

ПРИНЦИПЫ ОПРОСА БРЭГГОВСКИХ СТРУКТУР, ВСТРОЕННЫХ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СТЕЛКИ, В ИНТЕРРОГАТОРЕ НА ОСНОВЕ УПОРЯДОЧЕННОЙ ВОЛНОВОДНОЙ РЕШЕТКИ

*Р.М. Муратов¹, Р.Д. Мангутов¹, А.Л. Овчинников¹, И.И. Нуреев¹,
Л.Н. Ибрагимова¹, Ш.Р. Юсупов¹, Р.А. Юсупов¹, С.Г. Алюшина²*

¹Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ
Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10

²Московский финансово-юридический университет МФЮА
Российская Федерация, 115191, Москва, Серпуховский вал, д.17, корп.1

Аннотация. В данной статье представлена система интеллектуальных стелек, со встроенными в них датчиками давления на основе волоконных брэгговских структур, предназначенная для мониторинга походки. Система состоит из трех взаимосвязанных модулей: датчиков стельки, интеррогатора для их опроса на основе волноводной упорядоченной решетки и блока обработки сигнала, сочетающих высокоточное определение брэгговской длины волны в упорядоченной волноводной решетке (УВР) со специальным программным обеспечением для неинвазивного отслеживания характеристик походки в реальном времени. Восемь датчиков стратегически размещены в области первого плюснефалангового сустава и пяточного бугорка обеих ног для определения зон высокого давления и проведена модельная оценка точности определения давления в каждом из них. Предложено использование как классических волоконных брэгговских решеток (ВБР), так и переход от них к новому инновационному типу датчика на адресной волоконной брэгговской структуре (АВБС) с двумя волновыми компонентами и записанными в каждой из них двумя фазовыми π -сдвигами ($2\lambda/2\pi$). В сочетании датчиков на АВБС и обработкой полученных с них данных радиофотонными методами система достигает точности 99,98% измерения давления, превосходя традиционные датчики по линейности, стабильности и помехоустойчивости в задачах мониторинга походки и обнаружения аномального давления.

Ключевые слова: интеллектуальная стелька, волоконная брэгговская решетка, адресная волоконная брэгговская структура, упорядоченная волноводная решетка, мониторинг и классификация походки, обнаружение аномального давления, масштабирование.

Введение

Развитие электроники и датчиков на ее основе способствовало разработке портативных и надежных диагностических носимых устройств для раннего выявления аномалий подошвенного давления, что очень важно в профилактике диабетических язв стопы, реабилитации после инсульта и повышении спортивных результатов [1].

Существуют инновационные носимые устройства, такие как «умные носки» и «умные стельки» со встроенными датчиками для измерения подошвенного давления [2-4].

Помимо использования для регистрации цикла походки и соответствующих параметров, измерение подошвенного давления также имеет решающее значение для предотвращения ложных срабатываний сигнализации о температурной асимметрии.

Помимо чрезмерной стоимости, существующие коммерчески доступные решения ограничены в плане одновременного измерения давления и температуры стопы в режиме реального времени. На основе нашего обзора литературы, коммерчески доступных «умных

стелек» на основе оптоэлектронных датчиков не существует. Эти недостатки не только ограничивают возможности существующих систем для получения полной картины специфической сложности, для мониторинга которой они были созданы, но и ограничивают их универсальность при использовании в различных приложениях.

Оптоэлектронные системы на основе ВБР в последнее время приобрели большую популярность в биомедицинских приложениях благодаря своей невосприимчивости к электромагнитным помехам, возможности мультиплексирования, отсутствию необходимости в дополнительной компенсации влажности, а также высокой точности и разрешению [5, 6]. Они также использовались в качестве преобразователей давления для внутрисосудистых измерений изменений давления, волновых форм пульса лучевой артерии [7], респираторной плетизмографии [8], интерактивного обнаружения силы с помощью экзоскелета [9], для мониторинга подошвенной и сдвиговой силы при ходьбе [6].

За последние несколько лет были опубликованы исследования, посвященные использованию решений на основе оптических датчиков для разработки интеллектуальных носимых устройств для выявления и мониторинга различных осложнений стопы.

Существуют носки, полностью изготовленные из оптического волокна [10], которые показали большие перспективы в точности, но имеют огромный недостаток из-за хрупкости оптического волокна при ношении носка. Эту проблему хрупкости можно решить, используя жесткие стельки вместо носков, как это исследовалось в большинстве исследований.

В [11] разработана система на основе полимерного оптического волокна (ПОВ) с изменением интенсивности для получения данных об угле коленного сустава от датчиков кривизны ПОВ и цикле походки от интеллектуальной стельки, содержащей четыре датчика ПОВ, которая может использоваться для помощи при ходьбе и реабилитации. В [12] разработана стелька на основе ВБР, содержащая четыре решетки для измерения вертикального подошвенного давления, и представлены результаты работы своей системы в различных условиях, чтобы доказать ее эффективность в мониторинге изменений положения тела.

Важной частью системы является принцип опроса ВБР. В [13, 14] предложили решение с беспроводным трансивером для передачи информации о цикле походки вместе с данными от нескольких других датчиков на удаленный сервер, подключенный к облаку, для обеспечения мониторинга пациентов в режиме реального времени. В [14] стелька содержала шесть датчиков ВБР, встроенных в пробковую структуру для измерения цикла походки, а также датчик для мониторинга температуры стопы и ее компенсации во время сбора данных. Для создания портативного интеррогатора, разработанного специально для ВБР интеллектуальной стельки, необходимо перейти от дорогостоящего и громоздкого лабораторного оборудования (например, оптических спектральных анализаторов) к компактным интегральным схемам.

Для прототипа наиболее доступным подходом является метод фильтрации на склоне опорной ВБР, который преобразует сдвиги длины волны в легко измеряемую интенсивность света [15]. Для разработанных в последнее время инновационных АВБС создан малогабаритный интеррогатор с радиофотонным опросом, работающим по методу преобразования адресной частоты на оптическом фильтре с линейной наклонной характеристикой, близком к методу фильтрации на склоне [16].

