

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ВДОЛЬ
КОНТУРА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА
НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА САНЬЯКА¹© 2023 г. Т. В. Гриценко^{а,*}, Н. В. Дьякова^а, А. А. Жирнов^а, К. В. Степанов^а,
Р. И. Хан^а, К. И. Кошелев^а, А. Б. Пнев^а, В. Е. Карасик^а^аМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1

*e-mail: chobantv@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.01.2023 г.

После доработки 24.04.2023 г.

Принята к публикации 24.04.2023 г.

Проведено исследование чувствительности интерферометра Саньяка при различных координатах акустического воздействия. Получены и экспериментально подтверждены принципы формирования мертвой зоны в акустическом распределенном волоконно-оптическом датчике на основе интерферометра Саньяка. Исследован отклик интерферометра при разных типах акустического воздействия на контур: в виде прямоугольного импульса, синусоидального и в виде периодической треугольной функции; изучен характер изменения разности фаз на выходе интерферометра Саньяка для каждого из них. При найденном значении типовой частоты $f_{i, \text{hit}} = 10.8$ кГц и длине контура 20 км проведены численное моделирование и экспериментальное исследование размаха разности фаз при акустическом воздействии через каждый 1 км петли в диапазоне от 0 до 10 км. Предложен метод устранения мертвой зоны для интеграции интерферометра Саньяка в состав комплексной системы мониторинга с использованием фазочувствительного оптического рефлектометра временной области.

DOI: 10.31857/S0032816223050105, EDN: ZJPJJP

1. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день распределенные акустические волоконно-оптические датчики (АВОД) широко распространены, так как они позволяют решать задачи удаленного мониторинга и обеспечения безопасности трубопроводов, железнодорожных путей, границ предприятий и других протяженных объектов [1]. В отличие от точечных датчиков распределенные позволяют измерять интенсивность и частоту внешних акустических воздействий на волоконно-оптический кабель на всем его протяжении и определять местоположение источника этих воздействий с высокой точностью [2]. Распределенные АВОД можно разделить на два основных вида: датчики на основе рефлектометров и датчики на основе интерферометров (Маха–Цандера, Майкельсона и Саньяка). Широко применяемые на сегодняшний день распределенные АВОД на основе фазочувствительного оптического рефлектометра (φ-OTDR) позволяют от-

дельно регистрировать воздействия с высоким разрешением (от 10 м) и контролировать объекты длиной до 80 км без усилителей сигнала в линии [3]. Однако для такой длины трассы и при дальнейшем ее увеличении, что зачастую требуется на практике, снижаются пространственное разрешение [4] и чувствительность [5, 6] на конце линии, что является существенным недостатком. Благодаря тому, что в интерферометрических АВОД сигнал формируется не обратно-рассеянным, а проходящим в прямом направлении излучением, в них в отличие от рефлектометров может быть легко реализовано сенсорное волокно длиной свыше 100 км без потери чувствительности при обеспечении погрешности определения координаты воздействия порядка десятков метров [7]. АВОД на основе интерферометра Саньяка обладают существенными преимуществами по сравнению с АВОД на основе интерферометров Майкельсона и Маха–Цандера, поэтому они привлекают высокий интерес. Прежде всего, к источнику излучения в интерферометре Саньяка не предъявляется строгих требований по ширине спектра [8–13] по сравнению как с интерферометрами Майкельсона и Маха–Цандера, так и с

¹ Международная конференция “Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика 2023”, Россия, Пермь, 24–26 мая 2023 г. (International conference “Optical Reflectometry, Metrology & Sensing 2023”, Russia, Perm, 24–26, May 2023).

φ-OTDR. Применение лазерных диодов с широким спектром в качестве источника излучения позволяет значительно снизить стоимость АВОД, а также увеличить допустимую длину сенсорного волокна, поскольку с увеличением ширины спектра излучения источника увеличивается пороговая мощность возникновения нелинейных эффектов, в частности вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна [14], что позволяет направлять в линию более мощное излучение. В результате в датчиках со схемой на основе интерферометра Саньяка длина сенсорного элемента может достигать 150 км [12] без повторителей и усилителей сигнала на протяжении волокна, и при такой протяженности трассы погрешность определения координаты воздействий составляет ± 30 м, т.е. менее 0.02% от указанной длины. Сигнал на выходе интерферометра Саньяка более стабилен по сравнению с интерферометром Маха–Цандера, и он мало зависит от изменений температуры и давления окружающей среды, что позволяет значительно проще обнаруживать воздействие с высокой точностью. При этом интерферометр Саньяка имеет более высокую чувствительность к высокочастотным акустическим воздействиям по сравнению с интерферометром Маха–Цандера [15].

