

## АНАЛИЗ ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТИ ОПТОВОЛОКОННЫХ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ СХЕМ С МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАННЫМИ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

**А.О. Костромитин<sup>1,2</sup>, Л.Б. Лиокумович<sup>2</sup>, Ф.В. Складаров<sup>1,2</sup>, О.И. Котов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> АО "Концерн «ЦНИИ "Электроприбор"»,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация;

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В статье предложена идеология расчета параметров элементов и анализа выходной мощности в волоконно-оптических интерферометрических схемах с мультиплексированием чувствительных элементов по времени (TDM). Метод расчета параметров элементов позволяет обеспечивать равенство оптической мощности от всех мультиплексированных чувствительных элементов, а также оценивать влияние отклонения параметров оптической схемы от расчетных. На примере двух оптических схем показана реализация такой идеологии расчета, последовательность получения математических выражений и примеры расчетных результатов. Описанный метод расчета предлагается применять при проектировании интерферометрических измерителей с мультиплексированием волоконно-оптических чувствительных элементов.

**Ключевые слова:** волоконно-оптический датчик, волоконно-оптический разветвитель, оптическая мощность, потери оптической мощности

**Ссылка при цитировании:** Костромитин А.О., Лиокумович Л.Б., Складаров Ф.В., Котов О.И. Анализ выходной мощности оптоволоконных интерферометрических схем с мультиплексированными чувствительными элементами // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2020. Т. 13. № 2. С. 126–141. DOI: 10.18721/JPM.13210

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

## THE FIBER-OPTIC INTERFEROMETRIC SCHEMES WITH MULTIPLEXED SENSITIVE ELEMENTS: AN ANALYSIS OF OUTPUT OPTICAL POWER LEVEL

**A.O. Kostromitin<sup>1,2</sup>, L.B. Liokumovich<sup>2</sup>, P.V. Skliarov<sup>1,2</sup>, O.I. Kotov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Concern CSRI "Elektropribor", St. Petersburg, Russian Federation;

<sup>2</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation

A concept for calculation of element parameters and analyzing the output power in the fiber-optic interferometric schemes with time-division multiplexing of the sensitive elements (TDM) has been put forward in the paper. The calculation procedure of element parameters allows ensuring the equality of the optical power from all multiplexed sensitive elements, as well as evaluating the effect of deviation of the optical scheme parameters from the calculated ones. Using two optical schemes as an example, the implementation of this calculation concept, the sequence of obtaining mathematical expressions, and examples of calculation results were presented. The proposed calculation method could be successfully applied in the design of interferometric meters with multiplexing of fiber-optic sensitive elements.

**Keywords:** fiber-optic sensor, fiber-optic splitter, optical power, optical loss, time-division multiplexing



**Citation:** Kostromitin A.O., Liokumovich L.B., Skliarov P.V., Kotov O.I., The fiber-optic interferometric schemes with multiplexed sensitive elements: an analysis of output optical power level, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 13 (2) (2020) 126–141. DOI: 10.18721/JPM.13210

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

## Введение

Волоконно-оптические датчики на основе интерферометров активно разрабатываются и внедряются для измерения различных физических величин [1]. Возможность мультиплексирования значительного числа волоконно-оптических чувствительных элементов (ЧЭ) в одной волоконной линии позволяет создавать эффективные квазираспределенные интерферометрические измерительные системы, в том числе большой протяженности. Такие технологии перспективны, например, при создании буксируемых гидроакустических антенн для сейсморазведки полезных ископаемых на шельфе [2, 3], а также многих других подобных систем.

Существует несколько подходов к организации мультиплексирования в оптоволоконных интерферометрических измерителях, которые используют разделение сигналов от отдельных ЧЭ по времени (TDM), по частоте несущих амплитудно- или частотно-модулированных сигналов (FDM), по длине волны (WDM), по степени взаимной когерентности (CDM) или по состоянию поляризации (PDM) [4]. Наибольшее распространение получила технология TDM, обеспечивающая максимальное число мультиплексируемых элементов при использовании одного лазера и фотоприемника [5]. Часто предлагается применение комбинированного варианта TDM/WDM, хотя в этом случае основной технологией остается TDM, а технологии WDM используются для вторичного мультиплексирования массивов ЧЭ, разделяемых по времени, что позволяет сократить число используемых волоконных линий [6].

Важным вопросом при реализации оптоволоконных схем с мультиплексированием ЧЭ по технологии TDM является обоснованный выбор параметров элементов оп-

тической схемы, обеспечивающих мультиплексирование, возможность оценки и оптимизации значений ключевых параметров получаемых интерференционных сигналов, таких как относительный уровень интерференционных сигналов и его различие для разных ЧЭ, отношение сигнал/шум, контраст и т.п.

Однако в публикациях, где рассматриваются схемы мультиплексированных оптоволоконных интерферометрических измерителей, практически не приводится четкого описания методик расчета и оценки параметров таких схем в части методов обоснованного выбора оптимальных вариантов светоделительных элементов. Если и приводятся выражения для подобных расчетов [7, 8], то обычно их получают с целым рядом упрощений. Часто предполагается пренебрежение потерями оптической мощности в элементах, приближения большого числа мультиплексированных ЧЭ [8], хотя на практике часто используются системы, имеющие 4, 8 и 16 элементов в одной волоконной линии [9, 10].

В большинстве публикаций даются оценки фазовой разрешающей способности в зависимости от количества чувствительных элементов  $N$ , т.е. расчеты связаны с определенными методами создания вспомогательной модуляции и обработки интерференционного сигнала [8, 9].

В данной статье представлена методика энергетического расчета параметров характеристик волоконно-оптической части, не зависящего от принципов функционирования, на примере двух типовых вариантов оптоволоконных интерферометрических схем с мультиплексированием ЧЭ. В таком виде методику можно применять для схем с разными типами организации вспомогательной модуляции и обработки сигнала. Предлагаемые подходы к

расчетам позволяют учитывать влияние отклонений от значений параметров пассивных оптоволоконных элементов на значения параметров интерференционных сигналов, которые формируются в схемах от мультиплексированных ЧЭ.