Для данной работы нами выбран интеррогатор на интегральной фотонной упорядоченной волноводной решетке с гауссовыми каналами – высокостабильное и малогабаритное устройство, способное быть размещенным на ноге или в обуви спортсмена или пациента [17]. Таким образом, лучший вариант для создания мощной и многофункциональной носимой волоконно-оптической сенсорной системы на примере интеллектуальной стельки – монолитно интегрировать интеррогатор, обладающий преимуществами каждого из указанных выше, в один чип [15-17].

Задача данной статьи состоит в том, чтобы определить принцип опроса брэгговских датчиков с помощью такого интеррогатора. В первом разделе рассматривается принцип построения системы, во втором – характеристики опроса ВБР в стандартной УВР, в третьем – повышение точности измерения при переходе к нестандартной УВР с уменьшенной полосой пропускания и увеличением числа задействованных каналов, в четвертом – повышение точности измерения при переходе к $2\lambda/2\pi$ -АВБС с уменьшенной полосой пропускания окон прозрачности по сравнению с полосой отражения ВБР и радиофотонном опросе, т.е. обработкой информации в радиодиапазоне.

1. Иллюстративная схема системы

Система датчиков в стельке состоит из трех основных частей: модуля датчиков в стельке, модуля приема сигнала и модуля обработки сигнала. Эти три части работают синергетически для сбора, передачи и интерпретации данных о подошвенном давлении.

Массив датчиков включает восемь датчиков ВБР на две ноги, стратегически распределенных в двух группах (2 датчика/группа) в отсеках стельки размером 3×3 см². Медиальная группа нацелена на область головки первой плюсневой кости, а латеральная группа контролирует область пяточной кости, обеспечивая пространственное разрешение в ключевых биомеханических зонах, как показано на рис. 1.

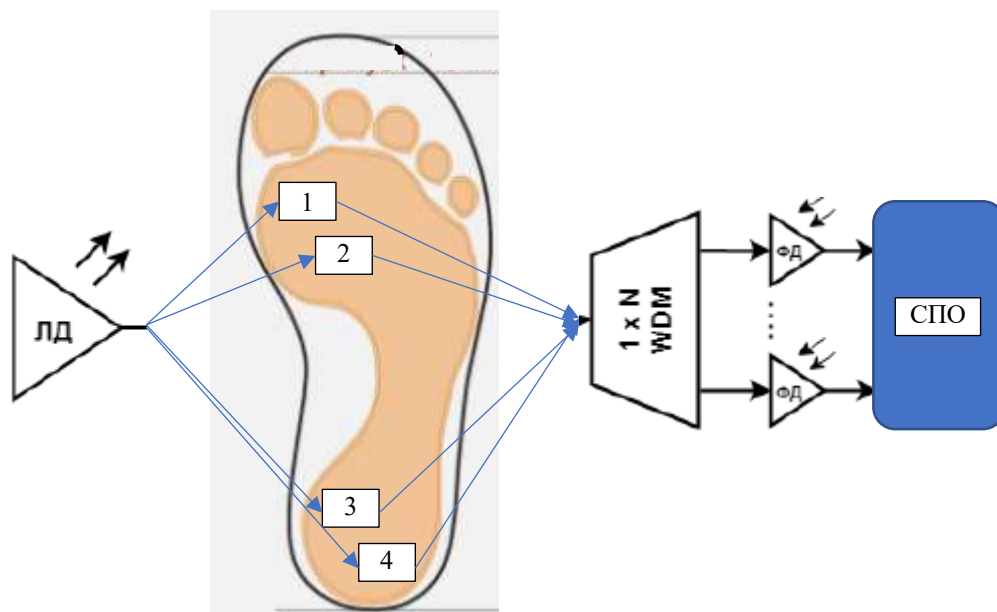


Рис. 1. Иллюстративная схема системы:
ЛД – лазерный диод; 1×N WDM – УВР; ФД – фотодетектор;
СПО – специальное программное обеспечение

Процесс сбора данных также показан на рис. 1: интеррогатор на базе УВР получает сигналы с ВБР со сдвигом длины брэгговской волны, соответствующие динамическим изменениям давления, которые затем обрабатываются в оболочке специального программного обеспечения для извлечения признаков и распознавания позы.

Был выполнен протокол калибровки для проверки метрологических характеристик системы измерения давления на основе ВБР для мониторинга подошвенного давления. Экспериментальная проверка проводилась в условиях постоянной температуры с использованием специализированной платформы для анализа давления, которая показана в п. 2.2.

2. Контроль давления стопы с помощью ВБР и двух каналов УВР

2.1. Оценка стабильности УВР по температуре

Известно, что в УВР длина интегральных волноводов выбирается из условия кратности целому количеству значений m центральной длины волны, что можно отразить следующим образом [18]:

$$\Delta L n_{\text{эфф}} = m \lambda_{\text{УВР}}, \quad (1)$$

где ΔL – разность в физических длинах интегральных волноводов, $n_{\text{эфф}}$ – эффективный коэффициент преломления волновода.

Поскольку ΔL и $n_{\text{эфф}}$ зависят от температуры, то общая характеристика зависимости $\lambda_{\text{УВР}}$ от температуры будет выглядеть следующим образом:

$$\lambda_{\text{УВР}}(T) = \lambda_{\text{УВР}}(T_0) + \frac{\Delta T}{m} \frac{\partial(\Delta L n_{\text{эфф}})}{\partial T}, \quad (2)$$

где $\lambda_{\text{УВР}}(T)$ – центральная длина волны УВР при температуре T , $\lambda_{\text{УВР}}(T_0)$ – центральная длина волны УВР при температуре T_0 , ΔT – разность между температурами T и T_0 .