Ввиду своих преимуществ распределенные АВОД на основе интерферометра Саньяка являются весьма перспективными и быстро развиваются. На сегодняшний день распространены три основные группы схем на основе распределенных АВОД на основе интерферометра Саньяка: а) один или несколько сонаправленных контуров интерферометра Саньяка одинаковой длины с опросом по алгоритму нулевых частот, который заключается в анализе спектра интерференционного сигнала [16]; б) интерферометр Саньяка с двумя сонаправленными контурами одинаковой длины и опросом по алгоритму внесения временной задержки (time delay estimation, TDE), который основан на анализе восстановленных фаз сигналов [12]; в) два встречно направленных контура интерферометра Саньяка с вычислением координаты воздействия по временной задержке между сигналами [9, 17]. Помимо использования АВОД на основе интерферометра Саньяка в качестве самостоятельного устройства мониторинга перспективным является его применение в составе комплексной системы в качестве дополнения к φ-OTDR [18]. Такой подход позволит объединить преимущества этих двух типов датчиков и получить высокоточную и чувствительную систему с большой протяженностью контролируемой трассы. Однако для АВОД на основе интерферометра Саньяка характерен недостаток, отсутствующий для интерферометрических датчиков других типов. В силу особенностей формирования сигнала в контуре интерферометра Саньяка возникают

участки, в пределах которых воздействие не может быть зарегистрировано, — так называемые мертвые зоны [19]. Мертвые зоны могут приводить к возникновению ошибок при определении местоположения источника воздействия, что недопустимо для охранных систем. Для расширения возможностей АВОД на основе интерферометра Саньяка и для успешной его интеграции с φ-OTDR для создания высокоточной комплексной системы необходимо устранить этот недостаток. Поэтому актуальной остается проблема разработки методов устранения мертвых зон в интерферометре Саньяка или уменьшения их влияния на точность определения координаты воздействия. Для этого необходимо провести исследование чувствительности интерферометра Саньяка, что позволит определить причины возникновения мертвых зон, их протяженность и местоположение вдоль контура при различных акустических воздействиях.

2. ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ МЕРТВЫХ ЗОН В ДАТЧИКЕ НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА САНЬЯКА

Интерферометр Саньяка, схема которого приведена на рис. 1, представляет собой контур оптического волокна, замкнутый на выходы X-образного разветвителя Р. В петле излучение источника распространяется по общему пути в двух направлениях: по часовой стрелке (CW) и против часовой стрелки (CCW), и интерференционный сигнал регистрируется приемником излучения. Внешнее акустическое воздействие в точке, удаленной от начала петли длиной L на некоторое расстояние d , локально изменяет показатель преломления и длину оптического волокна, что приводит к возникновению дополнительного набега фазы $\varphi(t)$. Излучение в направлениях CW и CCW приобретает одинаковый набег фазы, но в разные моменты времени их разница Δt определяется как разница времени хода излучения от точки воздействия до разветвителя Р в двух направлениях, поэтому результирующая разность фаз на выходе петли $\Delta\varphi(t, d)$ и, следовательно, интерференционный сигнал, зависят от координаты d . Приемник излучения регистрирует изменение интерференционного сигнала в течение времени $I(t, d) \propto \cos(\Delta\varphi(t, d))$ и по известным алгоритмам [20, 21] вид разности фаз на выходе петли может быть восстановлен.

Чувствительность интерферометра Саньяка будем оценивать по формируемой на выходе петли разности фаз. Если формируемая на выходе петли разность фаз меньше пороговой, то интерферометр Саньяка нечувствителен, и воздействие не может быть зарегистрировано. Пороговая разность фаз — это минимальная разность фаз на вы-

