

Реализация принципа двухканальности в волоконно-оптических информационно-измерительных системах

Е. А. Бадеева¹, Т. И. Мурашкина²,
Е. А. Полякова³, И. Е. Славкин⁴, А. Н. Кукушкин⁵

^{1,2,4,5}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

³Научно-исследовательский институт физических измерений, Пенза, Россия

¹badeeva_elena@mail.ru, ²timurashkina@mail.ru, ³yek.polyakova2016@yandex.ru,

⁴ilya-slavkin@yandex.ru, ⁵Kukushkin.97@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Для повышения точности перспективных волоконно-оптических информационно-измерительных систем, применяемых в жестких условиях ракетно-космической и авиационной техники, целесообразно применение метода инвариантности, в основу которого положен принцип многоканальности с использованием как минимум двух каналов приема и преобразования сигналов, построенных таким образом, чтобы совместная обработка сигналов в электронном тракте приводила к компенсации помех, снижению дополнительных погрешностей, обусловленных воздействием внешних влияющих факторов (климатических, механических), изменением напряжения питания, изгибами оптических волокон. Необходимо выявить условия, обеспечивающие деление светового потока в миро-оптико-механической системе волоконно-оптических датчиков как минимум на два независимых потока, преобразование которых осуществляется независимо в двух измерительных каналах, а также определить структуру инвариантной волоконно-оптической информационно-измерительной системы, реализующей принцип многоканальности. Цель работы – обоснование и реализация принципа пространственной двухканальности в волоконно-оптических информационно-измерительных системах для снижения дополнительных погрешностей в условиях воздействия внешних влияющих факторов. *Материалы и методы.* Представлена теория, развивающая принцип двухканальности, включая необходимые и достаточные условия ее физической реализации в инвариантных волоконно-оптических информационно-измерительных системах. Предложено двухканальное пространственное преобразование оптических сигналов непосредственно в зоне измерения путем деления одного светового потока на два с помощью особых схем расположения оптических волокон в торцах волоконно-оптических кабелей и оптико-модулирующих элементов, измерительные преобразования которых осуществляются независимо в первом и втором измерительных каналах. *Результаты.* Разработана инвариантная волоконно-оптическая информационно-измерительная система, реализующая принцип пространственной двухканальности путем преобразования двух независимых световых потоков от одного источника излучения, обеспечивающий улучшение ее технических и эксплуатационных характеристик при эксплуатации в условиях характерных изделиям ракетно-космической и авиационной техники. *Выводы.* Принцип двухканальности в волоконно-оптических информационно-измерительных системах позволил при реализации логотрического или амплитудно-фазового преобразования в 1,5–2 раза снизить дополнительные погрешности измерения, обусловленные воздействием внешних влияющих факторов, свойственных ракетно-космической и авиационной технике.

Ключевые слова: принцип двухканальности, инвариантность, волоконно-оптическая информационно-измерительная система, датчик, измерительный преобразователь, преобразование, световой поток

Для цитирования: Бадеева Е. А., Мурашкина Т. И., Полякова Е. А., Славкин И. Е., Кукушкин А. Н. Реализация принципа двухканальности в волоконно-оптических информационно-измерительных системах // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2021. № 2. С. 87–98. doi:10.21685/2072-3059-2021-2-8

The implementation of the two-channel principle in fiber-optic information-measuring systems

Е.А. Бадеева¹, Т.И. Мурашкина²,
Е.А. Полякова³, И.Е. Славкин⁴, А.Н. Кукушкин⁵

^{1,2,4,5}Penza State University, Penza, Russia

³Research Institute for Physical Measurements, Penza, Russia

¹badeeva_elena@mail.ru, ²timurashkina@mail.ru, ³yek.polyakova2016@yandex.ru,

⁴ilya-slavkin@yandex.ru, ⁵Kukushkin.97@mail.ru

Abstract. *Background.* To improve the accuracy of advanced fiber-optic information and measurement systems used in the harsh conditions of rocket and space and aviation technology, it is advisable to use the invariance method, which is based on the principle of multichannel using at least two channels for receiving and converting signals, designed in such a way that joint signal processing in the electronic path leads to interference compensation, reduction of additional errors due to the influence of external influencing factors (climatic, mechanical, etc.), changes in the supply voltage, bends of optical fibers. It is necessary to identify the conditions that ensure the division of the light flux in the micro-opto-mechanical system of fiber-optic sensors into at least two independent streams, the conversion of which is carried out independently in two measuring channels, as well as to determine the structure of an invariant fiber-optic information and measurement system that implements the principle of multichannel. The purpose of the work is to substantiate and implement the principle of spatial two-channel communication in fiber-optic information and measurement systems to reduce additional errors under the influence of external influencing factors. *Materials and methods.* A theory is presented that develops the principle of two-channel communication, including the necessary and sufficient conditions for its physical implementation in invariant fiber-optic information and measurement systems. A two-channel spatial transformation of optical signals directly in the measurement zone is proposed by dividing one light flux into two using special schemes for the arrangement of optical fibers at the ends of fiber-optic cables and optical-modulating elements, the measurement transformations of which are carried out independently in the first and second measurement channels. *Results.* An invariant fiber-optic information and measurement system has been developed that implements the principle of spatial two-channel transmission by converting two independent light streams from a single radiation source, which improves its technical and operational characteristics when operating under conditions characteristic of rocket-space and aviation equipment products. *Conclusions.* The two-channel principle in fiber-optic information and measurement systems made it possible to reduce additional measurement errors due to the influence of external influencing factors inherent in rocket and space and aviation technology by 1.5–2 times when implementing logometric or amplitude-phase conversion.