### Постановка задачи

Мультиплексирование по времени подразумевает, что от лазерного источника на вход оптической схемы с массивом из  $N$  чувствительных элементов поступают короткие оптические импульсы с высокой скважностью и оптической мощностью  $P_{in}$ . Оптоволоконная схема содержит светоделительные элементы (разветвители или полупрозрачные отражатели) и должна быть построена так, чтобы каждый входной импульс проходил разные пути и через разные комбинации ЧЭ, формируя последовательность из  $N + 1$  выходных импульсов мощностью  $p_n$  ( $n$  – номер выходного импульса, меняющийся от 0 до  $N$ ), задержанных во времени друг относительно друга. Большинство практических схем (в том числе рассмотренные ниже) организовано так, что каждый последующий выходной импульс проходит на один ЧЭ больше, чем предыдущий. Разность задержек выходных импульсов относительно друг друга связана с разностью оптических путей  $\Delta L$ , которые проходит входной импульс, формируя выходные импульсы, и эти разности должны быть одинаковыми. Для формирования интерферометрического сигнала на выходе схемы используется так называемый компенсирующий интерферометр (КИ) с оптической разностью хода, также равной  $\Delta L$ . Когда выходные импульсы проходят КИ, они разделяются и парно совмещаются со смещением на один импульс. В результате на выходе компенсирующего интерферометра формируется и далее поступает на фотоприемное устройство новая последовательность из  $N + 2$  импульсов с мощностями  $P_m$  (их удобно нумеровать от 0 до  $N + 1$ ), в которой каждый исходный выходной импульс совмещен с предыдущим. Каждый импульс  $P_m$  представляет собой результат интерференции импульсов  $p_n$  и  $p_{n-1}$ . Исключение

составляют только первый и последний импульсы:  $P_{r0}$  и  $P_{r(N+1)}$ , которые при прохождении КИ не совмещаются с предыдущим и с последующим, ввиду отсутствия у них предыдущих и последующих импульсов. Воздействия на  $n$ -й волоконный ЧЭ меняют фазовую задержку  $\Delta\varphi_n$  оптического излучения, проходящего через данный ЧЭ. Поэтому интерференция импульсов  $p_n$  и  $p_{n-1}$  связана с  $\Delta\varphi_n$ , поскольку импульс  $p_{n-1}$  прошел через ЧЭ от первого до  $(n-1)$ -го, а импульс  $p_n$  – через чувствительные элементы с первого по  $n$ -й. С учетом того, что  $P_m$  определяется интерференцией двух выходных импульсов, то они имеют вид

$$P_m(t) = C\{P_{0n} + P_{mn} \cdot \cos[\Delta\varphi_n(t)]\}, \quad (1)$$

где  $P_{0n} = p_n + p_{n-1}$  – постоянная составляющая;  $P_{mn} = 2(p_n p_{n-1})^{1/2}$  – амплитуда интерференционной составляющей.

Аргумент интерференционного сигнала  $\Delta\varphi_n$  содержит целевые осцилляции фазовой задержки  $n$ -го ЧЭ, связанные с измеряемым воздействием, и может быть определен в ходе последующей обработки. Коэффициент  $C$  связан с потерями при прохождении КИ, и в идеальном случае  $C = 1/2$ . Следует отметить, что КИ может быть расположен и на входе оптоволоконной схемы. При этом детали прохождения импульсов через схему будут отличаться, но в результате также будут формироваться интерференционные сигналы вида (1).

При комплексном анализе оптоволоконных интерференционных схем с мультиплексированными ЧЭ, необходимо рассматривать различные системы соотношений, включающие различные типы параметров элементов оптической схемы, характеристики других элементов системы и опрашивающих импульсов. В контексте энергетических соотношений одна из ключевых проблем – выбор элементов, обеспечивающих оптимальные значения параметров интерференционных сигналов  $P_{0n}$  и  $P_{mn}$ . Набор значений  $P_{0n}$  и  $P_{mn}$  играет ключевую роль для организации корректной регистрации сигналов, оценки достигаемого отношения сигнал/



шум и, как следствие, разрешающей способности системы.

С точки зрения проектирования схемы, важный результат энергетического расчета – это определение требуемых коэффициентов деления светового потока в делительных элементах оптоволоконной схемы. В зависимости от используемых в схеме элементов, к таким параметрам относятся коэффициенты деления волоконных разветвителей либо коэффициент отражения полупрозрачных отражателей.

Если использовать одинаковые делительные элементы, то неизбежно значения  $p_n$  и  $P_m$  будут существенно зависеть от  $n$  и вопрос об оптимальном выборе коэффициентов деления требует сложного анализа критериев оптимальности. Более привлекательный вариант в отношении достигаемого эффекта и одновременно более простой в отношении критерия оптимальности, предусматривает выбор делительных элементов, исходящий из требования выполнения условия равенства всех  $p_n$ :

$$p_0 = p_1 = \dots = p_n = \dots = p_N = P_0. \quad (2)$$

В этом случае  $P_{0n} = P_{mn} = 2P_0$ , контраст всех интерференционных сигналов равен единице (если обеспечено согласование по состоянию поляризации).

В данной работе рассматривается построение схемы, отвечающей именно такому требованию. При этом важным показателем выступает нормированный уровень мощности импульсов:

$$p_{norm} = P_0/P_{in}; \quad (3)$$

по нему удобно сравнивать «энергетическую эффективность», достигаемую в разных схемах или при разных значениях  $N$ .

При выполнении условия (2), в общем случае очевидно, что чем больше  $p_{norm}$ , тем меньше различные шумы и флуктуации влияют на результирующие выходные сигналы измерительной системы.

Очевидно, что для выполнения условия

(2) необходимо использовать специальный набор значений коэффициентов деления разветвителей или отражателей, однако современные технологии позволяют изготавливать эти элементы практически с произвольными параметрами, и указанный подход к оптимальному построению схемы по критерию (2) вполне реализуем на практике. Но при проектировании подобных схем важно не только найти оптимальные коэффициенты делительных элементов, но и иметь возможность детального анализа влияния на параметры интерференционных сигналов других параметров делительных элементов схемы, флуктуаций этих параметров и прочих факторов, которые надо учитывать при проектировании.

