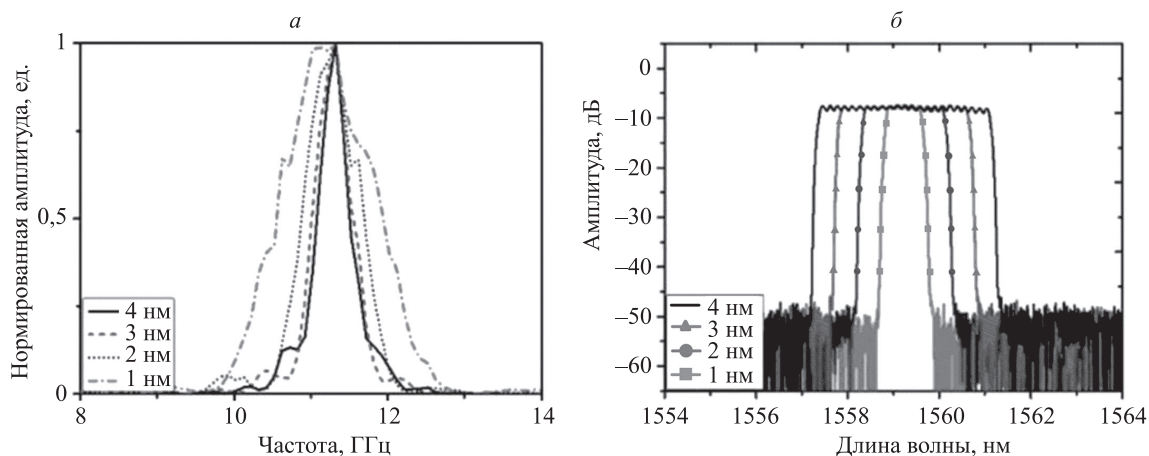


Рис. 15. Амплитудно-частотная характеристика радиопотонного полосового фильтра (а) при различной ширине спектра источника оптического излучения (б)

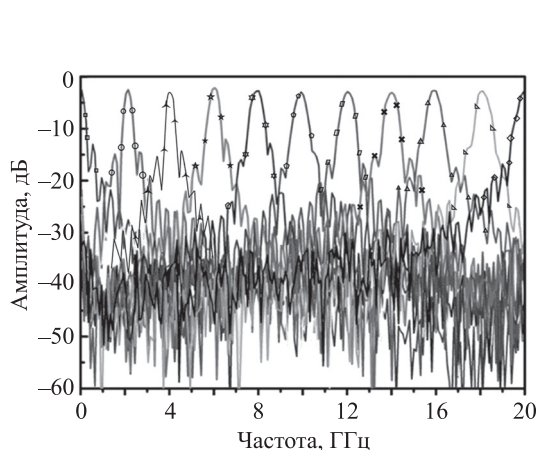


Рис. 16. Амплитудно-частотная характеристика радиопотонного полосового фильтра при изменении временной задержки от 0 до 71,4 пс

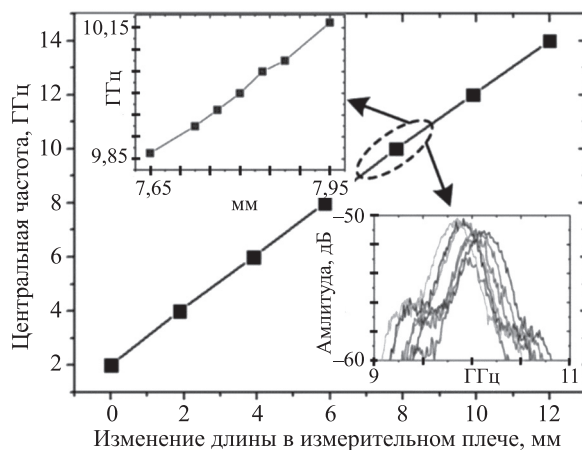


Рис. 17. Зависимость центральной длины волны радиопотонного фильтра от изменения длины в измерительном плече

Таблица 2. Достоинства и недостатки спектральных РФВОИП

Номер фильтра	Основная особенность	Достоинства	Недостатки
1	Использование ОЭГ и антенны для РЧ-сигнала	Большой динамический диапазон. Возможность детектирования слабого сигнала мощностью менее -91 дБм. Усиление сигнала на 10 дБ. Точность детектирования ±100 МГц	Нет возможности динамического изменения параметров полосового фильтра
2	Использование ОЭГ. Наличие дополнительного фильтра с двумя коэффициентами на входе ФМ в цепи обратной связи	Возможность динамического изменения центральной частоты полосового фильтра за счет пьезоподвижки. Наличие дополнительного фильтра в петле обратной связи	Ширина полосы пропускания фиксирована и зависит от параметров π-ВБР. Необходимо наличие пьезоподвижки для точного изменения центральной частоты полосового фильтра
3	Настройка центральной частоты и полосы пропускания регулируется изменением ширины спектра ШИОИ и изменением длины НЛЗ	Возможность изменения параметров РФВОИП с помощью регулировки ширины спектра ШИОИ и изменения длины НЛЗ	Сложность реализации схемы, наличие дорогостоящих оптических элементов

Интерферометрические радиотонные волоконно-оптические измерительные приборы

Данный тип датчиков обладает большей чувствительностью по сравнению со спектральными РФВОИП, поэтому подобного рода системы получили большее распространение. Одним из наиболее распространенных интерферометрических РФВОИП является датчик перемещения, основой которого является интерферометр Майкельсона (интерферометрический РФВОИП № 1) (рис. 18) [32].

Преимуществом данного РФВОИП является повышенная стабильность по сравнению с существующими датчиками других типов [33–40].

В опорном плече интерферометра Майкельсона используется зеркало Фарадея для компенсации фазового набега, в измерительном плече – коллиматор для получения параллельного пучка. Также в схеме данного прибора используется зеркало на подвижке с максимальным удалением 3 м, минимальный шаг подвижки составляет около 1 мкм. Для регулирования мощности оптического излучения в каждом плече интерферометра Майкельсона используются настраиваемые оптические аттенюаторы (НОА). Изменение положения зеркала в измерительном плече РФВОИП является причиной

изменения фазы оптического излучения, что приводит к изменению интерференционной картины РЧ-сигнала. Частотная характеристика датчика перемещения представлена формулой (2) и характеризуется периодическим спектром.

$$H(f_m) \propto 1 + \left(\sin \left(\frac{4\pi f_m L}{c} \right) \right), \quad (2)$$

где $H(f_m)$ — передаточная функция фильтра в частотной области, f_m — частота РЧ-сигнала, L — расстояние между коллиматором и зеркалом, c — скорость света.

На рис. 19 представлена частотная характеристика, полученная с помощью ВАЦ до и после смещения зеркала. В зависимости от положения зеркала изменяется период частотной характеристики. Свободный спектральный диапазон (ССД) (или расстояние между соседними пиками частотной характеристики) имеет максимальную величину в том случае, если расстояние от коллиматора до зеркала минимально, однако для данного применения необходимо использовать ВАЦ с шириной полосы более 10 ГГц. В противном случае даже один период частотной характеристики не поместится в заданной полосе частот.

Требования к ширине полосы ВАЦ можно уменьшить при использовании временной задержки в одном

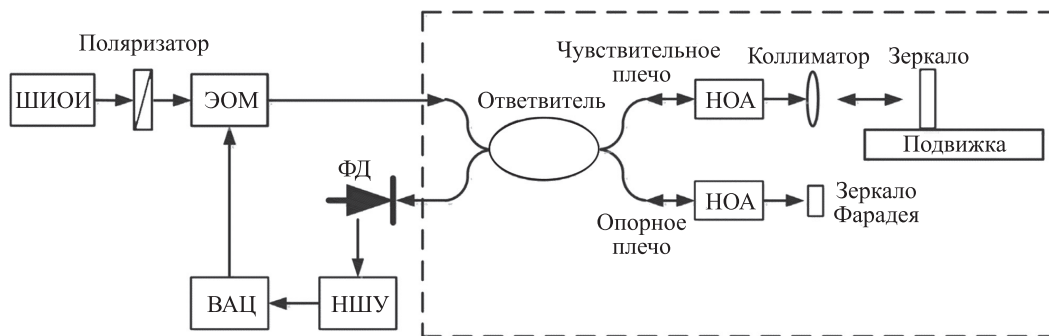


Рис. 18. Структурная схема датчика перемещения на основе интерферометра Майкельсона (интерферометрический РФВОИП № 1): ВАЦ — векторный анализатор цепей; НШУ — низкошумящий усилитель; НОА — настраиваемый оптический аттенюатор

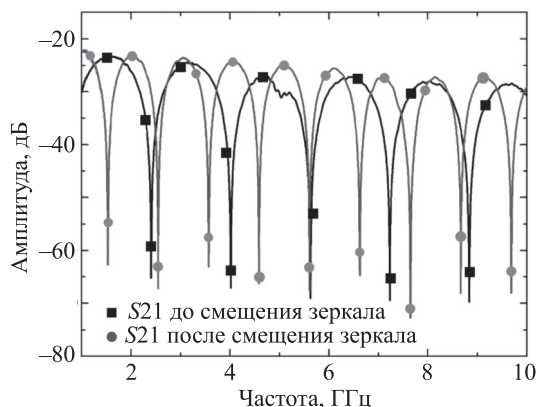


Рис. 19. Частотная характеристика коэффициента передачи S21 до и после смещения зеркала

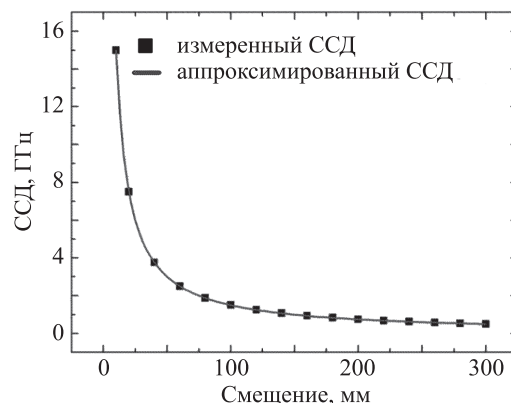


Рис. 20. Зависимость свободного спектрального диапазона от смещения зеркала

из плеч интерферометра Майкельсона, путем увеличения разности оптического хода между опорным и измерительным плечами. В работе [32] для этого используется 2-битная программируемая линия задержки на основе микроэлектромеханической системы (МЭМС).