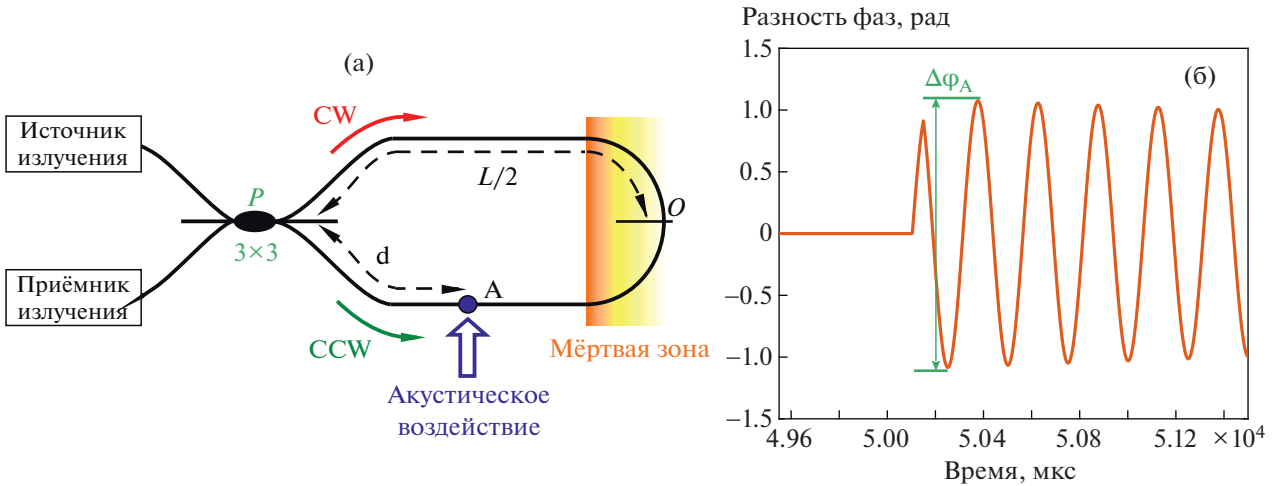


Рис. 1. Конфигурации схемы распределенного волоконно-оптического микрофона на основе ф-OTDR без усиления излучения (а), с усилением обратно-рассеянного излучения предусилителем (б), с усилением направляемого в линию излучения бустером (в), с усилением излучения бустером и предусилителем совместно (г).

ходе петли интерферометра Саньяка при наличии акустического воздействия, которая приводит к формированию интерференционного сигнала, который может быть зарегистрирован при определенном отношении сигнал/шум на приемнике излучения. Если воздействие находится около середины петли, то разность фаз на ее выходе мала, поэтому из-за особенностей формирования сигнала мертвая зона возникает вблизи середины петли интерферометра Саньяка [22], как показано на рис. 1а. То, насколько большая разность фаз сформировалась на выходе петли, определяет чувствительность интерферометра Саньяка, и ее можно оценивать по амплитуде колебания разности фаз φ_A (рис. 1б), которую мы будем называть размахом разности фаз:

$$\varphi_A = \max \{ \Delta\varphi(t, \Delta t) \} - \min \{ \Delta\varphi(t, \Delta t) \}. \quad (1)$$

Таким образом, размах разности фаз на выходе петли зависит от координаты воздействия, поэтому чувствительность датчика также зависит от координаты d . Кроме того, на величину результирующей разности фаз влияют параметры акустического воздействия, так как от частоты и амплитуды воздействия зависит частота модуляции разности фаз. Функциональная зависимость разности фаз на выходе интерферометра Саньяка от координаты и частоты воздействия определяется выражением

$$\Delta\varphi(f_i, d) = A \cdot \sin \left(\pi f_i \frac{(L - 2d)n}{c} \right) \cdot \cos \left(2\pi f_i \left[t - \frac{(L - 2d)n}{2c} \right] \right), \quad (2)$$

$$d \leq \frac{L}{2},$$

где A – коэффициент, зависящий от амплитуды воздействия, f_i – частота колебания набега фазы, зависящая от частоты воздействия, n – показатель преломления сердцевины волокна, c – скорость света.

Как следует из анализа второго множителя в полученном выражении, разность фаз на выходе петли интерферометра Саньяка представляет собой функцию двух переменных: частоты f_i колебания набега фазы и координаты воздействия d . Минимумы $f_{i,\min}$ и максимумы $f_{i,\max}$ размаха разности фаз распределены согласно уравнению гиперболы:

$$f_{i,\min} = \frac{cN}{n(L - 2d)}, \quad N \in Z, \quad d \leq \frac{L}{2}, \quad (3)$$

$$f_{i,\max} = \frac{c(N + 1/2)}{n(L - 2d)}, \quad N \in Z, \quad d \leq \frac{L}{2}. \quad (4)$$