### Общие принципы организации методики расчета

При рассмотрении методики расчета следует отметить разные группы параметров элементов схемы, которые задействованы в анализе и расчетах. Прежде всего, это коэффициенты пропускания (по мощности) в волоконных отрезках, соединяющих элементы схемы, включая отрезки волокна в ЧЭ. Эти коэффициенты пропускания отличны от единицы, вследствие наличия потерь оптической мощности в световоде и дополнительных условий (отрезки волокна могут быть намотаны в катушки, содержать соединения и т.п.). Исходно указанные коэффициенты пропускания предполагаются заданными и не подлежат непосредственному определению в процессе расчетов; при этом они могут быть как одинаковыми, так и разными для разных ЧЭ, но рассматриваются как известные параметры.

К другому типу параметров следует отнести коэффициенты деления оптической мощности в разветвителях или в полупрозрачных отражателях (обычно это волоконно-оптические брэгговские решетки), если схемы используют первый или второй тип элементов для деления потоков оптической мощности. Коэффициенты деления могут выбираться, и именно они должны быть оп-

тимально подобраны на основе методики расчета, обеспечивающей выполнение условия (2).

Отдельно необходимо отметить, что в разветвителях или волоконно-оптических брэгговских решетках также есть внутренние потери, которые, строго говоря, следует учитывать в расчетах. В общем случае потери делительных элементов могут зависеть от коэффициентов деления или пропускания. Это можно учесть в расчетах в том случае, если эта зависимость известна. В нижеприведенном анализе для простоты и наглядности получения конкретных результатов рассматривается вариант, когда такие потери фиксированы и также рассматриваются как известный параметр.

При расчете оптимальных коэффициентов деления разветвителей или отражателей, разумеется, возможно и целесообразно учитывать только заранее известные регулярные компоненты коэффициентов пропускания в волоконных отрезках схемы и потери в делительных элементах. Однако в целом методика расчета должна предусматривать возможность анализа влияния возможных отклонений расчетных и исходно заданных параметров элементов от реальных. Такие явления могут быть вызваны как регулярными отклонениями от номинальных значений, так и флуктуациями параметров в процессе эксплуатации; изменения могут возникать, например, вследствие старения, нестабильности температуры и состояния поляризации оптического излучения.

Методика энергетического расчета и анализа оптоволоконных элементов схемы предполагает получение и применение двух систем соотношений:

во-первых, формул мультипликативной структуры для расчета значений  $p_n$  с учетом всех ключевых параметров элементов оптоволоконной схемы;

во-вторых, рекуррентных соотношений, связывающих выбираемые параметры делительных элементов соседних звеньев схемы и позволяющих рассчитать коэффициенты деления всех делительных элементов с уче-

том определенных условий на граничные элементы.

Для вывода первой системы соотношений нужно рассмотреть прохождение светового импульса, связанного  $n$ -м делительным элементом, от входа на выход.

Вторая система соотношений требует рассмотрения условия баланса мощности  $p_{n-1} = p_n = P_0$  и решения уравнения баланса относительно параметра элемента деления.

В связи с выбором схем, рассмотренных далее в настоящей работе, следует пояснить, что разнообразные варианты построения оптических схем с TDM уместно разделить на два типа: работающие «на отражение» (возвратные) и «на проход» (проходные).

В случае отражательной схемы, сканирующий импульс, проходя звенья схемы от первого до  $n$ -го ЧЭ, далее идет в обратном направлении и поступает в качестве  $n$ -го выходного импульса в ту же часть схемы (или непосредственно в ту же волоконную линию), что и входной импульс, но во встречном направлении. В таком случае в схеме необходимы зеркала (часто для подавления поляризационного фидинга используются так называемые фарадеевские зеркала).

В случае проходной схемы, входной импульс поступает с одной стороны схемы, и далее пройдя через ЧЭ от первого до  $n$ -го, формирует  $n$ -й выходной импульс с противоположной стороны схемы. Для рассмотренных далее схем обычно считается, что снижение  $p_{norm}$  с ростом значения  $N$ , при отсутствии потерь, имеет характер  $\sim 1/N^2$  [9].

Есть варианты организации схем, где спад имеет характер  $1/N$ , но в них могут присутствовать многократные прохождения через ЧЭ и паразитное наложение разных импульсов, а также кросс-толк [8]. Схемы с кросс-толком имеют свою специфику, но их рассмотрение выходит за рамки данной работы.

#### **Анализ мощности выходных импульсов в схеме отражательного типа**

Рассмотрим типовую схему отражательного типа (рис. 1). Схема включает  $N$  катушек

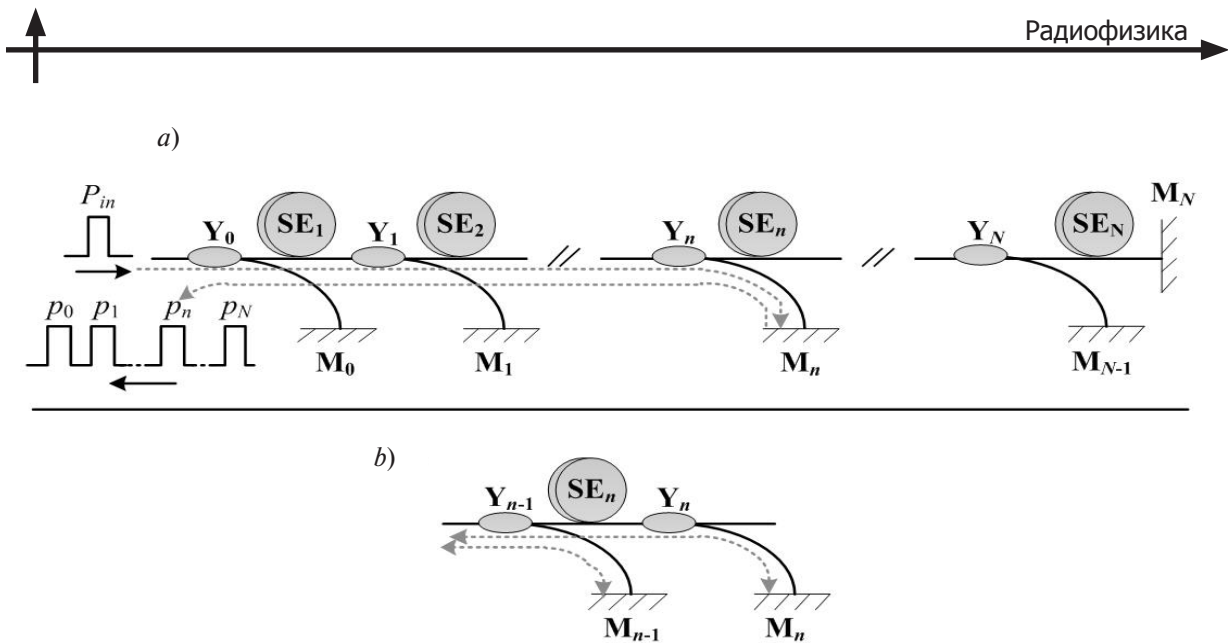


Рис. 1. Схема отражательного типа и формирование выходных импульсов (а), а также  $n$ -е звено данной схемы (b):  
 $SE_i$  – чувствительные элементы;  $M_i$  – зеркала;  
 $Y_i$  – разветвители;  $P_{in}$  – входной импульс;  $p_i$  – выходные импульсы