Расстояние между пиками частотной характеристики уменьшается при увеличении расстояния от зеркала до коллиматора. На рис. 20 представлена зависимость ССД от смещения зеркала. Для определения смещения можно воспользоваться формулой:

$$\Delta L = \frac{c}{2} \left(\frac{1}{\Delta f_{m1}} - \frac{1}{\Delta f_{m2}} \right),$$

где ΔL — изменение расстояния между коллиматором и зеркалом; Δf_{m1} — ССД до смещения зеркала; Δf_{m2} — ССД после смещения зеркала; c — скорость света.

Представленный датчик смещения способен обеспечить детектирование смещения до 3 м с разрешением около 30 мкм [32]. Интерферометрические РФВОИП могут быть созданы с использованием ВБР. В подобных датчиках в качестве чувствительного элемента используется массив ВБР либо ВБР, длина которой составляет около нескольких десятков сантиметров. Такие датчики применяются для определения воздействия в несколь-

ких местах ВБР, поэтому подобные приборы могут использоваться для определения трещин в конструкциях зданий, измерений деформаций вдоль протяженных объектов и т. д.

В основе подобных датчиков также используются радиофотонные фильтры (принцип аналогичен рис. 2). Пространственное разрешение таких датчиков может достигать 0,5 мм [5, 27]. На рис. 21 представлен квази-распределенный датчик (интерферометрический РФВОИП № 2), основанный на данном принципе [2, 41].

В представленной реализации датчика используется длинная ВБР (около 10 см) с коэффициентом отражения 99 %, ширина по уровню половины амплитуды составляет 14 ГГц (112 пм), длина волны ВБР 1554 нм. В качестве ИОИ используется полупроводниковый ШИОИ, ширина спектра устанавливается с помощью полосового фильтра с шириной полосы пропускания около 0,45 нм, центральная частота 1554 нм. Конфигурация фильтра подбирается таким образом, чтобы не допустить интерференцию сигналов, отраженных от мест воздействий на массив ВБР.

Из-за высокого коэффициента отражения ВБР большая часть излучения отражается от ее начала, а воздействие, оказанное на ВБР (температура, давление, вибрация, растяжение, сжатие), приводит к локальному

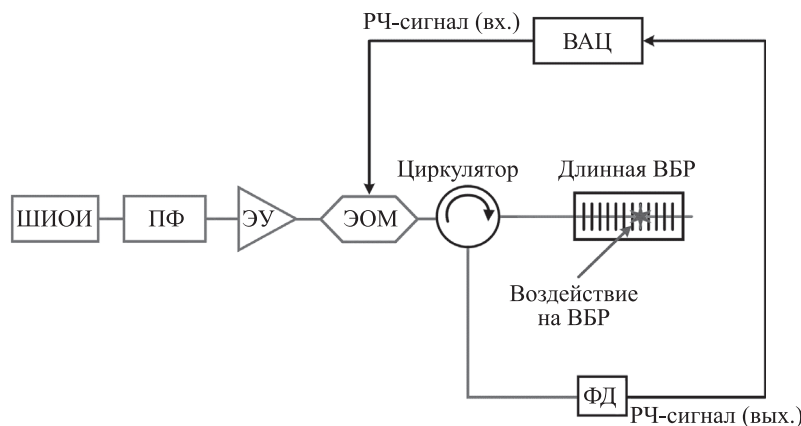


Рис. 21. Радиофотонный волоконно-оптический измерительный прибор интерференционного типа с использованием длинной волоконной брэгговской решетки (около 10 см) (интерферометрический РФВОИП № 2), где ПФ — полосовой фильтр

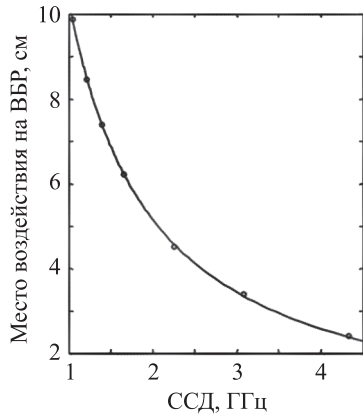


Рис. 22. Зависимость свободного спектрального диапазона от места воздействия на волоконную брэгговскую решетку

изменению длины волны на участке ВБР и возникновению дополнительного отраженного сигнала в месте воздействия. В таком случае возникает резонанс внутри ВБР. На рис. 22 представлена зависимость ССД от места воздействия на ВБР квази-распределенного интерферометрического датчика. В зависимости от места воздействия внешнего фактора изменяется ширина ССД, а также величина интерференционных минимумов.

Воздействие на ВБР может быть оказано в нескольких местах. Для того чтобы рассчитать расстояние до места воздействия, используется обратное преобразование Фурье. При использовании данного преобразования результатом является импульсная характеристика радиофотонного фильтра во временной области, что представлено на рис. 23 [41]. Расстояние до места воздействия рассчитывается с учетом времени распространения сигнала до места воздействия и скорости распространения света в оптическом волокне.

Тем не менее, подобный РФВОИП нельзя применять во многих случаях. В связи с большим коэффициентом отражения ВБР большая часть оптического излучения отражается, поэтому не представляется возможным использовать данный тип РФВОИП для измерений на большие расстояния при множествен-

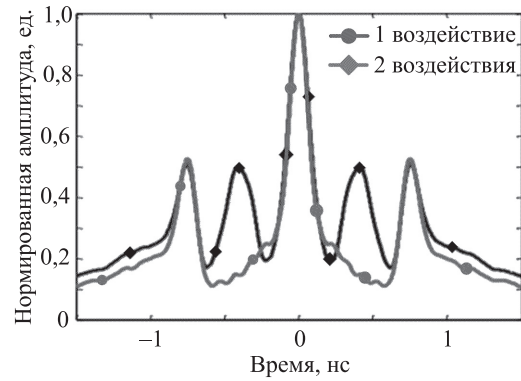


Рис. 23. Импульсная характеристика радиофотонного фильтра позволяет определить число воздействий на волоконную брэгговскую решетку

ных воздействиях внешних факторов на ВБР. Для того чтобы преодолеть существующее ограничение, используются схемы на основе ВБР с малым коэффициентом отражения (коэффициент отражения менее одной десятой) [2, 42].

Также возможны конфигурации подобных РФВОИП с использованием дисперсионного волокна и ВБР на одинаковые или на разные длины волн [2, 43]. На рис. 24 представлена структурная схема РФВОИП с ВБР с малым коэффициентом отражения (около 0,001) и ВКД (интерферометрический РФВОИП № 3) [43].

Радиофотонные датчики на основе ВБР с малым коэффициентом отражения подходят для измерения воздействий внешних факторов на длинных участках волокна в связи с малыми потерями при прохождении оптического излучения, а также применимы в ряде приложений, где критично использование РФВОИП с сильной ВБР.

В работе [44] представлен новый метод мультиплексирования сигналов волоконно-оптических интерферометрических датчиков, на основе которого создана распределенная радиофотонная волоконно-оптическая измерительная система. В данной работе в качестве чувствительных элементов используются внешние интерферометры Фабри–Перо (ВИФП). На рис. 25 пред-

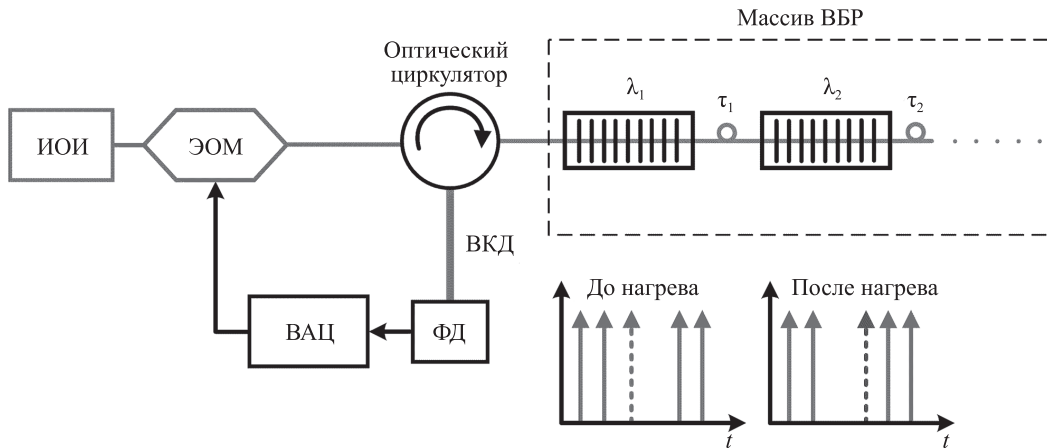


Рис. 24. Структурная схема распределенного радиофотонного датчика на основе массива волоконных брэгговских решеток с малым коэффициентом отражения (0,1 %) и волокном с компенсацией дисперсии (интерферометрический РФВОИП № 3), где τ_1, τ_2 — элементы задержки оптического излучения