Keywords: two-channel principle, invariance, fiber-optic information and measurement system, sensor, measuring converter, conversion, luminous flux

For citation: Бадеева Е.А., Мурашкина Т.И., Полякова Е.А., Славкин И.Е., Кукушкин А.Н. The implementation of the two-channel principle in fiber-optic information-measuring systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2021;2:87–98. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059-2021-2-8

Введение

Академик Б. Н. Петров сформулировал принцип двухканальности – необходимое условие компенсации влияния на технические характеристики средства измерений внешних влияющих факторов (ВВФ) [1]. Совокупность необходимых и достаточных условий, на которой основан принцип двухканальности, позволила реализовать его в разных классах инвариантных измерительных устройств [2–4]. Целесообразно этот принцип применить к волоконно-оптическим информационно-измерительным системам (ВОИИС), которые применяются в жестких условиях ракетно-космической и авиационной техники (РК и АТ) для улучшения их технических и эксплуатационных характеристик [5, 6].

Цель работы – обоснование и реализация принципа пространственной двухканальности в ВОИИС для снижения дополнительных погрешностей в условиях воздействия внешних влияющих факторов.

1. Материал и методика

Одним из наиболее распространенных методов построения высокоточных измерительных устройств является метод инвариантности, в основу которого положен принцип многоканальности с использованием как минимум двух каналов приема и преобразования сигналов, построенных таким образом, чтобы совместная обработка сигналов в электронном тракте приводила к компенсации помех, снижению дополнительных погрешностей, обусловленных воздействием внешних влияющих факторов (климатических, механических), изменением напряжения питания, изгибами оптических волокон [1]. Представлена теория, развивающая принципы двухканальности, включая необходимые и достаточные условия ее физической реализации, в инвариантных ВОИИС. Предложено двухканальное пространственное преобразование оптических сигналов непосредственно в зоне измерения путем деления светового потока на два световых потока с помощью особых схем расположения оптических волокон в торцах волоконно-оптических кабелей (ВОК) и оптико-модулирующих элементов (ОМЭ), измерительные преобразования которых осуществляются независимо в первом и втором измерительных каналах (ИК), что исключает погрешности, свойственные волоконно-оптическим датчикам (ВОД) с открытым оптическим каналом.

На конкретных примерах рассмотрены вопросы физической реализуемости базовых для ВОИИС двухканальных волоконно-оптических измерительных преобразователей (ВОП).

2. Результаты

На рис. 1 представлена структурная схема инвариантной ВОИИС, объединяющей N -е количество ВОД с открытым оптическим каналом [7], реализующей принцип двухканальности с микро-оптико-механическим трактом выделения измерительной информации о различных физических величинах, характеризующих состояние объекта измерения [8].

В основу этой схемы положен принцип инвариантности.

ВОД с открытым оптическим каналом, входящие в состав ВОИИС, имеют унифицированную конструкцию, состоящую в общем случае из ВОП,

основным элементом которого является микро-опто-механическая система (МОМС), ВОК, согласующего устройства (СУ), в состав которого входят ИК-светодиод и два согласованных с ним по спектру фотодиода (по одному на каждый измерительный канал). МОМС включает воспринимающий (чувствительный) (ВЭ) и опτικο-модулирующий элементы. В качестве ОМЭ в ВОД с открытым оптическим каналом используются поверхности с различными коэффициентами отражения (чаще всего зеркальные или сочетание поглощающей и зеркальной поверхностей), с разными радиусами кривизны (шаровые, цилиндрические линзы), с разными коэффициентами преломления и др. [9].