чувствительных элементов (SE) с номерами  $n = 1, 2, \dots, N$ , а также  $(N + 1)$  Y-разветвителей (Y) и зеркал (M) с номерами  $n = 0, 1, 2, \dots, N$ .

В качестве ключевых параметров схемы целесообразно ввести в рассмотрение прямой ( $K_d$ ) и перекрестный ( $K_c$ ) коэффициенты передачи разветвителя, коэффициент передачи  $K_{sf}$  отрезка волокна с чувствительным элементом, коэффициент передачи  $K_f$  технологического отрезка между разветвителем и зеркалом, коэффициент отражения зеркала  $R$  (в идеальном случае  $R = 1$ , однако реальный коэффициент отражения может быть меньше единицы). При наличии в схеме соединений, потери в соединениях следует учесть в коэффициентах передачи волоконных отрезков  $K_f$  и  $K_{sf}$ . Коэффициенты  $K_d$  и  $K_c$  жестко связаны с коэффициентом деления  $D$  и параметром внутренних потерь разветвителя  $\alpha$ , как описано в Приложении 1.

Если рассмотреть путь прохождения входного импульса до  $n$ -го зеркала и обратно (см. рис. 1), то нетрудно сформировать мультипликативные формулы для  $p_n$ , которые имеют вид

$$p_n = P_{in} K_{fn}^2 K_{cn}^2 R_n \cdot \prod_{q=1}^n (K_{d(q-1)}^2 K_{sfq}^2). \quad (4)$$

В формуле (4) подразумевается, что если верхний предел произведения меньше нижнего, что имеет место при  $n = 0$ , то произведение равно единице. Также нужно учесть отличие случая  $n = N$ , связанное с отличием конечного звена схемы от остальных, поскольку для последнего  $N$ -го ЧЭ нет необходимости направлять оптическую мощность далее и нецелесообразно использовать разветвитель между  $N$ -м ЧЭ и  $N$ -м зеркалом. Однако выражение (4) будет актуально для всех  $n$ , если по определению принять наличие формальных коэффициентов  $K_{cN} = K_{fN} = 1$ . На практике часто можно полагать, что все ЧЭ эквивалентны и  $K_{sf}$  не зависит от  $n$ . Тогда в выражении (4) этот параметр можно исключить из произведения и использовать множитель  $(K_{sf})^{2n}$ .

Из анализа одного звена схемы и сравнения разности путей  $(n - 1)$ -го и  $n$ -го импульса (см. рис. 1, b) можно получить уравнение, соответствующее балансу  $p_{n-1} = p_n$ . В рассматриваемой схеме (при сохранении определения  $K_{cN} = K_{fN} = 1$ ) это уравнение имеет вид

$$K_{c(n-1)}^2 K_{f(n-1)}^2 R_{n-1} = K_{d(n-1)}^2 K_{cn}^2 K_{sfn}^2 K_{fn}^2 R_{n-1}. \quad (5)$$

Для получения рекуррентного соотношения на параметры разветвителей, необходимо учесть связь между  $K_d$  и  $K_c$ . Если с учетом пояснений в Приложении 1 использовать модель параметров разветвителя в виде

$$\begin{aligned} K_d &= (1 - \alpha_{el}) \cdot D / (1 + D) \\ \text{и } K_c &= (1 - \alpha_{el}) / (1 + D), \end{aligned} \quad (6)$$

то уравнение (6) непосредственно преобразуются к рекуррентному виду:

$$D_{n-1} = A_n (1 + D_n), \quad (7)$$

где использовано допущение, что параметр избыточных потерь разветвителя  $\alpha_{el}$  не зависит от  $D$  и одинаков для любых  $n$ , а также введена константа

$$\begin{aligned} A_n &= K_{f(n-1)} \sqrt{R_{n-1}} \times \\ &\times [(1 - \alpha_{el}) K_{sfn} K_{fn} \sqrt{R_n}]^{-1}. \end{aligned} \quad (8)$$

При расчетах практических схем часто допустимо полагать коэффициенты  $K_{sf}$ ,  $K_f$  и  $R$  одинаковыми для всех  $n$ . В этом случае расчет оптимальных значений  $D_n$  не зависит от значений  $K_f$  и  $R$ , а константа  $A_n$  не будет зависеть от  $n$  и становится более простой:

$$A = 1 / (1 - \alpha_{el}) K_{sf} \quad (9)$$

(при этом на расчет оптимальных значений  $D_n$  влияют избыточные потери в разветвителях и потери в ЧЭ).

Если допустимо пренебрегать избыточными потерями в разветвителях, то следует полагать  $\alpha_{el} = 0$ .

Для использования выражения (7) необходимо определить начальное условие для рекуррентного расчета оптимальных значений  $D_n$ . Для данной схемы, это условие непосредственно связано с отсутствием разветвителя с номером  $N$ . Другое включение последнего ЧЭ однозначно ухудшит полученные значения  $p_0$  и  $P_{norm}$ . При этом рассмотрение окончательного звена, содержащего последний ЧЭ, дает условие баланса мощности (5) при подстановке  $K_{cN} = K_{sfN} = 1$

в правой части. Тогда учет соотношений (6) для  $(N - 1)$ -го разветвителя приводит к простому соотношению:

$$D_{N-1} = \frac{K_{f(N-1)}}{K_{sfN}} \sqrt{\frac{R_{N-1}}{R_N}}, \quad (10)$$

которое соответствует рекуррентному выражению (7) при исключении из выражения (8) параметров  $K_{cn}$ ,  $K_{fn}$  и  $\alpha_{el}$  для определения константы  $A_n$ .