Для УВР на кремниевой подложке известна зависимость центральной длины волны от температуры:

$$\frac{1}{\Delta L} \frac{\partial(\Delta L n_{\text{эфф}})}{\partial T} = 1 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}. \quad (3)$$

Подставив (3) в (2) получим:

$$\lambda_{\text{УВР}}(T) = \lambda_{\text{УВР}}(T_0) + \frac{10^{-5} \Delta L}{m} \Delta T. \quad (4)$$

Выражение (4) показывает, что центральная длина волны УВР $\lambda_{\text{УВР}}$ монотонно изменяется с повышением/понижением температуры кремниевой подложки. Таким образом, зная температуру кремниевой подложки можно четко определить центральную длину волны УВР.

Все сказанное выше в силу принципа работы УВР относится и к центральной длине волны каждого из двух волноводных каналов УВР, которые в нашем случае должны быть разнесены как минимум на 0,2 нм в зависимости от полосы пропускания или 25 ГГц для выбранного датчика, встроенного в ИС. Дополнительным фактором определения ширины канала будет полоса пропускания ВБР. При полосе пропускания ВБР в 0,1 нм выберем стандартную УВР с полосой пропускания канала 100 ГГц.

Если в интеррогаторе предусмотреть центральные длины волн ВБР датчиков давления стопы, входящими в диапазон длин волн указанных каналов УВР или совпадающими с центральными длинами волн УВР при нормированных значениях температуры, можно, считая температурное положение $\lambda_{\text{УВР}}$ не изменяющимся, определить значение центральной длины волны ВБР при изменении давления. Даже при типовом изменении температуры стопы человека при ходьбе на 20 °С температура УВР изменится в четвертом знаке.

2.2. Математическая модель измерения давления

На рис. 2 показано спектральное соотношение между характерными длинами волн УВР и ВБР-датчиков.

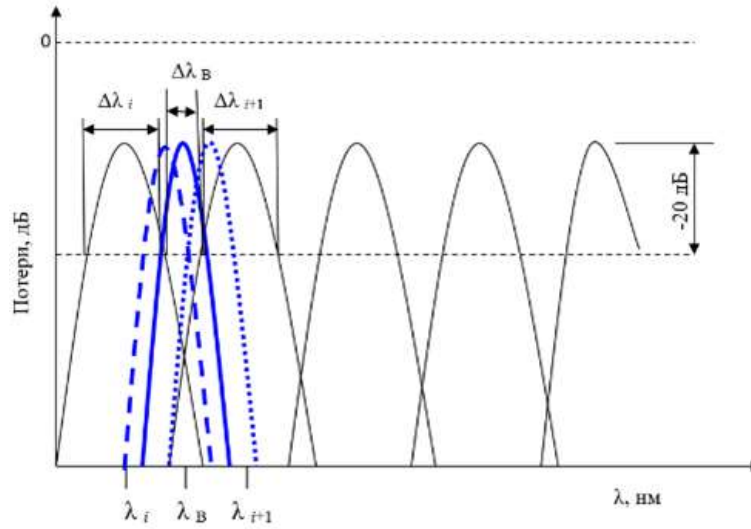


Рис. 2. Спектр УВР и ВБР при разных давлениях

При изменении давления спектр ВБР ИС смещается по длине волны. Учитывая известную нам температуру УВР на ОЛТ можно определить положение максимумов ее каналов и центральных длин волн ВБР со смещением по комплексному способу. Рассмотрим принцип работы схемы.

Функция пропускания УВР для i -го канала гауссовой формы $T_{УВР}(i, \lambda)$ может быть записана следующим образом:

$$T_{УВР}(i, \lambda) = T_{УВРi} \exp \left[-4 \ln 2 \frac{(\lambda - \lambda_{УВРi})^2}{\Delta \lambda_{УВРi}^2} \right], \quad (4)$$

где $\lambda_{УВРi}$ – центральная длина волны, $\Delta \lambda_{УВРi}$ – ширина на полувысоте, $T_{УВРi}$ – максимальное пропускание i -го канала УВР.

Спектр отражения j -го ВБР-датчика гауссовой формы можно представить следующим образом:

$$R_{ВБР}(j, \lambda) = R_{ВБРj} \exp \left[-4 \ln 2 \frac{(\lambda - \lambda_{ВБРj})^2}{\Delta \lambda_{ВБРj}^2} \right], \quad (5)$$

где $\lambda_{ВБРj}$ – центральная длина волны, $\Delta \lambda_{ВБРj}$ – ширина на полувысоте, $R_{ВБРj}$ – максимальное отражение j -го ВБР-датчика.

Отраженный спектр излучения от j -го ВБР-датчика поступает в два канала УВР, i -ый и $(i+1)$ -ый, перекрываясь со спектрами указанных каналов. Обозначим мощность, поступающую на соответствующие i -ый и $(i+1)$ -ый фотоприемники, подключенные к выходам соответствующих каналов УВР, как P_i и P_{i+1} , представляющие свертку указанных спектров:

$$P_i = (1 - L_i) \int_0^\infty S(\lambda) R_{ВБР}(j, \lambda) T_{УВР}(i, \lambda) d\lambda, \quad (6)$$

$$P_{i+1} = (1 - L_{i+1}) \int_0^\infty S(\lambda) R_{ВБР}(j, \lambda) T_{УВР}(i + 1, \lambda) d\lambda. \quad (7)$$

В выражениях (6) и (7) используются следующие обозначения: $S(\lambda)$ – спектр зондирующего источника излучения, в предположении, что его выходная мощность постоянна, L_i и L_{i+1} – коэффициенты ослабления в каждом из каналов. В случае если $L_i = L_{i+1}$ и $\Delta \lambda_{УВРi} =$

$\Delta\lambda_{УВРi+1}$, получим отношение логарифмов мощностей каналов, как функцию соответствия между интенсивностью пропускания УВР и центральной длиной волны j -го ВБР-датчика:

$$10 \lg \left(\frac{P_{i+1}}{P_i} \right) = 10 \frac{\left(\frac{8(\ln 2)\Delta\lambda}{\Delta\lambda_{УВРi}^2 + \Delta\lambda_{ВБРj}^2} \lambda_{ВБРj} + \frac{4(\ln 2)(\lambda_{УВРi+1}^2 - \lambda_{УВРi}^2)}{\Delta\lambda_{УВРi}^2 + \Delta\lambda_{ВБРj}^2} \right)}{\ln 10}, \quad (8)$$

где $\Delta\lambda$ – ширина спектра источника излучения. Используя выражение (8) можно получить центральную длину волны $\lambda_{ВБРj}$ j -го ВБР-датчика, соответствующую приложенному в данный момент времени давлению.