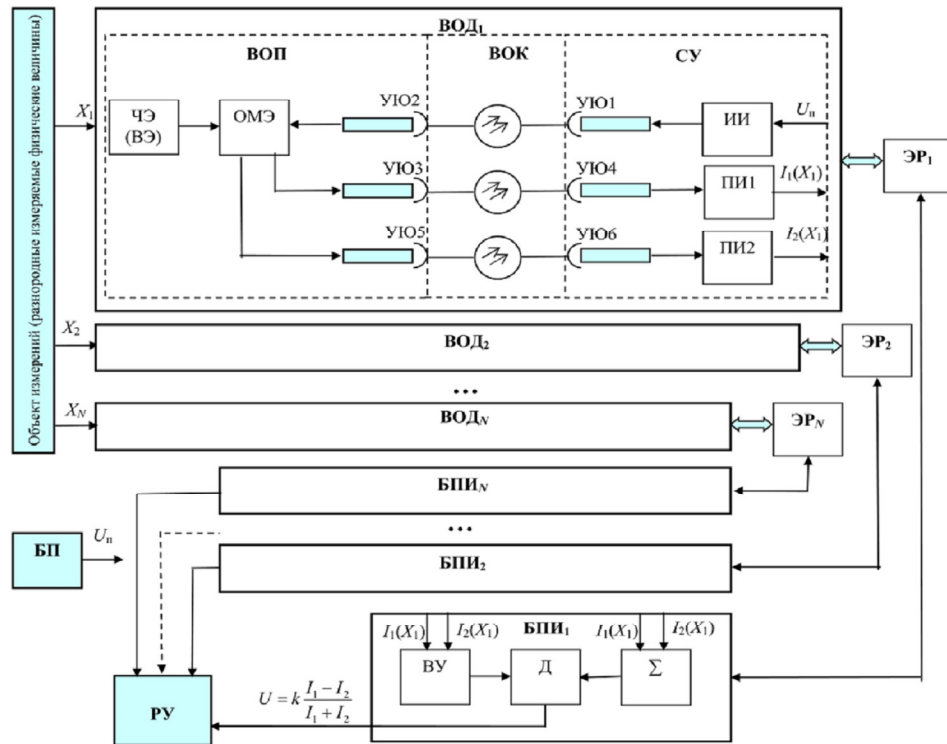


Рис. 1. Структурная схема инвариантной ВОИИС, реализующей принцип двухканальности: ВОД – волоконно-оптический датчик; ВОП – волоконно-оптический преобразователь; ВОК – волоконно-оптический кабель; СУ – согласующее устройство; БПИ – блок преобразования информации; ЭР – электрический разъем; БП – блок питания; РУ – регистрирующее устройство; ИИ, ПИ – источник и приемник излучения; ЧЭ (ВЭ) – чувствительный (воспринимающий) элемент; ОМЭ – опτικο-модулирующий элемент; УЮ – узел юстировки; $X_1 \dots X_N$ – измеряемые физические величины

ВОК необходим для передачи светового потока через узлы юстировки УЮ1...УЮ6 от источника излучения ИИ в зону измерения и обратно к приемникам излучения ПИ1 и ПИ2 первого и второго ИК соответственно.

ВОД стыкуются с блоками преобразования информации (БПИ) через электрические разъемы (ЭР). При этом БПИ и состыкованные с ними СУ отнесены в более благоприятные условия из радиационной искро-взрыво-

пожароопасной зоны измерений на расстояние 100...2000 м. Данные с выходов БПИ поступают на регистрирующее устройство РУ.

БПИ₁...БПИ_N могут быть объединены в едином корпусе.

3. Обсуждение

ВОИИС работает следующим образом. Измеряемые физические величины X X_1 ... X_N воздействуют на ВЭ (например, мембрану в ВОД давления), который жестко связан с ОМЭ (например, аттенюатор в ВОД давления) [10].

Световой поток Φ_0 , сформированный источником излучения ИИ, посредством узлов юстировки УЮ1 и УЮ2 по подводящим оптическим волокнам (ПОВ) ВОК передается в зону измерений ВОП в направлении ОМЭ, который осуществляет или линейное, или угловое микроперемещение под воздействием измеряемой величины X , вызывая изменение интенсивности оптического сигнала Φ_0 . Одна часть светового потока $\Phi_1(X)$, промодулированного в функции измеряемой физической величины X , поступает в оптические волокна первого измерительного канала; вторая часть $\Phi_2(X)$ потока, промодулированного в функции измеряемой физической величины X , поступает в оптические волокна второго измерительного канала. Световые потоки через узлы юстировки УЮ3...УЮ6 передаются на приемники излучения первого и второго измерительных каналов ПИ1 и ПИ2 соответственно, расположенные в СУ, где происходит их фотоэлектрическое преобразование. С выхода СУ снимаются электрические сигналы $I_1(X)$ и $I_2(X)$. Данные сигналы поступают на вход БПИ, где происходит, например, операция деления сигналов $I_1(X)$ и $I_2(X)$.