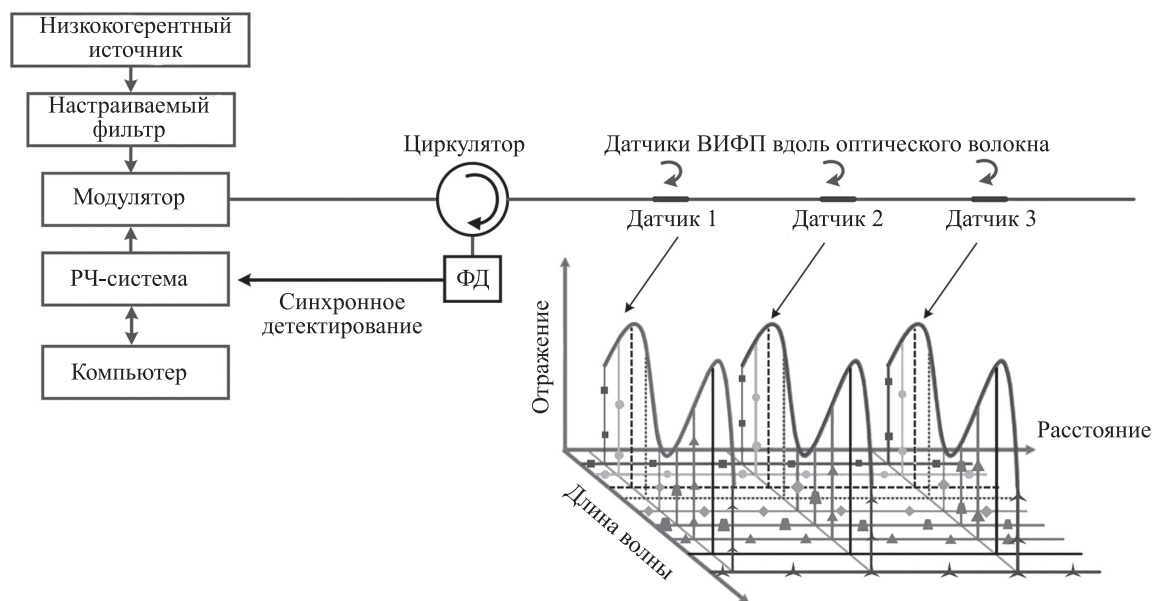


Рис. 25. Распределенная радиофотонная волоконно-оптическая измерительная система (интерферометрический РФВОИП № 4)

ставлена структурная схема распределенной радиофотонной волоконно-оптической измерительной системы (интерферометрический РФВОИП № 4) [44].

Система содержит низкокогерентный ИОИ, настраиваемый полосовой фильтр и модулятор. На модулятор поступает РЧ-сигнал, который модулирует оптический сигнал. Коэффициент отражения ВИФП подбирается таким образом, чтобы оптическое излучение распространялось по оптическому волокну с минимальными потерями. Длина когерентности определяется шириной спектра оптического излучения и подбирается таким образом, чтобы быть больше разницы оптических путей ВИФП и меньше, чем расстояние между соседними датчиками. Таким образом, интерференция возникает только в рамках одного датчика, между соседними ВИФП интерференция не наблюдается. Оптический сигнал, который представляет собой суперпозицию всех каскадов ВИФП, выражается формулой:

$$Y = \sum_{j=1}^N I_0 R_j [1 + M \cos(\omega(t + \tau_j))],$$

где I_0 — интенсивность источника оптического излучения; R_j — коэффициент отражения от ВИФП; M — индекс модуляции; j — номер ВИФП; t — время; ω — частота РЧ-сигнала; τ_j — временная задержка распространения излучения от чувствительного элемента до ФД; N — количество ВИФП.

Для анализа представленной схемы в УВЧ- и СВЧ-диапазонах используется ВАЦ. Для данных целей может быть использовано синхронное детектирование, с помощью которого строится комплексный РЧ-спектр отраженного излучения.

При использовании комплексного обратного преобразования Фурье к РЧ-спектру получается серия дискретных по времени дельта-функций. Полученные дельта-функции пропорциональны отраженным от ВИФП сигналам на определенной длине волны. При

изменении центральной длины волны оптического излучения и повторном сканировании с помощью синхронного детектирования или ВАЦ, можно построить дискретные оптические интерференционные сигналы, разделенные во временной области для разных длин волн. Эти данные могут использоваться в дальнейшем для построения трехмерных оптических интерферограмм ВИФП. На рис. 26, а представлен сигнал после применения комплексного обратного преобразования Фурье, а на рис. 26, б–г изображены нормированные оптические интерферограммы трех ВИФП в сравнении с их спектрами, измеренными оптическим спектроанализатором [44].

Восстановленные по данным синхронного детектирования интерферограммы трех ВИФП хорошо совпадают со спектрами, полученными с использованием оптического спектроанализатора. По предположениям авторов работы [44], разница в спектрах обусловлена неравномерным усилением ЭУ, который использовался в экспериментах. Полученные спектры были нормированы для их сравнения. На рис. 27 представлены зависимости при растяжении второго ВИФП. Преимуществом данного устройства является способность мультиплексировать сигналы с большого количества датчиков. По сравнению с традиционным спектральным мультиплексированием количество датчиков не ограничено шириной спектра оптического излучения.

Пространственное разрешение зависит от расстояния между датчиками и полосы частот генератора ВАЦ:

$$\Delta D_{\min} = \frac{1}{2B_{RF}} v,$$

где ΔD_{\min} — пространственное разрешение; B_{RF} — это ширина полосы ВАЦ; v — групповая скорость модулированного РЧ-сигналом оптического излучения.

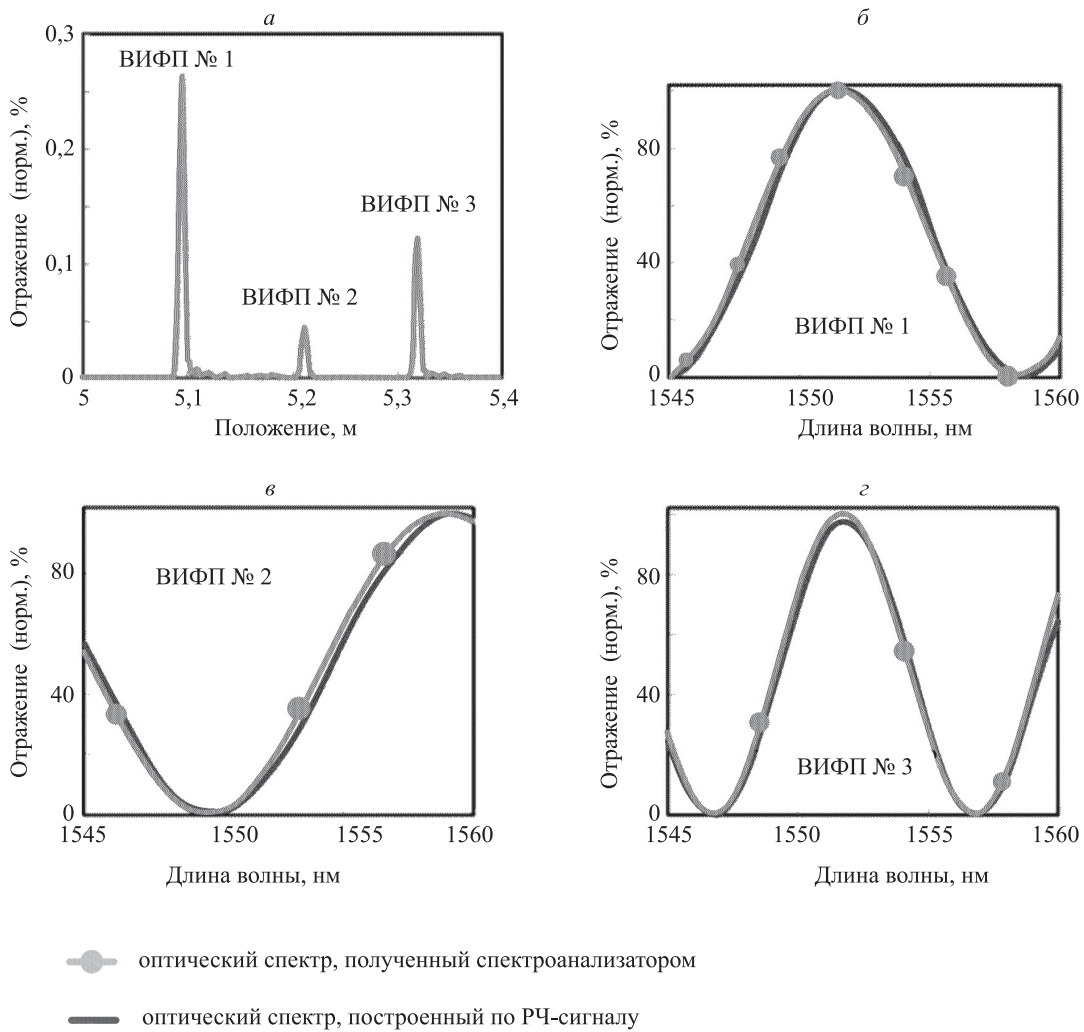


Рис. 26. Сигнал после применения комплексного обратного преобразования Фурье (а); нормированные оптические интерферограммы трех внешних интерферометров Фабри–Перо в сравнении с их спектрами, измеренными оптическим спектроанализатором (б–г)