На рис. 3 показан стенд для контроля давления с помощью ВБР, расположенной на трубе, через двухканальный УВР (а) и устройство для приложения давления к трубе (б).

На рис. 4 представлена характеристика измерения давления, полученная на стенде. Полученные значения трендов показали, что чувствительность измерений ВБР по давлению составила $\sim 1,6$ пм/Н. Полученные результаты хорошо совпадают с результатами работ других авторов [18, 19].

3. Способ повышения точности измерений давления при использовании нестандартной УВР на стенде

Начальное положение ВБР, показанное на рис. 3, определяет максимальную чувствительность измерений, при этом задействовано два канала стандартной УВР с полосой пропускания 100 ГГц на уровне – 20 дБ.

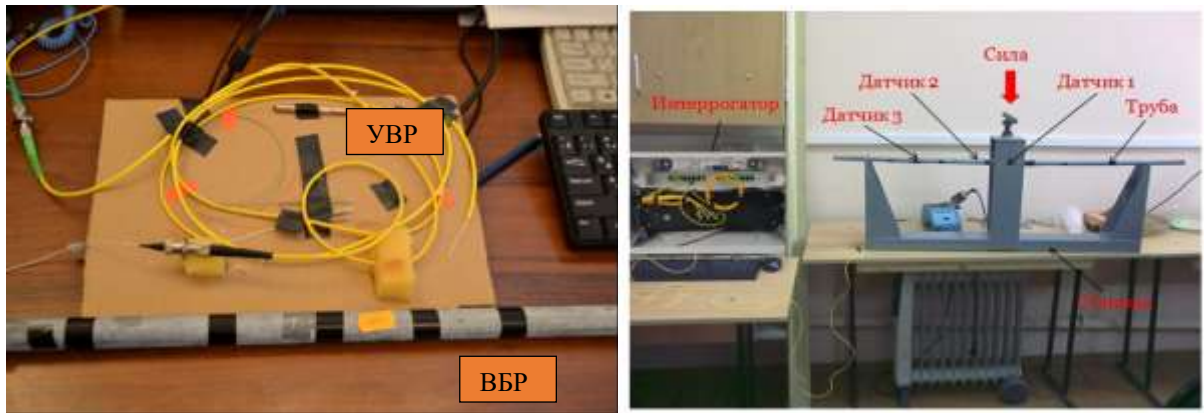


Рис. 3. Экспериментальная установка с двухканальной УВР и тремя ВБР: модуль имитации УВР и ВБР (а); модуль имитации приложения давления

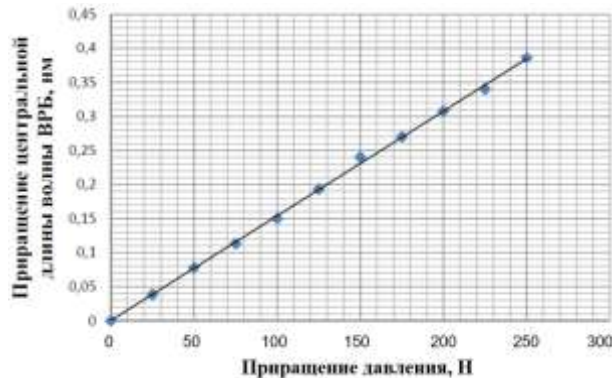


Рис. 4. Зависимость сдвига центральной волны от давления, приложенного к ВБР стенда, имитирующего по величине давление стопы

Повысить точность измерений можно, задействовав большее число каналов, но более узких по полосе пропускания (рис. 5).

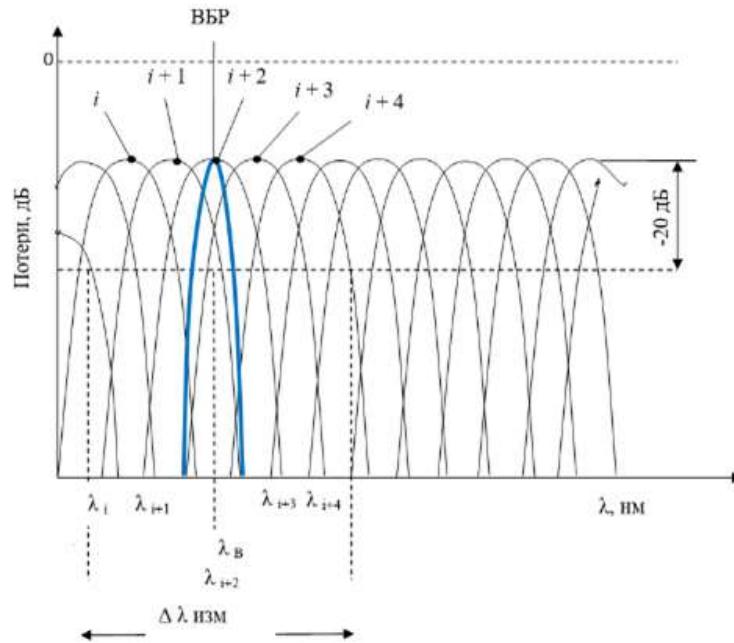


Рис. 5. Спектр нестандартной УВР и положение ВБР в начальной калибровочной точке измерений

В этом случае требуется изготовление нестандартной УВР [20, 21] со структурой каналов, представленной на рис. 4. В этом случае число задействованных каналов равно пяти, а начальная центральная длина волны датчика совпадает с центральной длиной волны ($i+2$)-ого канала.

Отраженный спектр излучения от j -го ВБР-датчика поступает в пять каналов УВР, i -ый ... ($i+4$)-ый, перекрываясь со спектрами указанных каналов при изменении давления. Обозначим мощность, поступающую на соответствующие i -ый ... ($i+4$)-ый фотоприемники, как $P_i \dots P_{i+4}$.