При координате воздействия $d = L/2$ синус обращается в нуль при любой частоте колебания набега фазы, в результате чего в середине петли всегда присутствует мертвая зона.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКЛИКА ИНТЕРФЕРОМЕТРА САНЬЯКА ПРИ РАЗНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ НА КОНТУР

Поскольку процесс формирования мертвых зон зависит от частоты колебания разности фаз на выходе интерферометра Саньяка при акустических воздействиях на сенсорное волокно, необходимо проанализировать, какой отклик формируется в интерферометре Саньяка при различных типах воздействий. Были проведены экспери-

Таблица 1. Результаты изменения отклика интерферометра Саньяка при различных эталонных воздействиях

Тип воздействия	Параметры воздействия		Параметры отклика	
	Длительность, мкс	Частота повторения, Гц	Частота колебания разности фаз, кГц	Размах разности фаз, рад
Импульс	0.167	60	10.8	1
	0.500		10.8	1.5
	2		10.8	7
	5		10.8	23
	10		10.8	35
	400		10.8	40
Тип воздействия	Частота, кГц		Частота колебания разности фаз, кГц	Размах разности фаз, рад
Синусоида	4 кГц		4.0	12
	8 кГц		8.0	50
Треугольная функция	4 кГц		4.0	25

ментальные исследования, в ходе которых в петлю длиной 20 км в точке с координатой $d = 8$ км был включен пьезоэлектрический преобразователь с намотанными на него 20 метрами волокна. На пьезоэлектрик подавались электрические сигналы генератора, таким образом, осуществлялись эталонные воздействия с разными параметрами. На выходе петли интерференционный сигнал регистрировался двумя приемниками излучения для восстановления его фазы. Были исследованы три типа воздействий: в виде прямоугольного импульса, синусоидальное, а также в виде периодической треугольной функции; у них варьировались основные параметры: для импульса изменялись длительность и частота повторения, а для синусоидального и периодического треугольного сигнала — частота. Во всех экспериментах амплитуда электрического сигнала, подаваемого на пьезоэлектрический преобразователь, составляла 4 В, а частота дискретизации АЦП, регистрирующего сигнал с приемников излучения и направляющего их на ПК для дальнейшей обработки и анализа, — 25 МГц. При отправке на пьезоэлектрик сигнала в виде импульса формируется эталонное воздействие, по своему характеру наиболее приближенное к реальным ударам по волокну, которые могут возникать при колебании конструкции, на которой установлен сенсор, или при непосредственном касании волокна. Синусоидальный сигнал применялся для определения отклика интерферометра Саньяка на одночастотные воздействия, а периодический треугольный — на длительные воздействия со сложным спектральным составом. Были выбраны шесть значений длительности импульса в диапазоне от 167 нс до 400 мкс при фиксированной частоте повторения 60 Гц и два значения частоты колебания си-

нусоидальной и периодической треугольной функций (4 и 8 кГц). При различных параметрах воздействия были измерены размах разности фаз на выходе контура интерферометра Саньяка и частота ее колебания. Результаты представлены в табл. 1. Пример разности фаз, формируемой на выходе петли при воздействии импульсами с длительностью 10 мкс и частотой повторения 60 Гц, представлен на рис. 2а, а при воздействии синусоидой с частотой 8 кГц — на рис. 2б. На обоих графиках отмечен также размах полученной разности фаз φ_A .

Из результатов, представленных в табл. 1 и в виде графиков на рис. 2, видно, что при ударах (которым эквивалентно воздействие на пьезоэлектрик в виде прямоугольного импульса) разность фаз на выходе интерферометра Саньяка можно описать гармонической функцией с частотой $f_{t,\text{hit}} \approx 10.8$ кГц и огибающей, затухающей по экспоненте в зависимости от жесткости волоконно-оптического кабеля и способа его установки на периметре. Частота $f_{t,\text{hit}}$ не зависит от длительности импульса, однако чем длиннее импульс, тем больший размах разности фаз формируется на выходе контура. При гармоническом воздействии частота колебания разности фаз $f_{t,\text{harm}}$ совпадает с частотой самого воздействия, и с увеличением частоты размах разности фаз также увеличивается.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ИНТЕРФЕРОМЕТРА САНЬЯКА ВДОЛЬ КОНТУРА

Для исследования распределения чувствительности интерферометра Саньяка вдоль контура,