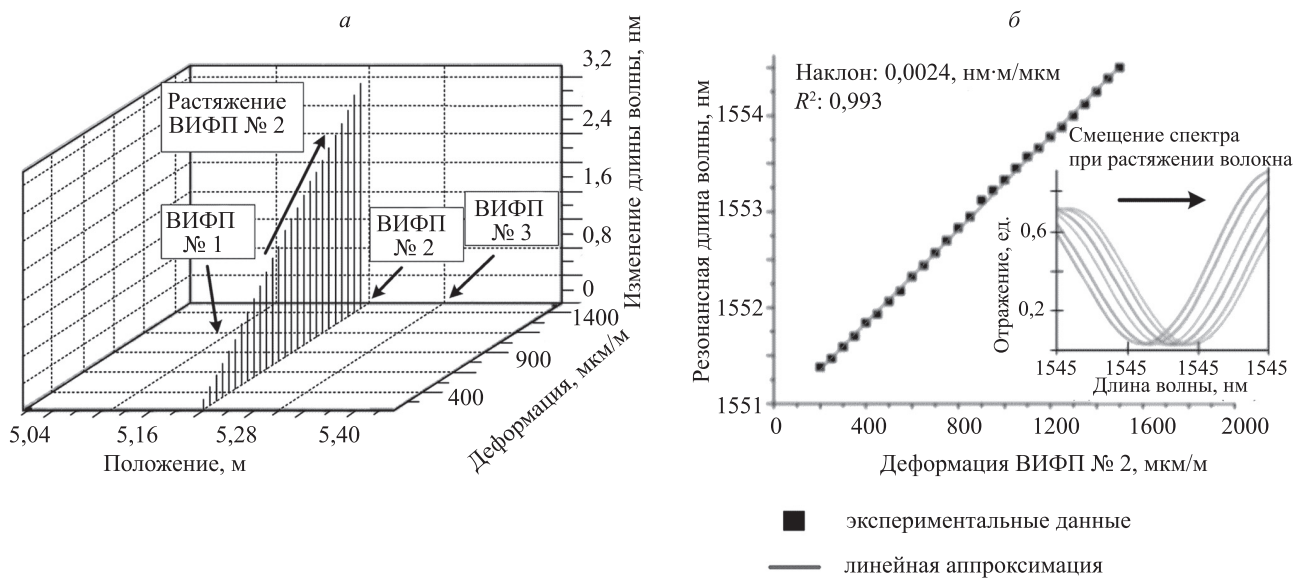


Рис. 27. Зависимость изменения центральной длины волны от приложенного напряжения и от положения датчика (а); двумерная зависимость резонансной длины волны ВИФП № 2 от деформации (б), где R — коэффициент отражения

Кроме того, радиофотонные технологии могут использоваться не только для построения РФВОИП, но и для усовершенствования уже существующих приборов. В работе [45] используется фазовая модуляция гауссовским белым шумом (ГБШ) для снижения величины дрейфа и случайных отклонений угловой скорости волоконно-оптического гироскопа (ВОГ). Авторам статьи [45] удалось добиться уменьшения случайных отклонений угловой скорости до $5,5 \times 10^{-4} \text{ }^\circ/\sqrt{\text{ч}}$ и снижения дрейфа до $6,8 \times 10^{-3} \text{ }^\circ/\text{ч}$. На рис. 28 представлена структурная схема ВОГ (интерферометрический РФВОИП №5) с использованием модуляции ГБШ.

В работе [45] РЧ-сигнал используется в неклассическом применении, продемонстрирован один из способов уширения спектра лазерного излучения посредством фазовой модуляции оптического сигнала. Необходимо отметить, что ГБШ позволяет добиться лучших результатов по сравнению с работой [46], где в качестве РЧ-сигнала использовалась псевдослучайная двоичная последовательность (случайные отклонения угловой скорости $7,3 \times 10^{-4} \text{ }^\circ/\sqrt{\text{ч}}$, дрейф $0,023 \text{ }^\circ/\text{ч}$).

На рис. 29 представлены зависимости дисперсии Аллана, используемые для оценки шумовых составляющих инерциальных измерительных систем при использовании различных ИОИ с разной шириной спектра. Для сравнения представлена дисперсия Аллана при использовании традиционного широкополосного суперфлуоресцентного волоконного источника (СВИ).

В зависимости от усиления сигнала ГБШ меняются параметры лазерного излучения ($\Delta\nu_b$ — ширина лазер-

ного спектра; f_c — подавление оптической несущей (отношение мощности оптической несущей к общей мощности оптического излучения)). Настройка РЧ усилительного каскада позволяет изменять характеристики лазерного излучения, что позволяет уменьшить шумовые составляющие до уровня навигационных систем гражданской авиации. Анализ представленных графиков подтверждает эффективность данного подхода [45].

В данном разделе представлены интерферометрические РФВОИП, каждый из которых обладает своими преимуществами и недостатками. Описанные радиофотонные технологии применяются не только для создания РФВОИП, но также и для совершенствования уже существующих волоконно-оптических приборов. В табл. 3 представлены параметры каждого из представленных интерферометрических РФВОИП.

В случае РФВОИП №5 используется уникальный метод с использованием радиофотоники в составе измерительного прибора. В табл. 3 этот пример не указывается, так как это не полноценный РФВОИП, но этот пример необходим для того чтобы показать, как радиофотоника позволяет улучшить параметры уже готовых измерительных приборов.

В табл. 4 представлено сопоставление параметров традиционных волоконно-оптических датчиков и РФВОИП. Представлены лучшие значения параметров, найденные в ходе обзора научной литературы. Необходимо отметить, что параметры измерительных приборов могут отличаться в зависимости от модификации схемы.

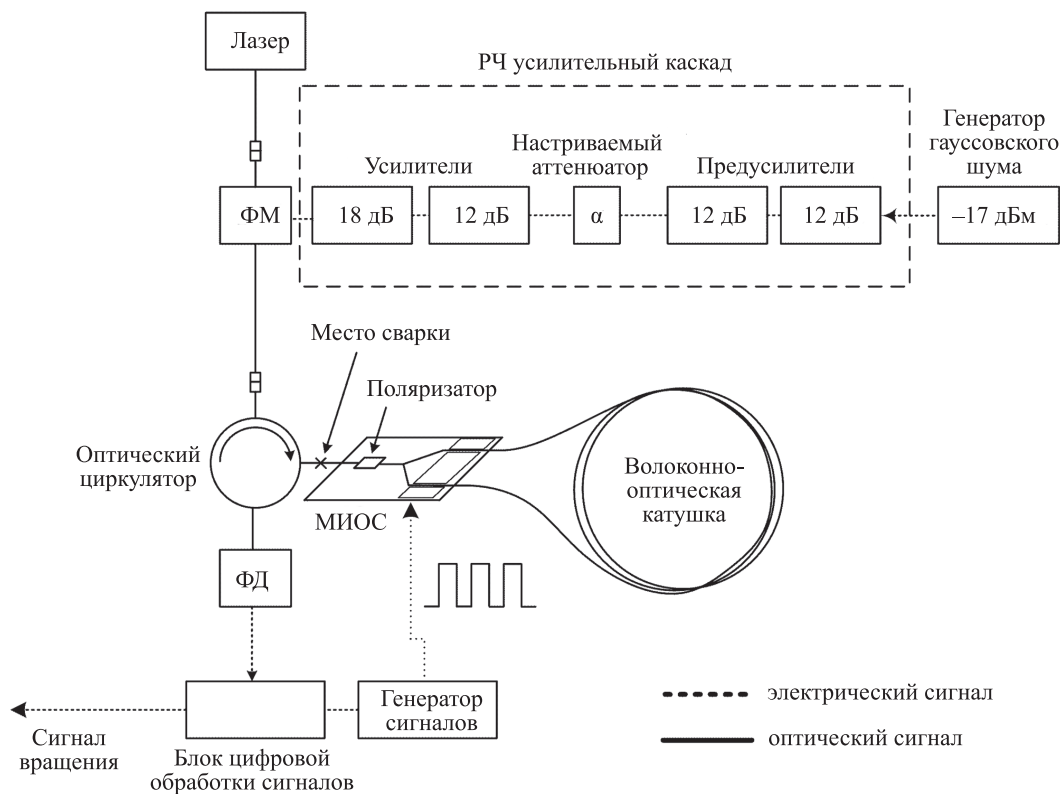


Рис. 28. Структурная схема волоконно-оптического гироскопа с использованием модуляции гауссовским белым шумом (интерферометрический РФВОИП №5), где МИОС – многофункциональная интегрально-оптическая схема

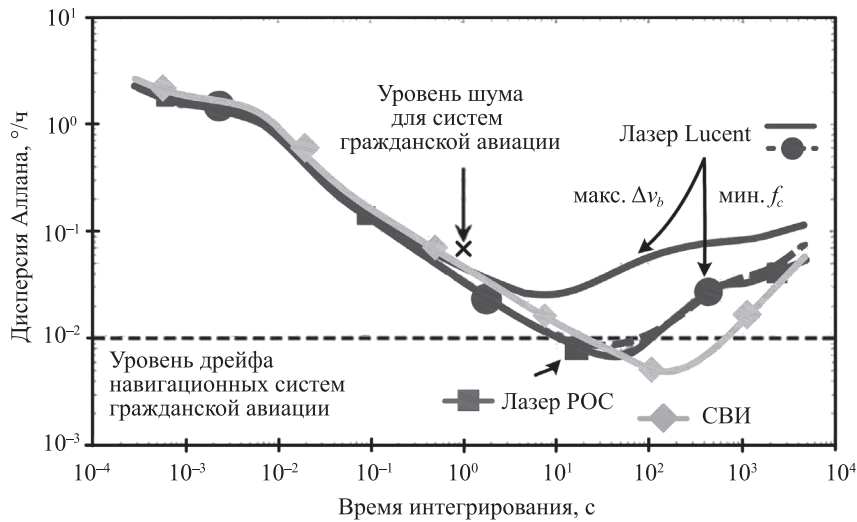


Рис. 29. Измеренная дисперсия Аллана сигнала волоконно-оптического гироскопа, у которого в качестве источника оптического излучения использовались два разных лазера с фазовой модуляцией гауссовским белым шумом (лазер Lucent и лазер РОС), а также широкополосный суперфлуоресцентный волоконный источник, легированный ионами эрбия

Представленные интерферометрические РФВОИП обладают массой преимуществ, используемые радиофотонные технологии позволяют создавать более стабильные интерферометрические датчики с возможностью не только точечного, но и пространственного измерения. Радиофотонная интерференция превосходит оптическую по простоте управления интерференционным сигналом, а также по уровню стабильности. Радиофотонные технологии позволяют осуществлять мультиплексирование сигналов с мас-

сивов датчиков, при этом количество датчиков в массиве не ограничивается шириной спектра источника излучения.