Представим свертку спектров указанных каналов.

$$P_i = (1 - L_i) \int_0^\infty S(\lambda) R_{\text{ВБР}}(j, \lambda) T_{\text{УВР}}(i, \lambda) d\lambda, \quad (9)$$

$$P_{i+1} = (1 - L_{i+1}) \int_0^\infty S(\lambda) R_{\text{ВБР}}(j, \lambda) T_{\text{УВР}}(i + 1, \lambda) d\lambda, \quad (10)$$

$$P_{i+2} = (1 - L_{i+1}) \int_0^\infty S(\lambda) R_{\text{ВБР}}(j, \lambda) T_{\text{УВР}}(i + 2, \lambda) d\lambda, \quad (11)$$

$$P_{i+3} = (1 - L_{i+1}) \int_0^\infty S(\lambda) R_{\text{ВБР}}(j, \lambda) T_{\text{УВР}}(i + 3, \lambda) d\lambda, \quad (12)$$

$$P_{i+4} = (1 - L_{i+1}) \int_0^\infty S(\lambda) R_{\text{ВБР}}(j, \lambda) T_{\text{УВР}}(i + 4, \lambda) d\lambda. \quad (13)$$

Общий анализ показаний ВБР датчика может быть получен как попарный анализ сверток, аналогичный выражению (8).

Анализ рис. 2 и рис. 5 позволяет определить требования к ВБР, как датчикам давления по начальной центральной длине волны относительно сетки УВР [20]:

- при использовании стандартной УВР с шириной канала, например, 0,8 нм, для измерения давления, создаваемого человеком с массой тела 80-100 кг на площадь упакованного датчика с ВБР в диапазоне 80-100 Н, необходимо выбирать начальные центральные длины волн ВБР в соответствии с рекомендациями ИТУ-Т [22, 23] для сетки 100 ГГц, как среднее между центральными длинами волн двух соседних каналов;

- при использовании нестандартной УВР для тех же целей, необходимо выбирать начальные центральные длины волн ВБР в соответствии с паспортом УВР, как центральные длины волн соседних каналов.

Определение спектрального положения ВБР по пяти или большему числу каналов позволит, как минимум, в 2,5 раза повысить точность измерений. Абсолютное значение погрешности измерений определяется шумами фотоприемников и погрешностью АЦП. В общем случае для двухканальной схемы она составляет около 2 пм. При работе по пяти и большему числу каналов она может составить менее 1 пм или 0,1 °С.

Проблему разрешения можно решить и путем снижения шумов фотоприемника, для чего предлагается использовать двух- или четырехкомпонентные фазовые адресные волоконные брэгговские решетки (АВБС): 2π -ВБР, $2\lambda/\pi$ -АВБС, $2\lambda/2\pi$ -АВБС [24, 25].

Если первая представляет собой ВБР с двумя фазовыми π -сдвигами, вторая – две ВБР с фазовым π -сдвигом в каждой, то последняя – две ВБР с двумя фазовыми π -сдвигами в каждой и находится на стадии разработки. Преимуществом этих решеток является, во-первых, наличие нескольких компонент на адресных частотах, обработка выходных сигналов на которых лежит в области минимальных шумов фотоприемников, что позволит повысить точность измерений, а, во-вторых, ширина полосы пропускания окна прозрачности, которая достигает величины 0,05 пм, и используется в рассматриваемой схеме интеррогатора вместо ВБР, у которой полоса пропускания в 20 раз шире. Возможность такой реализации обеспечивается работой $2\lambda/2\pi$ -АВБС на пропускание.

4. Способ повышения точности измерений давления при использовании $2\lambda/2\pi$ -АВБС

На рис. 6 показано спектральное соотношение между характерными длинами волн УВР и $2\lambda/2\pi$ -АВБС (зеленые линии).

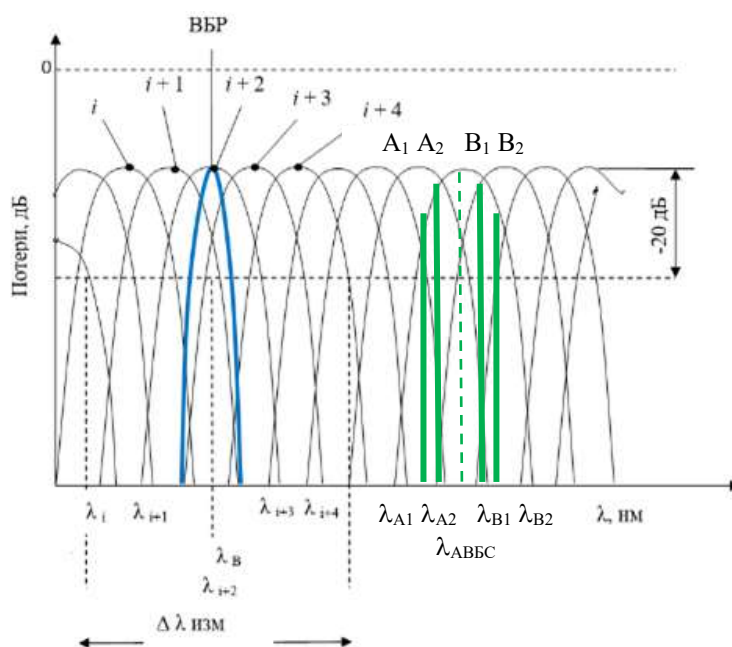


Рис. 6. Спектр УВР при настройке $2\lambda/2\pi$ -АВБС на канал без воздействия давления

На рис. 6 показаны четыре компонента A1, A2 и B1, B2, сформированные окнами прозрачности $2\lambda/2\pi$ -АВБС, с соответствующими длинами волн компонент λ_{A1} , λ_{A2} и λ_{B1} , λ_{B2} и центральной длиной волны структуры $\lambda_{АВБС}$.