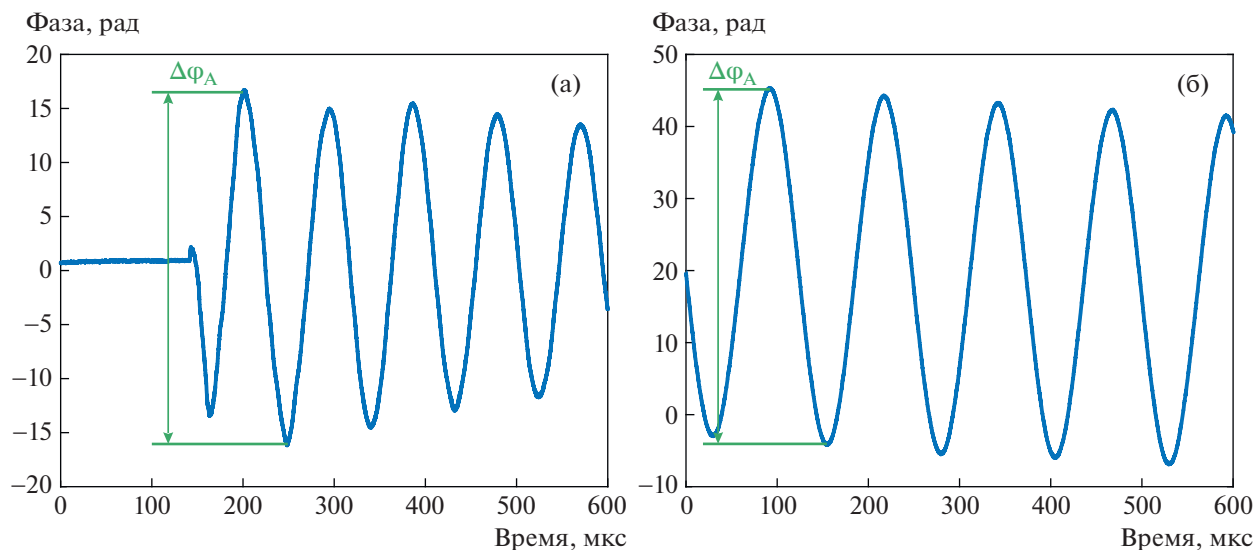


Рис. 2. Графики разности фаз на выходе контура интерферометр Саньяка при воздействии пьезоэлектриком, на который подавался электрический сигнал в виде импульса длительностью 10 мкс (а), синусоиды с частотой 8 кГц (б).

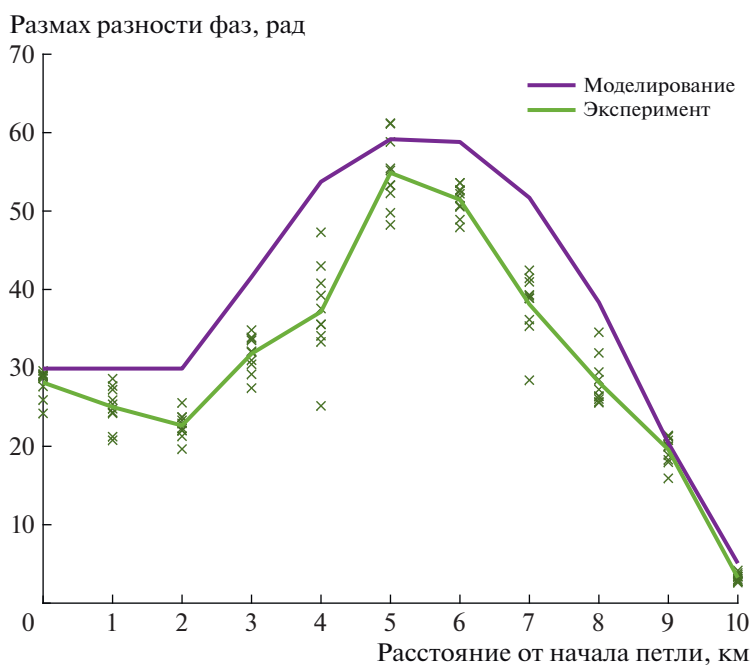


Рис. 3. Зависимость разности фаз от координаты воздействия с частотой $f_{i,\text{hit}} = 10.8$ кГц; сравнение кривых, полученных в результате численного моделирования и измеренных экспериментально.