Современные способы построения измерительных приборов позволяют добиться приемлемых характеристик, сопоставимых с традиционными волоконно-оптическими измерительными системами. Несомненно, что существующие особенности позволят со временем заменить или усовершенствовать традиционные волоконно-оптические приборы.

Таблица 3. Сопоставление параметров интерферометрических РФВОИП

Номер фильтра	Основная особенность	Достоинства	Недостатки	Примечание
1	— Основной датчика является интерферометр Майкельсона	— Более высокая стабильность по сравнению с существующими датчиками других типов [33–40]	— Необходимость использования ВАЦ с большой полосой частот при расстоянии до зеркала менее 50 мм (рис. 20) либо необходимость подстройки плеч интерферометра	— Максимальное удаление зеркала 3 м. — Минимальный шаг 1 мкм. — Разрешение 30 мкм. — Может быть использован в качестве датчика смещения
2	— Использование длинной ВБР с коэффициентом отражения 99 %	— Возможность детектирования воздействия в нескольких местах ВБР	— Не представляется возможным использовать для измерений на большие расстояния при множественных воздействиях внешних факторов на ВБР. — Разрешение ограничено шириной зондирующего импульса	— Пространственное разрешение (0,5 мм). — Может быть использован в качестве датчика температуры, давления, вибрации, растяжения, сжатия
3	— Использование ВБР с малым коэффициентом отражения (около 0,1 %) и ВКД	— Возможность распределенных измерений на больших расстояниях из-за малых оптических потерь	— Разрешение ограничено шириной зондирующего импульса	— Разрешение 9 мм. — Может быть использован в качестве датчика трещин/деформаций
4	— Метод мультиплексирования сигналов датчиков с использованием РЧ-модуляции оптического излучения	— Мультиплексирование большого количества датчиков	— Пространственное разрешение зависит от полосы частот источника РЧ-сигналов и расстояния между датчиками	— Пространственное разрешение 1,7 см. — Может быть использован в качестве датчика деформаций, давления, температуры

Таблица 4. Сопоставление параметров волоконно-оптических датчиков и РФВОИП в схожих измерительных схемах

Регистрируемая величина	Параметр измерительной системы	РФВОИП	Волоконно-оптические датчики
Длина волны отражения ВБР	Разрешение*	0,40 пм [23]	0,61 пм [47]
Расстояние до точки воздействия на ВБР	Разрешение (спектральная система)	0,5 мм [5, 27]	0,2 мм [48]
Расстояние от опорного до измерительного зеркала	Разрешение (интерферометрическая система)	31 мкм [32]	несколько нанометров [32]
Расстояние от опорного до измерительного зеркала	Динамический диапазон	от 0 до 3 км [32]	от 0 до нескольких метров [32]
Относительная деформация чувствительного элемента	Динамический диапазон	от 0 до 50 мкм/м [2, 23, 26]	от 0 до 60 мкм/м [49, 50]

* Характеризует минимальное регистрируемое изменение длины волны отклика чувствительного элемента опрашивающей системой, может изменяться в зависимости от параметров составляющих измерительной системы.

Заключение

Радиофотоника является перспективным направлением науки и техники, которое интенсивно исследуется в последние годы. Преимущества данного направления позволяют создавать устройства нового поколения с уникальными функциями. Малые оптические потери, стойкость к электромагнитным помехам и частотная полоса более 100 ГГц способствуют активному развитию радиофотонных технологий в разных научно-технических областях, что позволяет использовать новые подходы для создания волоконно-оптических датчиков физических величин.

Представленные в данной работе спектральные и интерферометрические приборы обладают рядом особенностей, среди которых можно выделить высокую стабильность, высокую чувствительность и возможность мультиплексирования сигналов с большого массива датчиков. Радиофотонные волоконно-оптические измерительные приборы обладают преимуществами оптических и радиочастотных систем: оптические потери менее 0,4 дБ, возможность распределенных изме-

рений на большие расстояния, относительная простота генерации и управления радиочастотными сигналами. Современные способы создания измерительных систем позволяют не только получить характеристики, сопоставимые с традиционными волоконно-оптическими приборами, но и получить более высокие точностные показатели измерительных систем. Также новые подходы и методы позволяют улучшить тактико-технические характеристики существующих приборов. Ввиду указанных ранее преимуществ, можно выдвинуть предположение о возможной замене традиционных датчиков на радиофотонные волоконно-оптические измерительные приборы во многих задачах.

Преимущества внедрения радиофотонных технологий во многих областях научных и прикладных исследований являются неоспоримыми и позволяют сочетать достоинства оптических и радиочастотных устройств в рамках единой измерительной системы. Со временем данная тенденция будет только усиливаться. Радиофотоника является наукой будущего, по этой причине развитие данного направления является глобальной современной задачей.

Литература

1. Белоусов А.А., Вольхин Ю.Н., Гамиловская А.В., Дубровская А.А., Тихонов Е.В. О применении методов и средств радиофотоники для обработки сигналов дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн // Прикладная фотоника. 2014. Т. 1. № 1. С. 65–86. doi: 10.15593/2411-4367/2014.1.06
2. Hervás J., Ricchiuti A.L., Li W., Zhu N.H., Fernández-Pousa C.R., Sales S., Li M., Capmany J. Microwave photonics for optical sensors // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2017. V. 23. N 2. P. 5602013. doi: 10.1109/JSTQE.2017.2651117
3. Yao J. Microwave photonics: Optical generation and processing of microwave signals // ProlCAIT '08 Proc. of the 2008 International Conference on Advanced Infocomm Technology. 2008. P. 135. doi: 10.1145/1509315.1509450
4. Capmany J., Ortega B., Pastor D. A tutorial on microwave photonic filters // Journal of Lightwave Technology. 2006. V. 24. N 1. P. 201–229. doi: 10.1109/JLT.2005.860478
5. Capmany J., Ortega B., Pastor D., Sales S. Discrete-time optical processing of microwave signals // Journal of Lightwave Technology. 2005. V. 23. N 2. P. 702–723. doi: 10.1109/JLT.2004.838819
6. Смит С. Цифровая обработка сигналов: практическое руководство для инженеров и научных работников. М.: Додэка XXI век, 2008. 720 с.

References

1. Belousov A.A., Volkhin Iu.N., Gamilovskaia A.V., Dubrovskaja A.A., Tikhonov E.V. Radiophotonical methods and tools used for microwave analog and digital signal processing. *Applied Photonics*, 2014, vol. 1, no. 1, pp. 65–86. (in Russian). doi: 10.15593/2411-4367/2014.1.06
2. Hervás J., Ricchiuti A.L., Li W., Zhu N.H., Fernández-Pousa C.R., Sales S., Li M., Capmany J. Microwave photonics for optical sensors. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, vol. 23, no. 2, pp. 5602013. doi: 10.1109/JSTQE.2017.2651117
3. Yao J. Microwave photonics: Optical generation and processing of microwave signals. *ICAIT '08 Proc. of the 2008 International Conference on Advanced Infocomm Technology*, 2008, pp. 135. doi: 10.1145/1509315.1509450
4. Capmany J., Ortega B., Pastor D. A tutorial on microwave photonic filters. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, vol. 24, no. 1, pp. 201–229. doi: 10.1109/JLT.2005.860478
5. Capmany J., Ortega B., Pastor D., Sales S. Discrete-time optical processing of microwave signals. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, vol. 23, no. 2, pp. 702–723. doi: 10.1109/JLT.2004.838819
6. Smith S. *Digital Signal Processing: A Practical Guide for Engineers and Scientists*. Amsterdam, Newnes corp., 2003, XIV, 650 p.