Форма частотного отклика каждой из спектральных составляющих на частотах окон прозрачности, сформированных на основе $2\lambda/2\pi$ -АВБС, описывается контуром Лоренца:

$$I_{\text{АВБС}}(j, \lambda) = I_{\text{АВБС}j} \frac{(\Delta\lambda_{\text{АВБС}j} / 2)^2}{(\lambda - \lambda_{\text{АВБС}j}) + (\Delta\lambda_{\text{АВБС}j} / 2)^2}, \quad (14)$$

где $I_{\text{АВБС}}(j, \lambda)$ – амплитуда компоненты j на длине волны λ , $I_{\text{АВБС}j}$, $\lambda_{\text{АВБС}j}$, $\Delta\lambda_{\text{АВБС}j}$ – ее максимальная амплитуда, центральная длина волны и полоса пропускания.

При этом $j=1,2,3,4$ соответствует окнам прозрачности на длинах волн $\lambda_{\text{А1}}$, $\lambda_{\text{А2}}$ и $\lambda_{\text{В1}}$, $\lambda_{\text{В2}}$.

Представим свертку спектров указанных каналов.

$$P_i = (1 - L_i) \int_0^\infty S(\lambda) [\sum_j I_{\text{АВБС}}(j, \lambda)] T_{\text{УВР}}(i, \lambda) d\lambda, \quad (15)$$

$$P_{i+1} = (1 - L_{i+1}) \int_0^\infty S(\lambda) [\sum_j I_{\text{АВБС}}(j, \lambda)] T_{\text{УВР}}(i + 1, \lambda) d\lambda, \quad (16)$$

$$P_{i+2} = (1 - L_{i+1}) \int_0^\infty S(\lambda) [\sum_j I_{\text{АВБС}}(j, \lambda)] T_{\text{УВР}}(i + 2, \lambda) d\lambda, \quad (17)$$

$$P_{i+3} = (1 - L_{i+1}) \int_0^\infty S(\lambda) [\sum_j I_{\text{АВБС}}(j, \lambda)] T_{\text{УВР}}(i + 3, \lambda) d\lambda, \quad (18)$$

$$P_{i+4} = (1 - L_{i+1}) \int_0^\infty S(\lambda) [\sum_j I_{\text{АВБС}}(j, \lambda)] T_{\text{УВР}}(i + 4, \lambda) d\lambda. \quad (19)$$

Общий анализ показаний $2\lambda/2\pi$ -АВБС датчика может быть получен как попарный анализ свертки, аналогичный выражению (8).

Рассмотрим формирование сигнала для случая, показанного на рис. 6.

Широкополосное излучение лазерного диода поступает на $2\lambda/2\pi$ -АВБС, в которой из полного спектра излучения вырезаются четыре узкополосных участка, соответствующие окнам прозрачности, разнесенным на адресную частоту. Для простоты вывода формул примем их как гармонические одночастотные составляющие. Тогда прошедшее $2\lambda/2\pi$ -АВБС и канал УВР излучение будет выглядеть как:

$$F(t) = \left(\begin{array}{l} A_1 \cdot \sin[\omega_{\text{А1}}t] + A_2 \cdot \sin[\omega_{\text{А2}}t] + \\ + B_1 \cdot \sin[\omega_{\text{В1}}t] + B_2 \cdot \sin[\omega_{\text{В2}}t] \end{array} \right), \quad (20)$$

где A_i и B_i – амплитуды составляющих $2\lambda/2\pi$ -АВБС, перед входом в УВР равные; $\omega_{\text{А1}}$ и $\omega_{\text{А2}}$, $\omega_{\text{В1}}$ и $\omega_{\text{В2}}$ – частотное положение окон прозрачности A и B компонент структуры на длинах волн $\lambda_{\text{А1}}$, $\lambda_{\text{А2}}$ и $\lambda_{\text{В1}}$, $\lambda_{\text{В2}}$, а $(\omega_{\text{А1}} - \omega_{\text{В2}})/2$ – ее основная адресная частота; $(\omega_{\text{А1}} - \omega_{\text{А2}})$ и $(\omega_{\text{В1}} - \omega_{\text{В2}})$ – первая и вторая дополнительные адресные частоты, в общем случае также равные.

Мощность светового потока на выходе фотоприемника описывается как (21).

Колебание мощности светового потока на выходе фотоприемника (пропорциональное колебанию мощности выходного тока фотоприемника) позволяет однозначно выделить составляющие на адресных частотах, для чего в программном обеспечении устанавливаются три фильтра на основную и дополнительные адресные частоты. Отметим, что при обработке слагаемых (21) анализ ведется на промежуточных частотах, лежащих в области минимальных шумов фотоприемника [26-32]. В этом случае отношение сигнал/шум измерений увеличивается от 3 до 7 раз в зависимости от полосы пропускания канала УВР и фотоприемника.

$$P(t) = F(t)F^*(t) \sim \left\{ \begin{array}{l} A_1^2 + A_2^2 + B_1^2 + B_2^2 + \\ [A_1A_2 \cos(\omega_{A1} - \omega_{A2})t + B_1B_2 \cos(\omega_{B1} - \omega_{B2})t] + \\ + \left[\begin{array}{l} A_1B_1 \cos(\omega_{A1} - \omega_{B1})t + \\ + A_1B_2 \cos(\omega_{A1} - \omega_{B2})t + \\ + A_2B_1 \cos(\omega_{A2} - \omega_{B1})t + \\ + A_2B_2 \cos(\omega_{A2} - \omega_{B2})t \end{array} \right] \end{array} \right\}. \quad (21)$$

Для того, чтобы избежать адресных коллизий весь набор адресных частот для датчиков должен удовлетворять следующим условиям: $(\omega_{A1} - \omega_{B2})/2k \neq (\omega_{A1} - \omega_{B2})/2m$, где k и m – номера $2\lambda/2\pi$ -АВБС, $k, m \in \mathbf{N}$, где \mathbf{N} – множество $2\lambda/2\pi$ -АВБС, при этом разность $(\omega_{A1} - \omega_{B2})/2k - (\omega_{A1} - \omega_{B2})/2m$ не равна и не кратна в целом и частном $(\omega_{A1} - \omega_{B2})/2k$ и $(\omega_{A1} - \omega_{B2})/2m$, и не может быть меньше $(\omega_{A1} - \omega_{B2})/2k, m \pm (\omega_{A1} - \omega_{A2})_{k, m} \pm (\omega_{B1} - \omega_{B2})_{k, m}$. В общем случае это же условие должно соблюдаться для $(\omega_{A1} - \omega_{A2})_{k, m}$ и $(\omega_{B1} - \omega_{B2})_{k, m}$.