Улучшение технических и эксплуатационных характеристик ВОИИС в условиях воздействия радиации, изменения температур окружающей среды обуславливается тем, что с помощью БПИ осуществляется логометрическое преобразование сигналов: формируется отношение разности сигналов на выходе ИК к их сумме:

$$U_{\text{вых}} \approx \frac{I_1(X) - I_2(X)}{I_1(X) + I_2(X)}. \quad (1)$$

Например, воздействие радиации на оптические волокна (ОВ) вызывает снижение прозрачности стекла, тогда выражение (1) примет вид

$$U_{\text{вых}} \approx \frac{kI_1(X) - kI_2(X)}{kI_1(X) + kI_2(X)}, \quad (2)$$

где k – коэффициент снижения прозрачности ОВ.

В выражении (2) коэффициент k одинаков для ОВ первого и второго измерительных каналов, так как используются однотипные ОВ, которые расположены в едином кабельном изделии и в одной и той же зоне измерения. Соответственно сигнал $U_{\text{вых}}$ будет неизменным.

При необходимости ОВ могут быть подвергнуты воздействию ионизирующего излучения, волокна тем самым проходят ионизирующую тренировку. Если произошло изменение прозрачности ОВ, но оно не превышает 20 %, то применение двух измерительных каналов позволяет практически исключить дополнительные погрешности от воздействия радиации.

В настоящее время разработаны ОВ с повышенной радиационной стойкостью [11]. Проведенные исследования основных характеристик ОВ в процессе и после окончания γ -облучения (импульсного ионизирующего воздействия $\tau_{эфф} \approx 21$ нс, уровень $\sim 1,5 \times 10^9$ р/с) показали, что прозрачность ОВ на длине волны $\lambda = 1,55$ мкм практически восстанавливается до исходного значения приблизительно через 100 мс для всех типов образцов при комнатной температуре, а в интервале температур (минус 60... плюс 20 °С) приблизительно через 500 мс. Радиационно-стойкие ОВ имеют ресурс 200 000 ч, срок службы 25 лет и выдерживают уровень радиации до 16 МГр γ -излучения.

Кроме того, при логометрическом преобразовании наблюдается удвоение чувствительности преобразования, линеаризация выходной зависимости, снижается влияние на точность измерения неинформативных изгибов волоконно-оптического кабеля, изменения мощности излучения источника излучения и чувствительности приемников излучения.

Если один из измерительных каналов является компенсационным, в котором компенсационный сигнал остается постоянным в процессе измерения, то можно выполнить амплитудно-фазовое преобразование сигналов с выхода рабочего $I_p(X)$ и компенсационного каналов I_k [12]. В этом случае сигнал ИИ должен быть промодулирован гармоническим сигналом, интенсивность которого меняется при изменении измеряемой физической величины. За счет разнополярного питания рабочих и компенсационных приемников излучения сигнал U_k первоначально сдвинут относительно сигнала $U_p(X)$ на угол 180° . Путем подбора элементов фазосдвигающей цепи создается постоянный сдвиг фаз $90 < \varphi_0 < 180^\circ$ между сигналами $U_p(X)$ и U_k . Сигналы $U_p(X)$ и U_k суммируются. Суммарный сигнал $U_\Sigma(X)$ поступает на один из входов фазометра, на второй вход которого поступает опорный сигнал U_k . Зависимость фазы φ суммарного сигнала $U_\Sigma(X)$ от значения измеряемой физической величины является выходным сигналом:

$$\varphi = \arctg \frac{\sin \varphi_{12}}{\cos \varphi_{12} + \frac{U_k}{U_p(X)}}. \quad (3)$$

Так как в выражении (3) сигналы $U_p(X)$ и U_k находятся в отношении, то пропорциональные изменения этих сигналов, обусловленные изменением параметров источников и приемников излучения, напряжения питания, изгибами оптических волокон и т.п., не влияют на результаты измерений.

Условия, обеспечивающие реализацию принципа двухканальности в ВОИИС

Для того чтобы осуществить двухканальное преобразование оптических сигналов в зоне открытого оптического канала ВОП, необходимо сформировать световой поток от одного ИИ, передавать его в зону измерения по ПОВ, на выходе ПОВ сформировать структуру светового потока, позволяющую разделить его на два независимых потока (например, по оси X) с помощью ОМЭ и особых взаимных расположений рабочих торцов оптических волокон на концах ВОК (рис. 2) [6].