Нетрудно видеть, что для малых потерь в элементах, когда коэффициенты  $K_{f(n-1)}$ ,  $K_{sfN}$ ,  $R_{N-1}$  и  $R_N$  близки к единице, выражение (10) даст  $D_{N-1} \approx 1$ , т.е. логичный для баланса такого звена результат с разветвлением, близким к разветвителю 50:50, независимо от потерь в разветвителе.

Далее по рекуррентному выражению (7) можно поочередно получать значения для остальных разветвителей с номерами от  $n = N - 2$  до  $n = 0$ , сформировав набор значений  $\{D\}$ , а затем на основе формулы (6) и заданного  $\alpha_{el}$ , пересчитать значения  $\{D\}$  в наборы значений  $\{K_d\}$  и  $\{K_c\}$  всех разветвителей.

Если подставить полученные наборы значений  $\{K_d\}$  и  $\{K_c\}$  в выражения (4), то, в силу метода получения этих наборов, для любого  $n$  будет получено одно и то же значение  $p_0$ , причем максимально возможное при заданных параметрах, использованных в расчете.

Однако важным результатом такого вычисления является непосредственно значение уровня  $p_{norm}$ , а также возможность анализа его зависимости от  $N$  и других параметров, задействованных в расчетах.

В Приложении 2 приведены рассчитанные наборы значений  $\{D\}$ ,  $\{K_d\}$  и  $\{K_c\}$  разветвителей для  $N = 8$  и

$$\begin{aligned} \alpha_{el[\text{дБ}]} &= \alpha_{sf[\text{дБ}]} = 0,10 \text{ дБ}, \\ \alpha_{f[\text{дБ}]} &= 0,05 \text{ дБ и } R = 0,99, \end{aligned}$$

где подразумевается, что

$$\begin{aligned} \alpha_{sf[\text{дБ}]} &= -10 \cdot \lg(K_{sf}), \\ \alpha_{f[\text{дБ}]} &= -10 \cdot \lg(K_f), \end{aligned}$$

$$\alpha_{el[дБ]} = -10 \cdot \lg(1 - \alpha_{el}).$$

Эти значения коэффициентов деления важны при практической реализации данной схемы, поскольку их нужно знать для установки соответствующих разветвителей. Однако для анализа энергетической эффективности схемы более актуальны показанные на рис. 2 примеры зависимостей  $p_{norm}$  от  $N$  для этого же набора параметров, а также для случаев, когда отличается значение параметра  $\alpha_{sf}$  или  $\alpha_{el}$ .

Пример зависимостей на рис. 2 показывает достигаемые уровни относительной мощности для схем с указанными параметрами при оптимальном выборе коэффициентов деления разветвителей, степенной вид зависимости  $p_{norm}(N)$ , а также демонстрируют возможность изучения влияния других параметров элементов схемы на достигаемый уровень  $p_{norm}$ .

Важно отметить, что приведенные системы выражений позволяют не только анализировать влияние параметров элементов схемы на достигаемый уровень  $p_{norm}$ , но и учитывать и изучать влияние отклонений реальных параметров от идеальных значений на значения  $p_n$ . Если при изготовлении реальных разветвителей коэффициенты  $D$  задаются в формате  $(1 - \delta)/\delta$  с точностью выбора  $\delta$ , например, до 1 или до 2%, то можно применять соответствующие округления к набору оптимальных значений  $\{D\}$ , полученных после рекуррентной процедуры. Далее в выражения (4) можно подставить округленные значения и, посчитав  $p_{0n}$ , оценить разброс этих значений и отклонения от результатов расчетов без округления.

Аналогичным образом можно учитывать влияние как фиксированных отклонений параметров элементов от исходно рассчитанных, так и случайных.

Первый случай реализуется, если провести прецизионные измерения параметров реального набора разветвителей, изготовленных для схемы, и использовать эти фактические параметры в расчетах.

Второй случай предполагает, что параметры элементов в процессе эксплуатации

могут иметь некоторые флуктуации. Тогда после исходных расчетов оптимальных наборов  $\{D\}$  разветвителей с применением регулярных частей  $\alpha_{el}$ ,  $K_f$ ,  $K_{sf}$  и  $R$ , на втором этапе расчетов в формулы (4) следует подставлять параметры, имеющие, кроме регулярной компоненты, еще и случайные добавки. Тогда расчет будет давать набор значений  $p_n$ , имеющих случайные отклонения относительно оценки  $p_0$  при вычислении с регулярными параметрами.

Это важные возможности предлагаемой методики расчетов, хотя примеры изучения таких возможностей выходят за рамки данной работы.

### Анализ мощности выходных импульсов в схеме проходного типа

Рассмотрим характерную схему проходного типа (рис. 3). Схема включает пары  $Y$ -разветвителей в «верхней» и «нижней» линиях. Последовательность выходных импульсов формируется за счет того, что  $n$ -й импульс проходит часть пути по «верхней» линии, ответвляется в нижнюю часть через  $n$ -ю пару разветвителей и далее по «нижней» линии распространяется к выходу. Можно показать, что в рамках рассматриваемой задачи оба  $n$ -х разветвителя должны иметь одинаковые коэффициенты деления. Отличаются случаи для  $n = 0$  и  $n = N$ , когда импульс проходит в «нижнюю» линию только через нулевой или только через  $N$ -й разветвитель, которые не имеют пары. Также в расчетах надо учесть коэффициент пропускания отрезков волокна:  $K_{sfn}$  для отрезка волокна с  $n$ -м чувствительным элементом;  $K_{fn}$  для технологических отрезков, соединяющих  $(n - 1)$  й и  $n$ -й разветвители в «нижней» линии,  $K'_{fn}$  для «вертикальных» отрезков между парой  $n$ -х разветвителей. Разность оптических путей  $\Delta L$  формируется за счет разности длин отрезков волокна между соседними разветвителями в «верхней» и в «нижней» линиях (обычно волокно в ЧЭ больше технологического участка в «нижней» линии). Схему можно было бы построить по симметричному варианту с расположением ЧЭ в нижней линии, но идеоло-