7. Minasian R.A. Photonic signal processing of microwave signals // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2006. V. 54. N 2. P. 832–846. doi: 10.1109/TMTT.2005.863060
8. Mishra V., Gupta S. Microwave photonic filter: A systematic literature review // *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*. 2017. V. 6. N 5. P. 628–634. doi: 10.17148/IJARCCCE.2017.65121
9. Coppinger F., Yegnanarayanan S., Trinh P.D., Jalali B. All-optical RF filter using amplitude inversion in a semiconductor optical amplifier // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1997. V. 45. N 8. P. 1473–1477. doi: 10.1109/22.618457
10. Thakur V., Pandove G., Gupta T. Optical wavelength converters based on cross gain modulation and cross phase modulation in SOA // *International Journal of Electronics and Computer Science Engineering*. 2012. V. 1. N 3. P. 1274–1280.
11. Turkiewicz J.P., Khoe G.D., de Waart H. All-optical 1310 to 1550 nm wavelength conversion by utilising nonlinear polarisation rotation in semiconductor optical amplifier // *Electronics Letters*. 2005. V. 41. N 1. P. 29–30. doi: 10.1049/el:20057435
12. Vysokinos K., Apostolopoulos D., Zakynthinos P., Avramopoulos H., Pleros N. Wavelength conversion for NRZ signals with enhanced regenerative characteristics // *Proc. of the Conference on Optical Fiber Communication, OFC 2009*. 2009. P. 5032381.
13. Wang X., Chan K.T. Tunable all-optical incoherent bipolar delay-line filter using injection-locked Fabry-Perot laser and fibre Bragg gratings // *Electronics Letters*. 2000. V. 36. N 24. P. 2001–2003. doi: 10.1049/el:20001424
14. Nguyen Q.T., Girault G., Vaudel O., Bramerie L., Besnard P., Shen A., Duan G.H., Kazmierski C., Lobo S., Joindot M., Simon J.-C., Dupuis N., Garreau A., Belfqih Z., Chanclou P. Colorless components for WDM-based optical access networks // *Proc. International Workshop on Photonics and Applications 2008 (IWPA 2008)*. 2008.
15. Yao J. Microwave photonics // *Journal of Lightwave Technology*. 2009. V. 27. N 3. P. 314–335. doi: 10.1109/JLT.2008.2009551
16. Белкин М.Е. Разработка модели оптоэлектронного генератора СВЧ диапазона // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*. 2008. Т. 8. № 1. С. 289–297.
17. Белкин М., Лопарев А. Оптоэлектронный генератор — первое практическое устройство СВЧ-оптоэлектроники // *Электроника: Наука, технология, бизнес*. 2010. № 6(104). С. 62–71.
18. Shao Y., Han X., Li M., Zhao M. RF signal detection by a tunable optoelectronic oscillator based on a PS-FBG // *Optics Letters*. 2018. V. 43. N 6. P. 1199–1202. doi: 10.1364/OL.43.001199
19. Togo H., Mochizuki S., Kukutsu N. Optical fiber electric field sensor for antenna measurement // *NTT Technical Review*. 2009. V. 7. N 3.
20. Fandiño J.S., Muñoz P. Analysis of system imperfections in a photonics-assisted instantaneous frequency measurement receiver based on a dual-sideband suppressed-carrier modulation // *Journal of Lightwave Technology*. 2015. V. 33. N 2. P. 293–303. doi: 10.1109/JLT.2014.2378331
21. Preussler S., Schneider T. Attometer resolution spectral analysis based on polarization pulling assisted Brillouin scattering merged with heterodyne detection // *Optics Express*. 2015. V. 23. N 20. P. 26879–26887. doi: 10.1364/OE.23.026879
22. Chen B., Zheng S.L., Zhang X.M., Zhang X.M., Jin X.F., Chi H. Simultaneously realizing PM-IM conversion and efficiency improvement of fiber-optic links using FBG // *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. 2009. V. 23. N. 2-3. P. 161–170. doi: 10.1163/156939309787604472
23. Yao J. Microwave photonics for high-resolution and high-speed interrogation of fiber Bragg grating sensors // *Fiber and Integrated Optics*. 2015. V. 34. N 4. P. 230–242. doi: 10.1080/01468030.2015.1061622
24. Li W., Li M., Yao J. A narrow-passband and frequency-tunable microwave photonic filter based on phase-modulation to intensity-modulation conversion using a phase-shifted fiber bragg grating // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2012. V. 60. N 5. P. 1287–1296. doi: 10.1109/TMTT.2012.2187678
25. Li L., Yi X., Huang X.X.H., Minasian A. Shifted dispersion-induced radio-frequency fading in microwave photonic filters using a dual-input Mach-Zehnder electro-optic modulator // *Optics Letters*. 2013. V. 38. N 7. P. 1164–1166. doi: 10.1364/OL.38.001164
26. Wang H., Zheng J.Y., Li W., Wang L.X., Li M., Xie L., Zhu N.H. Widely tunable single-bandpass microwave photonic filter based on polarization processing of a nonsliced broadband optical source // *Optics Letters*. 2013. V. 38. N 22. P. 4857–4860. doi: 10.1364/OL.38.004857
7. Minasian R.A. Photonic signal processing of microwave signals. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2006, vol. 54, no. 2, pp. 832–846. doi: 10.1109/TMTT.2005.863060
8. Mishra V., Gupta S. Microwave photonic filter: A systematic literature review. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 2017, vol. 6, no. 5, pp. 628–634. doi: 10.17148/IJARCCCE.2017.65121
9. Coppinger F., Yegnanarayanan S., Trinh P.D., Jalali B. All-optical RF filter using amplitude inversion in a semiconductor optical amplifier. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1997, vol. 45, no. 8, pp. 1473–1477. doi: 10.1109/22.618457
10. Thakur V., Pandove G., Gupta T. Optical wavelength converters based on cross gain modulation and cross phase modulation in SOA. *International Journal of Electronics and Computer Science Engineering*, 2012, vol. 1, no. 3, pp. 1274–1280.
11. Turkiewicz J.P., Khoe G.D., de Waart H. All-optical 1310 to 1550 nm wavelength conversion by utilising nonlinear polarisation rotation in semiconductor optical amplifier. *Electronics Letters*, 2005, vol. 41, no. 1, pp. 29–30. doi: 10.1049/el:20057435
12. Vysokinos K., Apostolopoulos D., Zakynthinos P., Avramopoulos H., Pleros N. Wavelength conversion for NRZ signals with enhanced regenerative characteristics. *Proc. of the Conference on Optical Fiber Communication, OFC 2009*, 2009, pp. 5032381.
13. Wang X., Chan K.T. Tunable all-optical incoherent bipolar delay-line filter using injection-locked Fabry-Perot laser and fibre Bragg gratings. *Electronics Letters*, 2000, vol. 36, no. 24, pp. 2001–2003. doi: 10.1049/el:20001424
14. Nguyen Q.T., Girault G., Vaudel O., Bramerie L., Besnard P., Shen A., Duan G.H., Kazmierski C., Lobo S., Joindot M., Simon J.-C., Dupuis N., Garreau A., Belfqih Z., Chanclou P. Colorless components for WDM-based optical access networks. *Proc. International Workshop on Photonics and Applications 2008 (IWPA 2008)*, 2008.
15. Yao J. Microwave photonics. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, vol. 27, no. 3, pp. 314–335. doi: 10.1109/JLT.2008.2009551
16. Belkin M.E. Microwave optoelectronic generator model development. *Fundamental Challenges of Electronic Instrumentation*, 2008, vol. 8, no. 1, pp. 289–297. (in Russian)
17. Belkin M., Loparev A. Optoelectronic generator. Practically the first microwave optoelectronic device. *Electronics: Science, Technology, Business*, 2010, no. 6(104), pp. 62–71. (in Russian)
18. Shao Y., Han X., Li M., Zhao M. RF signal detection by a tunable optoelectronic oscillator based on a PS-FBG. *Optics Letters*, 2018, vol. 43, no. 6, pp. 1199–1202. doi: 10.1364/OL.43.001199
19. Togo H., Mochizuki S., Kukutsu N. Optical fiber electric field sensor for antenna measurement. *NTT Technical Review*, 2009, vol. 7, no. 3.
20. Fandiño J.S., Muñoz P. Analysis of system imperfections in a photonics-assisted instantaneous frequency measurement receiver based on a dual-sideband suppressed-carrier modulation. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, vol. 33, no. 2, pp. 293–303. doi: 10.1109/JLT.2014.2378331
21. Preussler S., Schneider T. Attometer resolution spectral analysis based on polarization pulling assisted Brillouin scattering merged with heterodyne detection. *Optics Express*, 2015, vol. 23, no. 20, pp. 26879–26887. doi: 10.1364/OE.23.026879
22. Chen B., Zheng S.L., Zhang X.M., Zhang X.M., Jin X.F., Chi H. Simultaneously realizing PM-IM conversion and efficiency improvement of fiber-optic links using FBG. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2009, vol. 23, no. 2-3, pp. 161–170. doi: 10.1163/156939309787604472
23. Yao J. Microwave photonics for high-resolution and high-speed interrogation of fiber Bragg grating sensors. *Fiber and Integrated Optics*, 2015, vol. 34, no. 4, pp. 230–242. doi: 10.1080/01468030.2015.1061622
24. Li W., Li M., Yao J. A narrow-passband and frequency-tunable microwave photonic filter based on phase-modulation to intensity-modulation conversion using a phase-shifted fiber bragg grating. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2012, vol. 60, no. 5, pp. 1287–1296. doi: 10.1109/TMTT.2012.2187678
25. Li L., Yi X., Huang X.X.H., Minasian A. Shifted dispersion-induced radio-frequency fading in microwave photonic filters using a dual-input Mach-Zehnder electro-optic modulator. *Optics Letters*, 2013, vol. 38, no. 7, pp. 1164–1166. doi: 10.1364/OL.38.001164
26. Wang H., Zheng J.Y., Li W., Wang L.X., Li M., Xie L., Zhu N.H. Widely tunable single-bandpass microwave photonic filter based on polarization processing of a nonsliced broadband optical source.