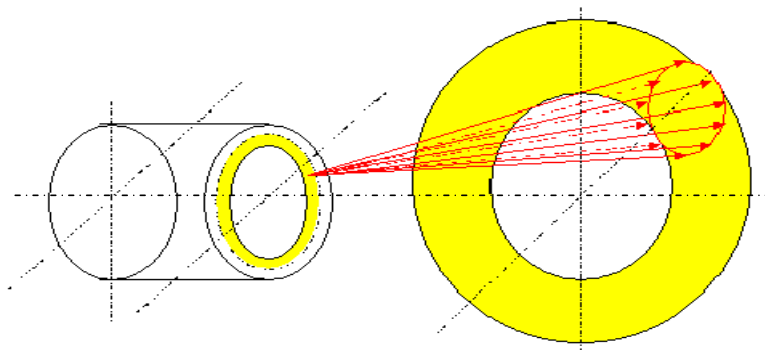


Рис. 2. Формирование кольцевой зоны на выходе из оптического волокна

Известно, что в результате множества отражений внутри ОВ происходит симметризация пучка лучей относительно оптической оси ОВ и усреднение освещенности по излучательному торцу волокна [8]. Симметризация приводит к тому, что узкий конический пучок лучей, падающий под некоторым углом на входной торец ОВ с прямыми торцами, на выходе заполняет пространственную зону, ограниченную двумя близкими коаксиальными поверхностями. В сечении, перпендикулярном оптической оси, наблюдается кольцевая зона. Это обстоятельство предоставляет возможность разделить световой поток на две и более частей непосредственно в зоне преобразования измеряемой физической величины с последующим преобразованием параметров этих частей светового потока независимо друг от друга в двух и более измерительных каналах. Например, если в качестве ОМЭ используется цилиндрическая линза, то в плоскости расположения ООВ наблюдается световое пятно в виде овала, которое образовано двумя эллипсами (рис. 3) [13]. Соответственно расположение одного ООВ в верхней части овала, а второго ООВ – в нижней части овала позволяет разделить световой поток на две независимые части. Разделенные световые потоки будут затем преобразовываться в первом или во втором ИК.

Разделить световой поток на два независимых потока можно двумя основными способами:

1) к ИИ подвести одно ПОВ, общее для обоих ИК, а разделение на два потока осуществлять с помощью ОМЭ;

2) к одному ИИ подвести ПОВ первого и второго ИК, по которым световые потоки направляются в зону измерения, а дальнейшие преобразования осуществлять отдельно в каждом ИК [6].

Кроме того, необходимо, чтобы:

1) в зоне расположения ОМЭ и приемных торцов ООВ было равномерное распределение интенсивности света;

2) должны быть такие взаимные пространственные расположения ОВ в торцах ВОК и излучающего торца ОВ относительно ОМЭ, которые обеспечивают увеличение сигнала в одном канале и уменьшение в другом;

3) конструктивно-технологическое исполнение дифференциального ОМЭ должно обеспечивать увеличение сигнала в одном канале и уменьшение в другом.

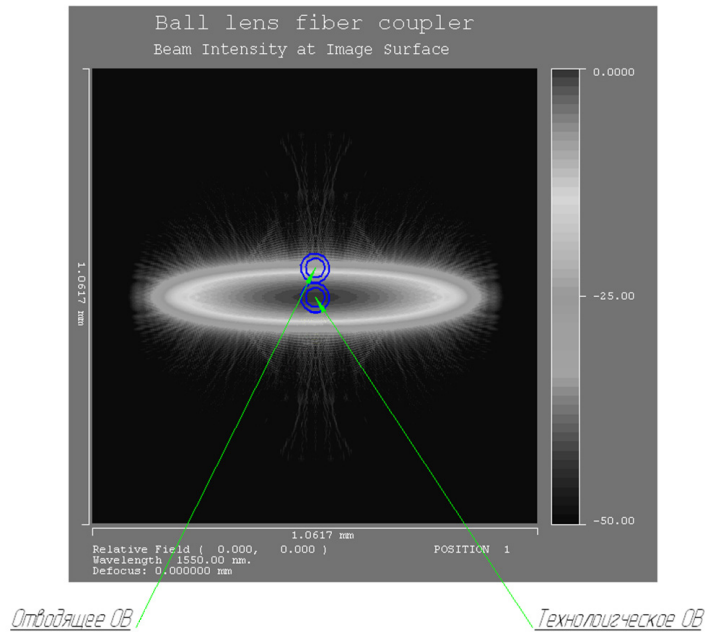


Рис. 3. Световое пятно в виде овала в плоскости расположения ООВ (технологическое ОВ является проекцией ПОВ)

Пример реализации деления светового потока на два приведен на рис. 4, когда к ИИ подведено одно ПОВ, общее для обоих ИК, а пространственное деление потока осуществляется с помощью ОМЭ в виде предельного аттенюатора с круглым отверстием [14].