Заключение

Данная работа расширяет область применения носимых устройств для анализа походки и представляет масштабируемую структуру для интеграции оптических датчиков в персонализированные медицинские решения. Будущие направления исследований включают расширение массива датчиков для достижения более высокого пространственного разрешения, комбинирование алгоритмов температурной компенсации и проверку системы в клинических условиях. Ожидается, что она найдет применение в дистанционном медицинском обслуживании, спортивной науке и вспомогательной робототехнике, тем самым преодолевая разрыв между лабораторным анализом походки и реальным мониторингом.

Среди вопросов, требующих дополнительных исследований и отражения в следующих публикациях, следует выделить решение конструктивных проблем укладки оптического волокна в теле стельки для минимизации искажений естественной биомеханики стопы и оценки массогабаритных характеристик и энергопотребления лазерного диода, фотоприемников и блока цифровой обработки.

Работа выполнена в рамках государственного задания FZSU-2026-0009, рег. номер НИОКТР 126020516512-7.

Список литературы

1. Jaeho Lee. Flexible Smart Insole and Plantar Pressure Monitoring Using Screen-Printed Nanomaterials and Piezoresistive Sensors / Lee Jaeho, Lee Jimin, Lee Yoon Jae, et al. // ACS Appl. Mater. Interfaces. – 2025. – 17. – P. 47153–47161
2. Reyzelman, Alexander M. Continuous Temperature-Monitoring Socks for Home Use in Patients with Diabetes: Observational Study / Reyzelman, Alexander M., et al. // Journal of medical Internet research. – 2018. - 20 (12). - e12460.
3. Crisologo, P. Andrew. Remote home monitoring to identify and prevent diabetic foot ulceration / Crisologo, P. Andrew, and Lawrence A. Lavery // Annals of translational medicine. – 2017. – 5 (21). –P. 430.

4. Schneider W.L., Severn M. Prevention of Plantar Ulcers in People With Diabetic Peripheral Neuropathy Using Pressure-Sensing Shoe Insoles. In: CADTH Issues in Emerging Health Technologies. Canadian Agency for Drugs and Technologies in Health, Ottawa (ON); 2016.
5. Correia R. Biomedical application of optical fibre sensors / R. Correia, S. James, S. Lee, S. Morgan, and S. Korposh // *Journal of Optics*. – 2018. – vol. 20. – P. 073003.
6. Tavares C. Optically Instrumented Insole for Gait Plantar and Shear Force Monitoring / C. Tavares, F. Leite, M. D. F. Domingues, T. Paixão, N. Alberto, A. Ramos, et al. // *IEEE Access*. – 2021. – vol. 9. – P. 132480-132490.
7. Jia D. A fiber Bragg grating sensor for radial artery pulse waveform measurement / D. Jia, J. Chao, S. Li, H. Zhang, Y. Yan, T. Liu, et al. // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. – 2017. – vol. 65. – P. 839-846.
8. Allsop T. D. Application of long-period-grating sensors to respiratory plethysmography / T.D. Allsop, K. Carroll, G. Lloyd, D. J. Webb, M. Miller, and I. Bennion // *Journal of biomedical optics*. – 2007. – vol. 12. – P. 064003.
9. He B. An intensity-modulated fiber optic pressure sensor for hand- exoskeleton interactive force detection, / B. He, M. Li, J. Chen, W. Guo, G. Xu, and J. Xie // in 2019 16th International Conference on Ubiquitous Robots (UR), 2019. – P. 750-754.
10. Najafi, Bijan. An optical-fiber-based smart textile (smart socks) to manage biomechanical risk factors associated with diabetic foot amputation / Najafi, Bijan, et al. // *Journal of diabetes science and technology*. – 11.4 (2017): 668-677.
11. Leal-Junior A. Optical Fiber for In-Shoe Monitoring of Ground Reaction Forces During the Gait / A. Leal-Junior, A. Frizera, L. Avellar, C. Marques, and M. Pontes // *IEEE Sensors Journal*. – 2018. – vol. 18, no. 6. – P. 2362-2368, Available: 10.1109/jsen.2018.2797363.
12. Lakho R. A smart insole for monitoring plantar pressure based on the fiber Bragg grating sensing technique / R. Lakho, Z. Yi-Fan, J. Jin-Hua, H. Cheng-Yu, and Z. Ahmed Abro // *Textile Research Journal*. – 2019. – vol. 89, no. 17. – P. 3433-3446, Available: 10.1177/0040517519833977.
13. Domingues M. Non-Invasive Insole Optical Fiber Sensor Architecture for Monitoring Foot Anomalies / M. Domingues et al. // *GLOBECOM-2017 IEEE Global Communications Conference*, 2017, Available: 10.1109/glocom.2017.8255026.
14. Domingues M. Insole optical fiber Bragg grating sensors network for dynamic vertical force monitoring / M. Domingues et al. // *Journal of Biomedical Optics*. – 2017. – vol. 22. – no. 9. – P. 091507, Available: 10.1117/1.jbo.22.9.091507.
15. Alex Hegyi. Time- and Wavelength-Multiplexed Wavelength Shift Detection for High-Resolution, Low-Cost Distributed Fiber-Optic Sensing / Alex Hegyi, Peter Kiesel, and Ajay Raghavan // *Journal of Lightwave Technology*. – Vol. 35, No. 19. – P. 4234-4241.
16. Zhongjin Lin. Photonic integrated interrogators for wearable fiber-optic sensing / Zhongjin Lin, Ruohui Wang, Lukas Chrostowski, Xinlun Cai // *Optics and Lasers in Engineering* 181 (2024). – P. 108396.
17. Ting Li. Monolithic integrated chip of AWG and PD for an FBG interrogation system / Ting Li, Pei Yuan, Shufeng Li, et al. // *Optics Express*. – Vol. 32, No. 9. – 2024. – P. 15827-39.
18. Li, H. Preliminary investigation of an SOI-based arrayed waveguide grating demodulation integration microsystem / H. Li, W. Zhou, Y. Liu [et al.] // *Sci. Rep.* – 2014. – V. 4, no. 4848. – P. 1-6.
19. APSS Apollo Application Note on Array Waveguide Grating (AWG). Available from: www.apollophotonics.com - 10.05.2026.
20. Takada, K. Fabrication of 2 GHz-spaced 16-channel arrayed-waveguide grating demultiplexer for optical frequency monitoring applications / K. Takada, M. Abe, Y. Hida et al. // *Electronics Letters*. – 2000. – V. 36. – N. 19. – P. 1643-1644.