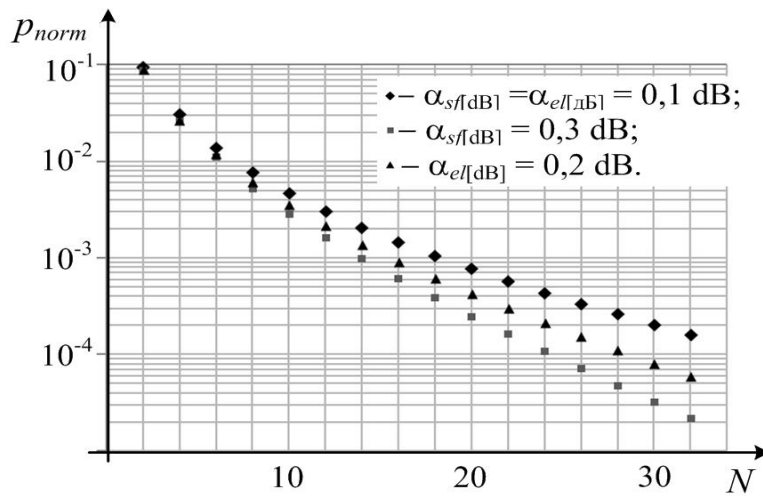


Рис. 2. Случай схемы отражательного типа. Зависимости нормированного уровня мощности импульсов от количества чувствительных элементов (ЧЭ) для различающихся значений потерь  $\alpha_{sf}$  и  $\alpha_{el}$

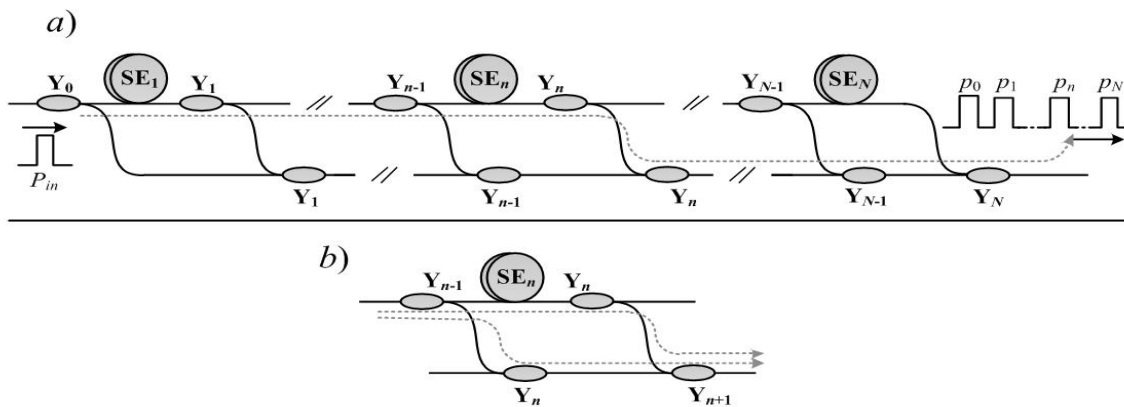


Рис. 3. Схема проходного типа и формирование выходных импульсов (а), а также  $n$ -е звено данной схемы (b); обозначения идентичны приведенным на рис. 1

гия функционирования и принцип расчета от этого не меняются.

Учитывая маршрут прохождения схемы  $n$ -м выходным импульсом, нетрудно составить мультипликативные формулы для определения  $p_n$ . Поскольку структуры первого и последнего звена отличаются от структуры центральных звеньев, то выражения имеют отличия для случаев  $n = 0$  и  $n = N$ :

$$p_0 = P_{in} K_{f0} K_{c0} K_{d1} \cdot \prod_{q=1}^N K_{dq} K_{fq} \text{ при } n = 0;$$

$$p_n = P_{in} K_{fq}^n K_{cn}^2 \cdot \prod_{q=1}^n K_{d(q-1)} K_{sfq} \cdot \prod_{q=n+1}^N K_{dq} K_{fq}$$

$$\text{при } n = 1, 2, \dots (N-1); \quad (11)$$

$$p_N = P_{in} K_{cN} \cdot \prod_{q=1}^n K_{d(q-1)} K_{sfq} \text{ при } n = N.$$

Уравнения баланса мощности соседних импульсов для первого и последнего звена также будут отличаться от уравнения для «центральных» звеньев и, как следует из разности путей  $(n - 1)$ -го и  $n$ -го выходного импульсов (рис. 3, b), для этих трех случаев имеют вид

$$K_{c0} K_{d1} K_{f1} = K_{d0} K_{c1}^2 K_{sf1} K'_{f1} \text{ при } n = 1;$$

$$K_{c(n-1)}^2 K_{dn} K'_{f(n-1)} K_{fn} = K_{d(n-1)} K_{cn}^2 K_{sf1} K'_{fn} \quad (D_{N-1})^2 + D_{N-1} = A_N D_N, \quad (19)$$

при  $n = 2, 3, \dots, (N-1)$ ; (12) где введена константа

$$\begin{aligned} & K_{c(N-1)}^2 K_{dN} K'_{f(N-1)} K_{f(N-1)} = \\ & = K_{cN} K_{d(N-1)} K_{sfN} \text{ при } n = N; \end{aligned} \quad A_N = (1 - \alpha_{el}) K_{f(N-1)} K'_{f(N-1)} / K_{sfN}. \quad (20)$$

где  $n$  соответствует звену, охватывающему  $n$ -й ЧЭ.

Важно отметить, что в формулы(11) заложено равенство коэффициентов для  $n$ -го разветвителя в «верхней» и «нижней» линиях.