т.е. в зависимости от координаты воздействия, были проведены теоретические и экспериментальные исследования. Было проведено численное моделирование процесса формирования сигнала в интерферометре Саньяка с учетом найденной функциональной зависимости разности фаз на выходе интерферометра Саньяка от координаты и частоты воздействия, определяемой выраже-

нием (2). При заданной типовой частоте $f_{i,\text{hit}} = 10.8$ кГц и длине контура 20 км был рассчитан размах разности фаз при воздействии, оказываемом на контур в диапазоне от нуля до 10 км через каждый 1 км. Результат представлен на рис. 3.

Максимальный размах разности фаз формируется при воздействии с координатами $d = 5$ км и $d = 6$ км, поскольку в этих случаях набег фазы в

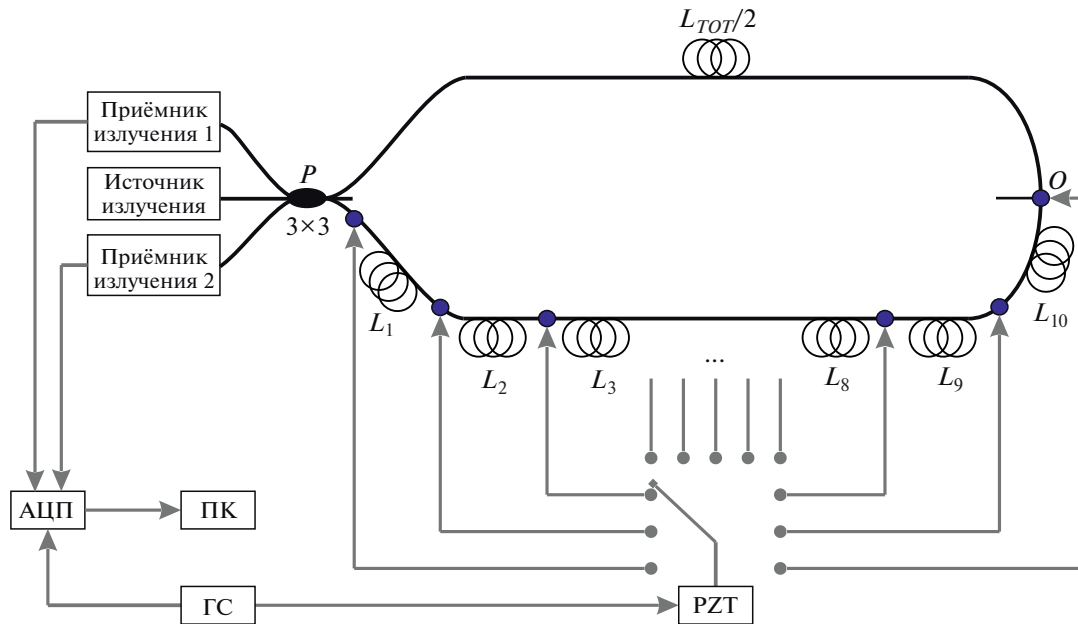


Рис. 4. Схема установки для экспериментального исследования распределения чувствительности в контуре интерферометр Саньяка (PZT – преобразователь, ГС – генератор сигналов).

направлениях CW и CCW сдвинуты друг относительно друга на наибольшее время. При воздействии на координатах $d = 9$ км и $d = 10$ км формируемая разность фаз имеет размах менее 20 рад. Для системы с сенсорным элементом указанной длины в лабораторных и полевых условиях характерный уровень шума приводит к тому, что пороговая разность фаз на выходе датчика, как правило, выше указанного значения, поэтому можно говорить о формировании в этой области мертвой зоны.

Для экспериментального исследования распределения чувствительности в контуре интерферометра Саньяка была разработана и реализована экспериментальная установка, схема которой приведена на рис. 4. Она включает в себя петлю интерферометра Саньяка длиной $L_{TOT} = 20$ км. Первая половина петли реализована в виде катушки длиной 10 км, а вторая половина разбита на десять участков, каждый из которых имел длину $L_i = 1$ км, $i = \overline{1, 10}$. В качестве источника излучения применялся диодный лазер с резонатором на основе интерферометра Фабри–Перо и с центральной длиной волны $\lambda = 1550$ нм. На выходе петли интерференционный сигнал регистрировался двумя приемниками излучения, после чего он преобразовывался АЦП с частотой дискретизации 25 МГц и передавался на ПК, где осуществлялись восстановление фазы сигнала и расчет размаха полученной разности фаз для каждого значения координаты.