27. Capmany J., Mora J., Gasulla I., Sancho J., Lloret J., Sales S. Microwave photonic signal processing // *Journal of Lightwave Technology*. 2013. V. 31. N 4. P. 571–586. doi: 10.1109/JLT.2012.2222348
28. Xue X., Zheng X., Zhang H., Zhou B. Widely tunable single-bandpass microwave photonic filter employing a non-sliced broadband optical source // *Optics Express*. 2011. V. 19. N 19. P. 18423–18429. doi: 10.1364/OE.19.018423
29. Xue X., Zheng X., Zhang H., Zhou B. Highly reconfigurable microwave photonic single-bandpass filter with complex continuous-time impulse responses // *Optics Express*. 2012. V. 20. N 24. P. 26929–26934. doi: 10.1364/OE.20.026929
30. Song M., Long C.M., Wu R., Seo D., Leaird D.E., Weiner A.M. Reconfigurable and tunable flat-top microwave photonic filters utilizing optical frequency combs // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2011. V. 23. N 21. P. 1618–1620. doi: 10.1109/LPT.2011.2165209
31. Deng Y., Li M., Huang N., Wang H., Zhu N. Optical length-change measurement based on an incoherent single-bandpass microwave photonic filter with high resolution // *Photonics Research*. 2014. V. 2. N 4. P. B35–B39. doi: 10.1364/PRJ.2.000B35
32. Dong H., Liu S., Yang L., Peng J., Cheng K. Optical fiber displacement sensor based on microwave photonics interferometry // *Sensors (Basel)*. 2018. V. 18. N 11. P. 3702. doi: 10.3390/s18113702
33. Zhou X.L., Yu Q.X. Wide-range displacement sensor based on fiber-optic fabry-perot interferometer for subnanometer measurement // *IEEE Sensors Journal*. 2011. V. 11. N 7. P. 1602–1606. doi: 10.1109/JSEN.2010.2103307
34. Seat H.C., Chawah P., Cattoen M., Sourice A., Plantier G., Boudin F., Chéry J., Brunet C., Bernard P., Suleiman M. Dual-modulation fiber Fabry-Perot interferometer with double reflection for slowly-varying displacements // *Optics Letters*. 2012. V. 37. N 14. P. 2886–2888. doi: 10.1364/OL.37.002886
35. Li T., Tan Y., Shi C., Guo Y., Najdovski Z., Ren H., Zhou Z. A high-sensitivity fiber Bragg grating displacement sensor based on transverse property of a tensioned optical fiber configuration and its dynamic performance improvement // *IEEE Sensors Journal*. 2017. V. 17. N 18. P. 5840–5848. doi: 10.1109/JSEN.2017.2737556
36. Zou Y., Dong X., Lin G., Adhami R. Wide range FBG displacement sensor based on twin-core fiber filter // *Journal of Lightwave Technology*. 2012. V. 30. N 3. P. 337–343. doi: 10.1109/JLT.2011.2181334
37. Wang X.M., Zhao C.L., Wang Y.R., Shen C.Y., Dong X.Y. A highly sensitive fibre-optic nano-displacement sensor based on surface plasmon resonance // *Journal of Lightwave Technology*. 2016. V. 34. N 9. P. 2324–2330. doi: 10.1109/JLT.2016.2535662
38. Moreno-Hernández C.J., Monzón-Hernández D., Martínez-Ríos A., Moreno-Hernández D., Villatoro J. Long-range interferometric displacement sensing with tapered optical fiber tips // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2015. V. 27. N 4. P. 379–382. doi: 10.1109/LPT.2014.2375651
39. Yang Y., Tian D., Chen K., Zhou X., Gong Z., Yu Q. A fiber-optic displacement sensor using the spectral demodulation method // *Journal of Lightwave Technology*. 2018. V. 36. N 17. P. 3666–3671. doi: 10.1109/JLT.2018.2841973
40. Qi L., Zhao C.L., Wang Y., Kang J., Zhang Z., Jin S. Compact micro-displacement sensor with high sensitivity based on a long-period fiber grating with an air-cavity // *Optics Express*. 2013. V. 21. N 3. P. 3193–3200. doi: 10.1364/OE.21.003193
41. Ricchiuti A.L., Barrera D., Sales S., Thevenaz L., Capmany J. Long fiber Bragg grating sensor interrogation using discrete-time microwave photonic filtering techniques // *Optics Express*. 2013. V. 21. N 23. P. 28175–28181. doi: 10.1364/OE.21.028175
42. Zhou J., Xia L., Cheng R., Wen Y., Rohollahnejad J. Radio-frequency unbalanced M-Z interferometer for wavelength interrogation of fiber Bragg grating sensors // *Optics Letters*. 2016. V. 41. N 2. P. 313–316. doi: 10.1364/OL.41.000313
43. Ricchiuti L.A., Sales S. Spot event detection along a large-scale sensor based on ultra-weak fiber Bragg gratings using time-frequency analysis // *Applied Optics*. 2016. V. 55. N 5. P. 1054–1060. doi: 10.1364/AO.55.001054
44. Huang J., Hua L., Lan X., Wei T., Xiao H. Microwave assisted reconstruction of optical interferograms for distributed fiber optic sensing // *Optics Express*. 2013. V. 21. N 15. P. 18152–18159. doi: 10.1364/OE.21.018152
45. Chamoun J., Dignonnet M.J.F. Aircraft-navigation-grade laser-driven FOG with Gaussian-noise phase modulation // *Optics Letters*. 2017. V. 42. N 8. P. 1600–1603. doi: 10.1364/OL.42.001600
27. Capmany J., Mora J., Gasulla I., Sancho J., Lloret J., Sales S. Microwave photonic signal processing. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, vol. 31, no. 4, pp. 571–586. doi: 10.1109/JLT.2012.2222348
28. Xue X., Zheng X., Zhang H., Zhou B. Widely tunable single-bandpass microwave photonic filter employing a non-sliced broadband optical source. *Optics Express*, 2011, vol. 19, no. 19, pp. 18423–18429. doi: 10.1364/OE.19.018423
29. Xue X., Zheng X., Zhang H., Zhou B. Highly reconfigurable microwave photonic single-bandpass filter with complex continuous-time impulse responses. *Optics Express*, 2012, vol. 20, no. 24, pp. 26929–26934. doi: 10.1364/OE.20.026929
30. Song M., Long C.M., Wu R., Seo D., Leaird D.E., Weiner A.M. Reconfigurable and tunable flat-top microwave photonic filters utilizing optical frequency combs. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, vol. 23, no. 21, pp. 1618–1620. doi: 10.1109/LPT.2011.2165209
31. Deng Y., Li M., Huang N., Wang H., Zhu N. Optical length-change measurement based on an incoherent single-bandpass microwave photonic filter with high resolution. *Photonics Research*, 2014, vol. 2, no. 4, pp. B35–B39. doi: 10.1364/PRJ.2.000B35
32. Dong H., Liu S., Yang L., Peng J., Cheng K. Optical fiber displacement sensor based on microwave photonics interferometry. *Sensors (Basel)*, 2018, vol. 18, no. 11, pp. 3702. doi: 10.3390/s18113702
33. Zhou X.L., Yu Q.X. Wide-range displacement sensor based on fiber-optic fabry-perot interferometer for subnanometer measurement. *IEEE Sensors Journal*, 2011, vol. 11, no. 7, pp. 1602–1606. doi: 10.1109/JSEN.2010.2103307
34. Seat H.C., Chawah P., Cattoen M., Sourice A., Plantier G., Boudin F., Chéry J., Brunet C., Bernard P., Suleiman M. Dual-modulation fiber Fabry-Perot interferometer with double reflection for slowly-varying displacements. *Optics Letters*, 2012, vol. 37, no. 14, pp. 2886–2888. doi: 10.1364/OL.37.002886
35. Li T., Tan Y., Shi C., Guo Y., Najdovski Z., Ren H., Zhou Z. A high-sensitivity fiber Bragg grating displacement sensor based on transverse property of a tensioned optical fiber configuration and its dynamic performance improvement. *IEEE Sensors Journal*, 2017, vol. 17, no. 18, pp. 5840–5848. doi: 10.1109/JSEN.2017.2737556
36. Zou Y., Dong X., Lin G., Adhami R. Wide range FBG displacement sensor based on twin-core fiber filter. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, vol. 30, no. 3, pp. 337–343. doi: 10.1109/JLT.2011.2181334
37. Wang X.M., Zhao C.L., Wang Y.R., Shen C.Y., Dong X.Y. A highly sensitive fibre-optic nano-displacement sensor based on surface plasmon resonance. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, vol. 34, no. 9, pp. 2324–2330. doi: 10.1109/JLT.2016.2535662
38. Moreno-Hernández C.J., Monzón-Hernández D., Martínez-Ríos A., Moreno-Hernández D., Villatoro J. Long-range interferometric displacement sensing with tapered optical fiber tips. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, vol. 27, no. 4, pp. 379–382. doi: 10.1109/LPT.2014.2375651
39. Yang Y., Tian D., Chen K., Zhou X., Gong Z., Yu Q. A fiber-optic displacement sensor using the spectral demodulation method. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, vol. 36, no. 17, pp. 3666–3671. doi: 10.1109/JLT.2018.2841973
40. Qi L., Zhao C.L., Wang Y., Kang J., Zhang Z., Jin S. Compact micro-displacement sensor with high sensitivity based on a long-period fiber grating with an air-cavity. *Optics Express*, 2013, vol. 21, no. 3, pp. 3193–3200. doi: 10.1364/OE.21.003193
41. Ricchiuti A.L., Barrera D., Sales S., Thevenaz L., Capmany J. Long fiber Bragg grating sensor interrogation using discrete-time microwave photonic filtering techniques. *Optics Express*, 2013, vol. 21, no. 23, pp. 28175–28181. doi: 10.1364/OE.21.028175
42. Zhou J., Xia L., Cheng R., Wen Y., Rohollahnejad J. Radio-frequency unbalanced M-Z interferometer for wavelength interrogation of fiber Bragg grating sensors. *Optics Letters*, 2016, vol. 41, no. 2, pp. 313–316. doi: 10.1364/OL.41.000313
43. Ricchiuti L.A., Sales S. Spot event detection along a large-scale sensor based on ultra-weak fiber Bragg gratings using time-frequency analysis. *Applied Optics*, 2016, vol. 55, no. 5, pp. 1054–1060. doi: 10.1364/AO.55.001054
44. Huang J., Hua L., Lan X., Wei T., Xiao H. Microwave assisted reconstruction of optical interferograms for distributed fiber optic