На основе формул (12) можно получить рекуррентные соотношения, связывающие параметры разветвителей. С учетом модели (6), из уравнений (12) для первого звена (при  $n = 0$ ) получается уравнение вида

$$D_1^2 + D_1 - A_0 D_0 = 0, \quad (13)$$

где введена константа

$$A_0 = (1 - \alpha_{el}) K_{sf1} K'_{f1} / K_{f0}. \quad (14)$$

Решение этого квадратного уравнения (из двух корней только один положителен и приемлем) имеет вид

$$D_1 = 0,5 [(4D_0 A_0 + 1)^{1/2} - 1]. \quad (15)$$

Для последующих звеньев (кроме последнего) из модели(6) и уравнений(12) получается соотношение

$$D_n^2 + D_n - A_n [(D_{n-1})^2 + D_{n-1}] = 0, \quad (16)$$

где введена константа

$$A_n = K_{sf1} K'_{fn} / (K'_{f(n-1)} K_{fn}). \quad (17)$$

Решение уравнения дает рекуррентное соотношение вида

$$D_n = 0,5 \{ [4((D_{n-1})^2 + D_{n-1}) A_n + 1]^{1/2} - 1 \}. \quad (18)$$

И, наконец, для последнего звена ( $n = N$ ) из модели (6) и уравнений (12) следует уравнение

В данном случае нужно определить  $D_N$ , поэтому решение имеет вид

$$D_N = [(D_{N-1})^2 + D_{(N-1)}] / A_N. \quad (21)$$

Следует отметить, что вывод выражений для проходной схемы подразумевал, что  $N > 2$ . Случай  $N = 2$  необходимо рассмотреть отдельно и получить соответствующие выражения, но, ввиду малой практической значимости, он в данной работе рассматриваться не будет.

Если задать некоторое значение  $D_0$ , то далее на основе выражений (15), (18), (21) можно получить значения  $D_n$  для всех остальных разветвителей, т.е. полный набор  $\{D\}$ . Понятно, что если набор  $\{D\}$  пересчитать в наборы  $\{K_d\}$  и  $\{K_c\}$  и далее рассчитать  $p_n$  по формулам (10), то будет выполнено условие (2) и получено некоторое значение  $p_{norm}$ , не зависящее от  $n$ . Однако это значение будет зависеть от исходного выбора  $D_0$ .

Таким образом, в данной схеме условием получения максимального значения  $p_{norm}$  является выбор оптимального значения  $D_0$ . Простой прямой путь решения данной проблемы состоит в переборе значений  $D_0$  и выборе в качестве оптимального значения  $D_{opt}$  такого значения  $D_0$ , при котором  $p_{norm}$  достигнет максимума. Очевидно, что конкретное значение  $D_{opt}$ , как и достигаемый максимум  $p_{norm}$ , зависит от  $N$  и от значений остальных параметров, задействованных в расчетах.

Приведем примеры расчетов, где, как и ранее, для простоты полагаем  $K_f$ ,  $K'_f$  и  $K_{sf}$  не зависящими от  $n$ . На рис. 4,а приведены примеры зависимостей  $p_{norm}$  от  $D_0$  при  $\alpha_{el[дБ]} = \alpha_{sf[дБ]} = 0,1$  дБ и  $\alpha_{f[дБ]} = \alpha'_{f[дБ]} = 0,05$  дБ для случаев  $N = 8$  и  $N = 16$ . В первом случае из расчета следует, что  $D_{opt} = 16,86$  и обеспечивается  $p_{norm} = 6,63 \cdot 10^{-3}$ . Во втором случае  $D_{opt} = 62,67$  и до-

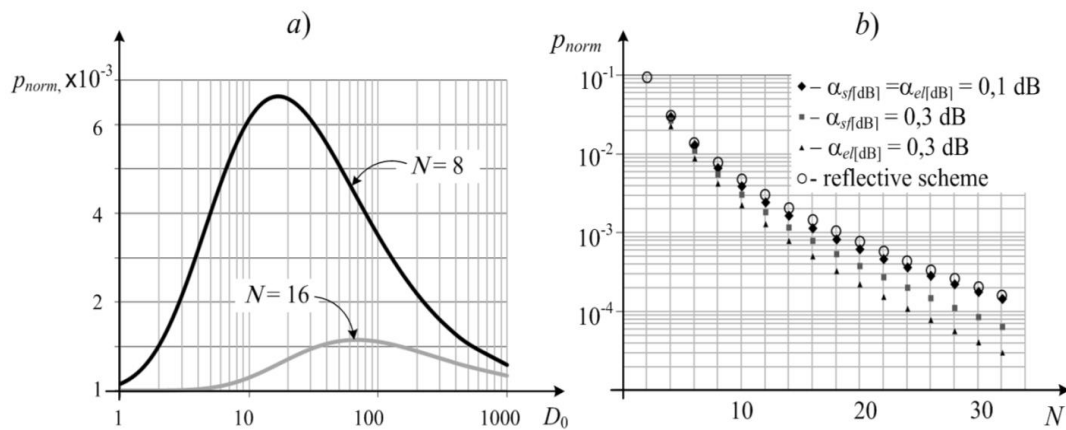


Рис. 4. Случай схемы проходного типа. Примеры рассчитанных зависимостей нормированного уровня мощности импульсов  $p_{norm}$  от коэффициента деления первого разветвителя для двух значений  $N$  (a) и от количества чувствительных элементов  $N$  для двух разных значений потерь в ЧЭ и в разветвителях.

Для сравнения показана зависимость  $p_{norm}$  для отражательной схемы (b)

стигается  $p_{norm} = 1,15 \cdot 10^{-3}$ .

Также для  $N = 8$  в Приложении 2 указаны рассчитанные наборы значений  $\{D\}$ ,  $\{K_c\}$  и  $\{K_d\}$ , которые могут быть использованы при практической реализации схемы с такими исходными данными.

С точки зрения анализа энергетике, в такой схеме показательны представленные на рис. 4, b примеры зависимостей  $p_{norm}$  от  $N$ , полученные при выборе  $D_0 = D_{opt}$  для каждого  $N$ . Как и ранее, кроме расчета зависимости с указанными выше значениями параметров потерь, приведены также еще две кривые для случаев, когда различаются значения параметров  $\alpha_{fs}$  и  $\alpha_{el}$ . Также для сравнения с отражательной схемой на рис. 4 показана зависимость, полученная ранее для основных наборов параметров.

Если сопоставить результаты расчетов, приведенные на рис. 2 и 4, то видно, что при оптимальном выборе коэффициентов деления разветвителей достигаемые уровни  $p_{norm}$  при равных потерях в ЧЭ почти одинаковы для обеих схем при небольшом выигрыше в случае возвратной схемы (выигрыш растет при больших значениях  $N$ ). Это ожидаемый результат, поскольку, несмотря на разные конфигурации схем, в обеих схемах импульс проходит равное число разветвителей в прямом направлении, равное количество ответ-

влений и отрезков ЧЭ.

Во второй схеме, в каждом звене, есть дополнительный соединительный отрезок, но в первой есть потери при отражении от зеркала (изменение соотношений потерь в этих элементах может сделать немного более выигрышной по мощности вторую схему).