Воздействие на петлю осуществлялось при помощи пьезоэлектрического преобразователя, на который подавались импульсы с генератора сигналов с амплитудой 4 В, длительностью 10 мкс и частотой повторения 60 Гц. Для создания акустического воздействия с координатой d_i пьезоэлектрический преобразователь устанавливался поочередно в одиннадцать точек: между разветвителем и первой катушкой L_1 , между соседними катушками в контуре L_{i-1} и L_i , $i = \overline{3, 10}$, а также между последней катушкой L_{10} и катушкой $L_{TOT}/2$, т.е. посередине петли. Для каждой координаты воздействия d_i были получены десять измерений и определен размах разности фаз $\varphi_{A,i}$. Результаты измерения разности фаз в зависимости от координаты точки воздействия вдоль контура интерферометра Саньяка для каждого из десяти циклов измерений, а также кривая усредненного по всем измерениям в цикле значения разности фаз представлены на рис. 3. На рис. 3 видно соответствие зависимости чувствительности интерферометра Саньяка от координаты воздействия, полученной экспериментально, графику значений, рассчитанных в результате численного моделирования. В результате экспериментов максимальная чувствительность продемонстрирована для координаты воздействия в области около четверти петли ($d_6 = L_{TOT}/4 = 5$ км), в то время как в середине петли при $d_{11} = L_{TOT}/2$ размах разности фаз составляет менее 5 рад, и поскольку пороговая разность фаз составляет 20 рад, в середине петли формируется мертвая зона. Исходя из этого, мож-

но предложить метод устранения мертвой зоны в середине контура, который заключается в том, что на расстоянии $L_{\text{ТОТ}}/2$ относительно разветвителя устанавливается компенсационная катушка длиной 3 км. Такой длины катушки будет достаточно для контура любой протяженности для регистрации воздействий при среднем и высоком уровнях шума. В таком случае мертвая зона на расстоянии ± 1.5 км около середины петли окажется внутри катушки, а вдоль всего сенсорного волокна размах разности фаз будет составлять не менее 20 рад.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено исследование чувствительности интерферометра Саньяка в зависимости от координаты акустического воздействия вдоль контура. Представленная математическая зависимость, описывающая принципы формирования мертвых зон в АВОД на основе интерферометра Саньяка, позволила теоретически определить границы мертвой зоны, протяженность которой в контуре интерферометра Саньяка длиной 20 км составила 3 км. Для экспериментального подтверждения результатов, полученных по итогам численного моделирования, была разработана и реализована установка, включающая в себя контур интерферометра Саньяка длиной 20 км, на который в точках с разными координатами оказывалось эталонное акустическое воздействие пьезоэлектриком. Это позволило измерить разность фаз на выходе петли при акустическом воздействии с фиксированной частотой 10.8 кГц в разных точках, а также экспериментально получить зависимость чувствительности интерферометра Саньяка от координаты воздействия, характеристики которой совпадают с расчетными значениями. Значение типовой частоты колебания разности фаз при ударах по сенсорному волокну интерферометра Саньяка $f_{i,\text{hit}} \approx 10.8$ кГц, найденное в результате проведенных экспериментов по исследованию отклика ИС на разные акустические воздействия, а также характер изменения разности фаз при длительных периодических воздействиях позволяют определить ограничения этого интерферометра при построении на его основе волоконно-оптических датчиков акустических воздействий, кроме того, они могут быть использованы для улучшения существующих алгоритмов распознавания разных типов акустических воздействий на контур и разработки новой методики классификации ударов, шагов и др. Полученные результаты демонстрируют перспективность дальнейших исследований.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-29-01577).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gorshkov B.G., Yüksel K., Fotiadi A.A., Wuilpart M., Korobko D.A., Zhirnov A.A., Stepanov K.V., Turov A.T., Konstantinov Y.A., Lobach I.A. // *Sensors*. 2022. V. 22 (3). P. 1033. <https://doi.org/10.3390/s22031033>
2. Zhirnov A.A., Stepanov K.V., Sazonkin S.G., Choban T.V., Koshelev K.I., Chernutsky A.O., Pnev A.B., Novikov A.O., Yagodnikov D.A. // *Sensors*. 2021. V. 21 (23). P. 7836. <https://doi.org/10.3390/s21237836>
3. Choban T.V., Zhirnov A.A., Chernutsky A.O., Stepanov K.V., Pnirov A.B., Galzerano G., Karasik V.E., Svelto C.J. // *Phys. Conf. Ser.* 2019. V. 1410 (1). P. 012108. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1410/1/012108>
4. Peng F., Wu H., Jia X.-H., Rao Y.-J., Wang Z.-N., Peng Z.-P. // *Opt. Express*, 2014. V. 22 (11). P. 13804. <https://doi.org/10.1364/OE.22.013804>
5. Stepanov K.V., Zhirnov A.A., Chernutsky A.O., Koshelev K.I., Pnev A.B., Lopunov A.I., Butov O.V. // *Sensors*, 2020. V. 20. P. 6431. <https://doi.org/10.3390/s20226431>
6. Stepanov K.V., Zhirnov A.A., Chernutsky A.O., Choban T.V., Pnev A.B., Lopunov A.I., Butov O.V. // *IEEE Proc. of International Conference Laser Optics* 2020. P. 1. <https://doi.org/10.1109/ICLO48556.2020.9285505>
7. Pi S., Wang B., Zhao J., Hong G., Zhao D., Jia B. // *Proc. of Interferometry XVII: Techniques and Analysis*. 2014. V. 9203. <https://doi.org/10.1117/12.2059925>
8. Liu K., Jin X., Jiang J., Xu T., Ding Z., Huang Y., Sun Z., Xue K., Li S., Liu T. // *IEEE Sens. J.* 2022. V. 22. P. 21428. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3213036>
9. Zhirnov A.A., Choban T.V., Stepanov K.V., Koshelev K.I., Chernutsky A.O., Pnev A.B., Karasik V.E. // *Sensors*. 2022. V. 22(7). P. 2772. <https://doi.org/10.3390/s22072772>
10. Spammer J., Swart L., Chitchebakov A., *Lightwave J.* // *Technol*, 1997. V. 15 (6). P. 972. <https://doi.org/10.1109/50.588669>
11. Choban T.V., Zhirnov A.A., Tolstoguzov V.L., Tikhomirov S.V., Pnev A.B., Karasik V.E., Svelto C. // *IEEE Proc. of International Conference Laser Optics* 2020. P. 1. <https://doi.org/10.1109/ICLO48556.2020.9285542>
12. Huang J., Chen Y., Peng H., Zhou P., Song Q., Huang P., Xiao Q., Jia B. // *Opt. Commun.* 2021. V. 57 (2). P. 027104. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.126420>
13. Choban T.V., Zhirnov A.A., Stepanov K.V., Khan R.I., Pnirov A.B., Svelto C., Lopunov A.I., Butov O.V. // *IEEE Proc. of International Conference Laser Optics*. 2022. P. 1. <https://doi.org/10.1109/ICLO54117.2022.9839786>
14. Shimizu T., Nakajima K., Shiraki K., Ieda K., Sankawa I. // *Opt. Fiber Technol.* 2008. V. 14. P. 10. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2007.04.004>