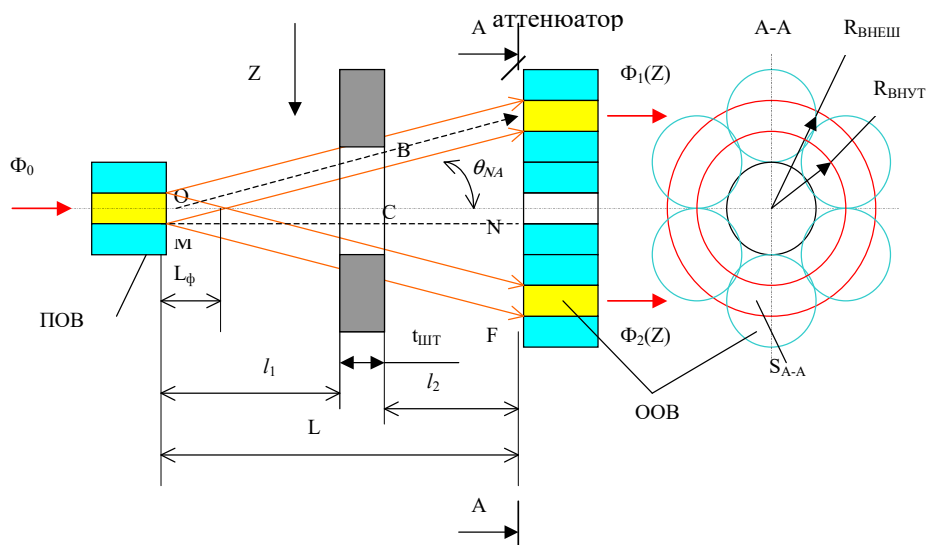


Рис. 4. Пример деления светового потока на два в ВОП с предельным аттенюатором с круглым отверстием

В состав ВОП входит аттенюатор с круглым отверстием, который закреплен на чувствительном элементе (например, мембране в ВОД давления)

и расположен на расстояниях l_1 от излучающего торца ПОВ и l_2 от приемного торца ООВ.

ВОП функционирует следующим образом: световой поток Φ_0 , сформированный на выходе ПОВ, проходит сквозь отверстие attenuатора, движение которого вдоль оси Z относительно приемных торцов ООВ1 и ООВ2 соответствует измеряемому параметру [10]. Перемещение attenuатора ведет к перекрытию части светового потока непрозрачной частью экрана и, соответственно, к изменению интенсивности световых потоков $\Phi_1(Z)$ и $\Phi_2(Z)$, поступающих по ООВ на ПИ первого и второго ИК соответственно.

На рис. 5 показаны относительные изменения интенсивностей световых потоков от перемещения ОМЭ в поперечном направлении Z :

- $\Phi_1/\Phi_0 = f(Z)$ (участок I) первого измерительного канала,
- $\Phi_2/\Phi_0 = f(Z)$ (участок II) второго измерительного канала в диапазоне измерения для ВОП микроперемещений (например, для ВОП с предельным attenuатором [10]).

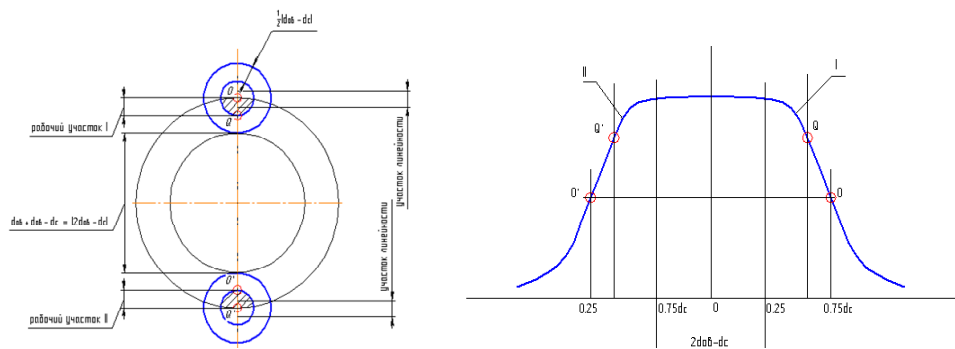


Рис. 5. Относительное изменение интенсивностей $\Phi_1/\Phi_0 = f(Z)$ (участок I) и $\Phi_2/\Phi_0 = f(Z)$ (участок II) светового потока в ВОП в области приемных торцов ООВ

Важным элементом реализации принципа двухканальности является требование независимости двух измерительных каналов, когда световой поток первого ИК не попадает в ООВ второго измерительного канала и, наоборот, световой поток второго ИК не попадает в ООВ первого ИК. Это возможно, если есть горизонтальная прямая, соединяющая на графике зависимости $\Phi_1/\Phi_0 = f(Z)$ и $\Phi_2/\Phi_0 = f(Z)$, что достигается изменением расстояний между оптическими осями ОВ и изменением расстояний от ОВ до attenuатора.