46. Chamoun J., Dignonnet M.J.F. Pseudo-random-bit-sequence phase modulation for reduced errors in a fiber optic gyroscope // *Optics Letters*. 2016. V. 41. N 24. P. 5664–5667. doi: 10.1364/OL.41.005664
47. Wang C., Yao J. Ultrafast and ultrahigh-resolution interrogation of a fiber bragg grating sensor based on interferometric temporal spectroscopy // *Journal of Lightwave Technology*. 2011. V. 29. N 19. P. 2927–2933. doi: 10.1109/JLT.2011.2164572
48. Tosi D., Korganbayev S., Molardi C., Schena E., Perrone G., Iadicco A., Campopiano S., Sales S. High spatial resolution fiber optic sensors and their impact in biomedical measurements and diagnostic // *Proc. of the Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR 2018)*. 2018. P. 8700054.
49. Das B., Srivastava D., Tiwari U.K., Choudhary B.C. Dynamic strain response of a π -phase-shifted FBG sensor with phase-sensitive detection // *OSA Continuum*. 2018. V. 1. N 4. P. 1172–1184. doi: 10.1364/OSAC.1.001172
50. Bao X., Chen L. Recent progress in distributed fiber optic sensors // *Sensors (Basel)*. 2012. V. 12. N 7. P. 8601–8639. doi: 10.3390/s120708601
45. Chamoun J., Dignonnet M.J.F. Aircraft-navigation-grade laser-driven FOG with Gaussian-noise phase modulation. *Optics Letters*, 2017, vol. 42, no. 8, pp. 1600–1603. doi: 10.1364/OL.42.001600
46. Chamoun J., Dignonnet M.J.F. Pseudo-random-bit-sequence phase modulation for reduced errors in a fiber optic gyroscope. *Optics Letters*, 2016, vol. 41, no. 24, pp. 5664–5667. doi: 10.1364/OL.41.005664
47. Wang C., Yao J. Ultrafast and ultrahigh-resolution interrogation of a fiber bragg grating sensor based on interferometric temporal spectroscopy. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, vol. 29, no. 19, pp. 2927–2933. doi: 10.1109/JLT.2011.2164572
48. Tosi D., Korganbayev S., Molardi C., Schena E., Perrone G., Iadicco A., Campopiano S., Sales S. High spatial resolution fiber optic sensors and their impact in biomedical measurements and diagnostic. *Proc. of the Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR 2018)*, 2018, pp. 8700054.
49. Das B., Srivastava D., Tiwari U.K., Choudhary B.C. Dynamic strain response of a π -phase-shifted FBG sensor with phase-sensitive detection. *OSA Continuum*, 2018, vol. 1, no. 4, pp. 1172–1184. doi: 10.1364/OSAC.1.001172
50. Bao X., Chen L. Recent progress in distributed fiber optic sensors. *Sensors (Basel)*, 2012, vol. 12, no. 7, pp. 8601–8639. doi: 10.3390/s120708601

Авторы

Востриков Евгений Владимирович — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0001-5682-5819, e.v.vostrikov@yandex.ru

Литвинов Елисей Викторович — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-3889-2628, elisey@niuitmo.ru

Волковский Сергей Александрович — кандидат технических наук, ассистент, научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57195476252, ORCID ID: 0000-0001-8462-5208, savolvkovskii@itmo.ru

Алейник Артём Сергеевич — кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 54793978900, ORCID ID: 0000-0002-7682-348X, artemal@itmo.ru

Польте Галина Александровна — кандидат технических наук, научный сотрудник, Технический Университет города Ильменау, Ильменау, 98693, Германия, Scopus ID: 55360480800, galina.polte@tu-ilmenau.de

Authors

Evgenii V. Vostrikov — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0001-5682-5819, e.v.vostrikov@yandex.ru

Elisey V. Litvinov — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-3889-2628, elisey@niuitmo.ru

Sergei A. Volkovskii — PhD, Assistant, Scientific Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57195476252, ORCID ID: 0000-0001-8462-5208, savolvkovskii@itmo.ru

Artem S. Aleinik — PhD, Associate Professor, Laboratory Head, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 54793978900, ORCID ID: 0000-0002-7682-348X, artemal@itmo.ru

Galina A. Polte — PhD, Web of Science Researcher, Scientific Researcher, Technical University Ilmenau, Ilmenau, 98693, Germany, Scopus ID: 55360480800, galina.polte@tu-ilmenau.de



Востриков Евгений Владимирович в 2018 г. окончил с отличием магистратуру Университета ИТМО по направлению «Инфокоммуникационные технологии и системы связи». С 2017 г. сотрудник Научно-исследовательского центра Световодной фотоники Университета ИТМО. Область научных интересов: оптоэлектроника, аналоговая и цифровая электроника.

Evgenii V. Vostrikov was awarded a master’s degree with honors in infocommunication technologies and communication systems at Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO University, Saint Petersburg, Russia) in 2018. Since 2017 Evgenii has been working in the Department of Light-Guided Photonics, ITMO University. His research subjects include optoelectronic, analog and digital electronics.



Литвинов Елисей Викторович в 2018 г. окончил с отличием магистратуру Университета ИТМО по направлению «Инфокоммуникационные технологии и системы связи». С 2017 г. сотрудник Научно-исследовательского центра Световодной фотоники Университета ИТМО. Область научных интересов: ПЛИС, высокоскоростная передача данных, цифровая обработка сигналов.

Elisey V. Litvinov was awarded a master’s degree with honors in infocommunication technologies and communication systems at Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO University, Saint Petersburg, Russia) in 2018. Since 2017 Elisey has been working in the Department

of Light-Guided Photonics, ITMO University. His research subjects include FPGA, high-speed data transmission and digital signal processing.



Волковский Сергей Александрович в 2011 г. окончил Университет ИТМО по направлению «Физика и техника оптической связи». В 2016 г. окончил аспирантуру Университета ИТМО и защитил кандидатскую диссертацию по специальности 05.11.01 «Приборы и методы измерения», тема диссертационной работы: «Создание и исследование алгоритмических методов повышения точностных и эксплуатационных характеристик волоконно-оптического гироскопа». С 2011 г. сотрудник Научно-исследовательского центра Световодной фотоники Университета ИТМО. Область научных интересов: волоконно-оптические интерферометрические измерительные приборы, электроника, фотоника, волоконная и интегральная оптика.

Sergei A. Volkovskii graduated from Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO University, Saint Petersburg, Russia) in 2011 with a degree in physics and optical communication technology. In 2016 Sergei graduated from the postgraduate studies at ITMO University and received PhD in the field of 05.11.01 “Measurement devices and methods” with his thesis “Creation and research of algorithmic methods of improving the accuracy and performance characteristics of a fiber-optic gyroscope”. Since 2011 Sergei has been working in the Department of Light-Guided Photonics, ITMO University. His research subjects include fiber-optic interferometric sensors, electronics, photonics, fiber optics and integrated optics.



Алейник Артем Сергеевич в 2008 г. окончил Университет ИТМО по направлению «Физика и техника оптической связи». В 2012 г. окончил аспирантуру Университета ИТМО и защитил кандидатскую диссертацию по специальности 05.11.01 «Приборы и методы измерения». С 2011 г. сотрудник Научно-исследовательского центра Световодной фотоники Университета ИТМО. Автор более 30 статей в отечественных и международных научных журналах. Область научных интересов: волоконно-оптические интерферометрические измерительные приборы, цифровая и аналоговая электроника, оптоэлектроника, волоконная и интегральная оптика.

Artem S. Aleinik graduated from Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO University, Saint Petersburg, Russia) in 2008. In 2012 Artem graduated from the postgraduate studies at ITMO University and received PhD in the field of 05.11.01 “Measurement devices and methods”. Since 2011 he has been working in the Department of Light-Guided Photonics, ITMO University. He is the author of more than 30 articles in national and international scientific editions. His research subjects include fiber-optic interferometric sensors, digital and analog electronics, optoelectronic, fiber and integrated optics.



Галина Польте (по рождению Недоцука) родилась 10 мая 1985 в г. Ленинграде (г. Санкт-Петербург). В 2008 году окончила с отличием Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики (СПбГУ ИТМО). В 2011 г. окончила аспирантуру Университета ИТМО и защитила кандидатскую диссертацию по специальности 05.11.01 «Приборы и методы измерения», название диссертации «Повышение точности систем бесконтактных оптических измерений». Автор 29 научных статей и одного патента. В настоящее время является научным сотрудником кафедры «Контроль качества и промышленная обработка изображений» Технического Университета города Ильменау (Германия).

Galina Polte (born Nedotsuka) was born on May 10, 1985 in Leningrad (now Saint Petersburg). In 2008 she graduated with honors from Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics (SPb GU ITMO). In 2011 she completed her postgraduate studies and defended her PhD thesis in the field of 05.11.01 “Measurement devices and methods” at SPb GU ITMO. The thesis was entitled: “Improving the accuracy of non-contact optical measurement systems”. She is the author of 29 scientific articles and one patent. Currently, she is a researcher at the Department of Quality Assurance and Industrial Image Processing of the Technical University of Ilmenau (Germany).