21. Muñoz, P. Analysis and design of arrayed waveguide gratings with MMI couplers / P. Muñoz, D. Pastor, and J. Capmany // *Opt. Express*. – 2001. – V. 9. – P. 328–338.
22. ITU-T, G-series Recommendations - Supplement 39 - Optical system design and engineering considerations, Dec. 2008. [Online]. Available from: <https://www.itu.int/epublications/publication/itu-t-g-suppl-39-2025-03-optical-system-design-and-engineering-considerations>
23. G.698.x - Multichannel seeded DWDM applications with single-channel optical interfaces, Feb. 2012. [Online]. Available from: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.698.3/en>.
24. Agliullin T. Overview of Addressed Fiber Bragg Structures' Development / T. Agliullin, G. Il'In, A. Kuznetsov et al. // *Photonics*. – 2023. – Т. 10. – № 2. – С. 175.
25. Agliullin T. Addressed Fiber Bragg Structures in Load-Sensing Wheel HUB Bearings / T. Agliullin, R. Gubaidullin, A. Sakhabutdinov et al. // *Sensors*. – 2020. – Т. 20. – № 21. – С. 1-14.
26. Morozov O.G. Optical Vector Network Analyzer Based on Amplitude-Phase Modulation / O.G. Morozov, G.A. Morozov, I.I. Nureev, D.I. Kasimova // *Proc. of SPIE*. – 2016. – v. 9807. – P. 980717.
27. Морозов О.Г. Определение характеристик спектра усиления Манделъштама–Бриллюэна с помощью двухчастотного зондирующего излучения / О.Г. Морозов, Г.А. Морозов, А.А. Талипов, В.Г. Куприянов // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. – 2012. – Т. 15. – № 3. – С. 95-100.
28. Куприянов В.Г. Волоконно-оптические технологии в распределенных системах экологического мониторинга / В.Г. Куприянов, О.А. Степущенко, В.В. Куревин, О.Г. Морозов, И.Р. Садыков // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2011. – Т. 13. – № 4-4. – С. 1087-1091.
29. Айбатов Д.Л. Преобразование спектра оптического излучения в двухканальном модуляторе Маха-Цендера и ROF-фильтр на его основе / Д.Л. Айбатов, О.Г. Морозов, Т.С. Садеев // *Нелинейный мир*. – 2010. – Т. 8. – № 5. – С. 302-309.
30. Талипов А.А. Метод формирования двухчастотного излучения для синтеза солитонов и применения спектрально-эффективной модуляции RZ и CSRZ форматов в оптических сетях доступа / А.А. Талипов, О.Г. Морозов, Г.И. Ильин и др. // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы*. 2012. № 2 (16). С. 3-12.
31. Sadeev T.S., Investigation and analysis of Electro-optical Devices in Implementation of Microwave Photonic Filters / T.S. Sadeev, O.G. Morozov et al. // *Proc. of SPIE*. – 2012. – V. 8410. – P. 841007
32. Natanson O.G. Development Problems of Frequency Reflectometry for Monitoring systems of Optical Fiber Structures / O.G. Natanson, O.G. Morozov, R.A. Akhtiamov, V.F. Gusev // *Proc. of SPIE*. – 2005. – V. 5854, P. 215-223.

PRINCIPLE OF INTERROGATION IN ARRAYED WAVEGUIDE GRATING FOR BRAGG STRUCTURES, EMBEDDED IN SMART INSOLES

*R.M. Muratov¹, R.D. Mangutov¹, A.L. Ovchinnikov¹, I.I. Nureev¹,
L.N. Ibragimova¹, Sh.R. Yusupov¹, R.A. Yusupov¹, S.G. Alyushina²*

¹Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev-KAI
10, st. Karl Marx, Kazan, 420111, Russian Federation

²Moscow University of Finance and Law MFUA
Bldg.1, 17, Serpukhovskiy Val, Moscow, 115191, Russian Federation

Annotation. This article presents a system of intelligent insoles with embedded FBG pressure sensors designed for gait monitoring. The system consists of three interconnected modules: insole sensors, an interrogator for interrogating them using an arrayed waveguide grating (AWG), and a signal processing unit. These modules combine high-precision AWG wavelength detection with specialized software for noninvasive real-time gait tracking. Eight sensors are strategically placed at the first metatarsophalangeal joint and calcaneal tuberosity of both feet to identify high-pressure zones, and a model-based assessment of the pressure determination accuracy in each of them is conducted. The proposed approach utilizes both conventional fiber Bragg gratings (FBGs) and a transition from them to a new, innovative sensor based on an addressable fiber Bragg structure (AFBS) with two wave components and two phase shifts ($2\lambda/2\pi$) recorded in each. By combining AFBS sensors and processing the data obtained from them, the system achieves 99.98% pressure measurement accuracy, outperforming traditional sensors in linearity, stability, and noise immunity for gait monitoring and abnormal pressure detection.

Keywords: intelligent insole, fiber Bragg grating, addressable fiber Bragg structure, ordered waveguide grating, gait monitoring and classification, abnormal pressure detection, scaling.

Статья представлена в редакцию 14 мая 2026 г.