Заключение

Разработана инвариантная ВОИИС, реализующая принцип пространственной двухканальности путем преобразования двух независимых световых потоков от одного источника излучения, обеспечивающий при реализации логометрического или амплитудно-фазового преобразования в 1,5–2 раза снизить дополнительные погрешности измерения, обусловленные воздействием внешних влияющих факторов изделиям РК и АТ.

Список литературы

1. Петров Б. Н., Викторов В. А., Лункин Б. В., Совлуков А. С. Принцип инвариантности в измерительной технике. М. : Наука, 1976. 242 с.

2. Нестеров В. Н., Ли А. Р. Теория и практика проектирования инвариантных измерительных преобразователей и систем на основе двухканального принципа // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. Т. 18, № 4 (7). С. 1414–1422.
3. Свистунов Б. Л. Измерительные преобразователи для параметрических датчиков с использованием аналитической избыточности // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. № 2. С. 94–100.
4. Чернецов М. В., Чураков П. П. Инвариантное преобразование в измерительных системах с параметрическими датчиками // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2018. № 1. С. 11–17.
5. Murashkina T. I., Istomina T. V., Slavkin I. E., Chukareva M. M., Badeeva E. A., Motin A. V., Intellectual measuring system based of fiber optic sensors // Information Innovative Technologies : materials of the International scientific-practical conference / Uvaysov S. U., Ivanov I. A. (ed.). Moscow : Association of graduates and employees of AFEA named after prof. Zhukovsky, 2018. 652 p.
6. Murashkina T. I., Badeeva E. A., Yurova O. V., Savochkina M. M., Motin A. V. Transformation of Signals in the Optic Systems of Differenzial-type Fiber-Optic Transducers // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. Vol. 11, iss. 13. P. 2853–2857. doi:10.3923/jeasci.2016.2853.2857
7. Бадеева Е. А., Щербаклова А. А., Полякова Е. А., Мурашкина Т. И. Оценка взрывопожаробезопасности информационно-измерительных систем на базе волоконно-оптических датчиков с открытым оптическим каналом // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР : сб. тр. 11-й Междунар. науч.-техн. конф. (21–24 мая 2019 г., ОКБ «Гидропресс» г. Подольск). Подольск, 2019. С. 148–150.
8. Мурашкина Т. И., Бадеева Е. А. Волоконно-оптические приборы и системы: Научные разработки НТЦ «Нанотехнологии волоконно-оптических систем» Пензенского государственного университета Ч. I. СПб. : Политехника, 2018. 187 с.
9. Badeeva E. A., Murashkina T. I., Savochkina M. M. Luminous flux control in a fiber-optic measuring transducer // Journal of Physics: Conference Series (JPCS). 2017. Vol. 803 (1).
10. Бадеева Е. А., Мещеряков В. А., Мурашкина Т. И. [и др.]. Волоконно-оптические датчики давления аттенуаторного типа для летательных аппаратов // Датчики и системы. 2003. № 4. С. 11–14.
11. Долгов И. И., Иванов Г. А., Чаморовский Ю. К., Яковлев М. Я. Радиационно-стойкие одномодовые ОВ с кварцевой сердцевиной // ФОТОН-ЭКСПРЕСС. 2005. № 6 (46). С. 4–10.
12. Патент 2740538 Российская Федерация. Способ преобразования светового потока и реализующий его волоконно-оптический датчик давления / Бадеева Е. А., Мурашкина Т. И., Серебряков Д. И., Бадеев А. В. Оpubл. 15.01.2021, Бюл № 2.
13. Murashkina T. I., Motin A. V., Badeeva E. A. Mathematical simulation of the optical system of a fiber-optic measuring micro motion converter with a cylindrical lens modulation element // Journal of Physics: Conference Series (JPCS). 2017. Vol. 803 (1). P. 012101.
14. Патент 2290605 Российская Федерация. Волоконно-оптический преобразователь перемещения / Пивкин А. Г., Мурашкина Т. И., Бадеева Е. А. Оpubл. 27.12.2006, Бюл. № 36.

References

1. Petrov B.N., Viktorov V.A., Lunkin B.V., Sovlukov A.S. *Printsip invariantnosti v izmeritel'noy tekhnike = The principle of invariance in measuring technolog.* Moscow: Nauka, 1976:242. (In Russ.)
2. Nesterov V.N., Li A.R. Theory and practice of designing invariant measuring transducers and systems based on the two-channel principle. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN = Proceedings of Sama Scientific Center of the Russian Academy of Sciences.* 2016;18(4):1414–1422. (In Russ.)