15. *Krakenes K., Blotekjaer K.* // Opt. Lett. 1989. V. 14 (20). P. 1152.
<https://doi.org/10.1364/OL.14.001152>
16. *Zhang G., Xi C., Liang Y., Zuo H.* // IEEE Xplore Proc. of Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conf. 2011. V. 2. P. 1598.
<https://doi.org/10.1109/CSQRWC.2011.6037279>
17. *Teng F., Yi D., Hong X., Li X.* // Opt. Express. 2021. V. 29 (9). P. 13696.
<https://doi.org/10.1364/OE.421569>
18. *Ma P., Liu K., Sun Z., Jiang J., Wang S., Xu T., Xu Z., Liu T.* // Opt. Lasers Eng. 2020. V. 129. P. 106060.
<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106060>
19. *Kondrat M., Szustakowski M., Patka N., Ciurapinski W., Zyczkowski M.* // Opto-Electron. Rev. 2007. V. 15 (3). P. 127.
<https://doi.org/10.2478/s11772-007-0012-x>
20. *Mangmeng C., Ali M., Gilberto B.* // Opt. Express. 2019. V. 27 (7). P. 9684.
<https://doi.org/10.1364/OE.27.009684>
21. *Wang B., Yu X., Wu H., Zhang J., Meng X.* // Opt. Commun. 2017. V. 382. P. 272.
<https://doi.org/10.1016/j.optcom.2016.07.022>
22. *McAulay A., Wang J.* // Proc. of Enabling Photonic Technologies for Aerospace Applications VI. 2004. V. 5435.
<https://doi.org/10.1117/12.542834>