3. Svistunov B.L. Transmitters for parametric sensors using analytical redundancy. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2017;2(20):94–100. (In Russ.)
4. Chernetsov M.V., Churakov P.P. Invariant transformation in measuring systems with parametric sensors. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2018;1(23):11–17. (In Russ.)
5. Murashkina T.I., Istomina T.V., Slavkin I.E., Chukareva M.M., Badeeva E.A., Motin A.V. Intellectual measuring system based of fiber optic sensors. *Information Innovative Technologies: materials of the International scientific – practical conference.* Moscow: Association of graduates and employees of AFEA named after prof. Zhukovsky, 2018:652.
6. Murashkina T.I., Badeeva E.A., Yurova O.V., Savochkina M.M., Motin A.V. Transformation of Signals in the Optic Systems of Differenzial-type Fiber-Optic Transducers. *Journal of Engineering and Applied Sciences.* 2016;11(13):2853–2857. doi:10.3923/jeasci.2016.2853.2857
7. Badeeva E.A., Shcherbakova A.A., Polyakova E.A., Murashkina T.I. Evaluation of explosion and fire safety of information-measuring systems based on fiber-optic sensors with an open optical channel. *Obespechenie bezopasnosti AES s VVER: sb. tr. 11-y Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (21–24 maya 2019 g., OKB «Gidropress» g. Podol'sk) = The security of the NPP with WWER: proceedings of the 11th International scientific and engineering conference (Podolsk, OKB “Gidropress”, May 21-24, 2019).* Podol'sk, 2019:148–150. (In Russ.)
8. Murashkina T.I., Badeeva E.A. *Volokonno-opticheskie pribory i sistemy: Nauchnye razrabotki NTTs «Nanotekhnologii volokonno-opticheskikh sistem» Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta Ch. I = Fiber optic devices and systems: Research and Development Center “Nanotechnology of fiber optic systems”, Penza State University, Part I.* Saint-Petersburg: Politekhnik, 2018:187. (In Russ.)
9. Badeeva E.A., Murashkina T.I., Savochkina M.M. Luminous flux control in a fiber-optic measuring transducer. *Journal of Physics: Conference Series (JPCS).* 2017;803(1).
10. Badeeva E.A., Meshcheryakov V.A., Murashkina T.I. [et al.] Aircraft attenuator type fiber optic pressure sensors. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems.* 2003;4:11–14. (In Russ.)
11. Dolgov I.I., Ivanov G.A., Chamorovskiy Yu.K., Yakovlev M.Ya. Radiation-resistant single-mode optical fiber with a quartz core. *FOTON-EKSPRESS = PHOTON-EXPRESS.* 2005;6(46):4–10. (In Russ.)
12. Patent 2740538 Russian Federation. *Sposob preobrazovaniya svetovogo potoka i realizuyushchiy ego volokonno-opticheskiy datchik davleniya = A method for converting a luminous flux and a fiber-optic pressure sensor that implements it.* Badeeva E.A., Murashkina T.I., Serebryakov D.I., Badeev A.V. Publ. 15.01.2021, bull. no. 2. (In Russ.)
13. Murashkina T.I., Motin A.V., Badeeva E.A. Mathematical simulation of the optical system of a fiber-optic measuring micro motion converter with a cylindrical lens modulation element. *Journal of Physics: Conference Series (JPCS).* 2017;803(1):012101.
14. Patent 2290605 Russian Federation. *Volokonno-opticheskiy preobrazovatel' peremeshcheniya = Fiber-optic displacement converter.* Pivkin A.G., Murashkina T.I., Badeeva E.A. Publ. 27.12.2006, bull. no. 36. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Елена Александровна Бадеева

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры бухгалтерского
учета, налогообложения и аудита,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: badeeva_elen@mail.ru

Elena A. Badeeva

Doctor of engineering sciences, associate
professor, professor of the sub-department
of accounting, taxation and audit,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Татьяна Ивановна Мурашкина

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры приборостроения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: timurashkina@mail.ru

Tat'yana I. Murashkina

Doctor of engineering sciences, professor,
professor of the sub-department
of instrument engineering, Penza
State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Екатерина Алексеевна Полякова

начальник отдела надежности,
Научно-исследовательский институт
физических измерений (Россия, г. Пенза,
ул. Володарского, 8/10)

E-mail: yek.polyakova2016@yandex.ru

Ekaterina A. Polyakova

Head of reliability department,
Research Institute for Physical
Measurements (8/10 Volodarskogo
street, Penza, Russia)

Илья Евгеньевич Славкин

аспирант, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: ilya-slavkin@yandex.ru

Ilya E. Slavkin

Postgraduate student, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Алексей Николаевич Кукушкин

магистрант, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: Kukushkin.97@mail.ru

Aleksey N. Kukushkin

Master's degree student, Penza
State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Поступила в редакцию / Received 12.05.2021

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 21.05.2021

Принята к публикации / Accepted 27.05.2021