На рис. 4, b также можно видеть, что зависимость от  $N$  имеет степенной характер  $p_{norm}(N) \sim N^{-q}$ , причем при снижении потерь значение  $q$  близко к 2, но возрастает при увеличении потерь. Для приведенных зависимостей,  $q$  имеет значения в диапазоне 2,5 – 3,3. Здесь следует отметить, что при анализе ограниченных диапазонов  $N$ , аппроксимация дает разные показатели и лучшую точность. Так, в диапазоне  $4 \leq N \leq 16$  значения показателя для кривых, приведенных на рис. 2 и 4, находятся в диапазоне 2,4 – 2,8, а в диапазоне  $10 \leq N \leq 32$  значения  $q$  для приведенных кривых лежат в диапазоне 2,8 – 3,7.

Однако данная статья не нацелена на комплексное изучение закономерностей такого рода, а посвящена идеологии корректного расчета подобных зависимостей и выражениям, которые надо для этого использовать. При этом корректный расчет подразумевает обеспечение оптимального выбора параметров разветвителей.

Как и в случае возвратной схемы, предлагаемый принцип расчетов для проходной схемы позволяет (кроме выбора оптимальной системы разветвителей и оценки значения  $p_{norm}$ ) анализировать влияние различных дополнительных факторов: ограничение точности изготовления разветвителей, случайные флуктуации параметров элементов и т.п. Однако при этом надо учитывать, что мультипликативные выражения (11) ограничивают такой анализ, поскольку предполагают идентичность параметров в парах разветвителей на «верхней» и «нижней» линиях. За счет этого формулы (11) упрощаются, и главное – можно получить простое и понятно интерпретируемое рекуррентное выражение (18). Для анализа влияния округления коэффициентов деления, регулярных или случайных отклонений этих коэффициентов и тому подобных факторов, необходимо использовать мультипликативные формулы, имеющие следующий вид:

$$\begin{aligned}
 p_0 &= P_{in} K_{f0} K_{c0} K_{d1} \cdot \prod_{q=1}^N k_{dq} K_{fq} \text{ при } n = 0; \\
 p_n &= P_{in} K'_{fq} K_{cn} k_{cn} \cdot \prod_{q=1}^n K_{d(q-1)} K_{sfq} \cdot \prod_{q=n+1}^N k_{dq} K_{fq} \\
 &\text{при } n = 1, 2, \dots (N-1); \quad (22) \\
 p_N &= P_{in} k_{cN} \cdot \prod_{q=1}^n K_{d(q-1)} K_{sfq} \text{ при } n = N,
 \end{aligned}$$

где разделены коэффициенты передачи  $K_{dn}$ ,  $K_{cn}$  разветвителей «верхней» линии и коэффициенты передачи  $k_{dn}$ ,  $k_{cn}$  разветвителей «нижней» линии.

### Заключение

Предложена идеология расчета параметров элементов оптических схем мультиплексированных волоконно-оптических датчиков, позволяющая оптимизировать схему с точки зрения достижения максимального уровня и контраста формируемых интерференционных сигналов, при этом учитываются потери оптической мощности как в делительных элементах, так и в отрезках волокон

и в зеркалах, входящих в волоконно-оптическую схему.

Показана процедура получения выражений для расчета параметров элементов на примере двух оптических схем.

Приведены примеры расчетов параметров элементов в рассмотренных схемах для числа чувствительных элементов  $N = 8$  и расчетов зависимостей нормированного уровня мощности оптического импульса на выходе схем от числа  $N$  для некоторых наборов параметров элементов.

Предложенная идеология организации расчета позволяет не только выполнять расчет оптимальных коэффициентов деления разветвителей в схеме и достигаемую мощность импульсов на выходе схемы, но и оценивать влияние изменения параметров отдельных элементов оптической схемы (в том числе случайных) на характеристики системы в целом.

Формирование расчетных выражений для рассмотренных схем также демонстрирует принцип организации аналогичных расчетов для других конфигураций подобных схем.

Представленные методы и результаты расчетов могут непосредственно использоваться при проектировании оптоволоконных интерферометрических измерительных систем на основе мультиплексирования чувствительных элементов.

### Приложение 1

#### Параметры Y-разветвителя

Y-разветвитель имеет три порта и формально описывается девятью коэффициентами передачи по мощности  $K_{ij}$ . С учетом симметрии, хорошо выполняемой на практике,  $K_{ij} \approx K_{ji}$ . Выберем нумерацию так, что при подаче света в первый порт свет передается во второй и третий порты. Тогда вследствие направленности,  $K_{23} \approx 0$  так же, как малы коэффициенты отражения от разветвителя  $K_{ii} \approx 0$  (на практике эти коэффициенты соответствуют ослаблению на несколько десятков дБ). В этом случае существенными являются два коэффициента:  $K_{12}$  и  $K_{13}$ . Если пред-

Приложение 2

положить, что  $K_{12} \geq K_{13}$  (связь между портами 1 и 2 – прямая, и  $K_{12} = K_d$ , а связь между портами 1 и 3 – перекрестная, и  $K_{13} = K_c$ ), то ключевой параметр разветвителя – коэффициент деления – задается отношением  $D = K_{12}/K_{13}$  (полагается  $D > 1$ ). Если  $K_{23}$ ,  $K_{ii} \ll K_{13}$ , то, исходя из требования баланса мощности,  $K_{12} + K_{13} = 1$ . Однако учитывая возможность внутренних (избыточных) потерь оптической мощности, для реального разветвителя  $K_{12} + K_{13} = 1 - \alpha_{el}$  (где  $\alpha_{el}$  – малый параметр, характеризующий потери). Последнее равенство из определения  $D$  дает формулы

$$K_{12} = K_d = (1 - \alpha_{el})D / (D + 1);$$

$$K_{13} = K_c = (1 - \alpha_{el}) / (D + 1),$$

которые введены как выражение (4).

Для реальных разветвителей часто более наглядным и принятым является задание не коэффициентов  $K_{12}$  и  $K_{13}$ , а параметров  $D$  и  $\alpha_{el}$  (обычно указывают  $\alpha_{el[дБ]} = 10 \cdot \lg(1 - \alpha_{el})$ ).

**Примеры расчета значений параметров  $\{D\}$ ,  $\{K_c\}$  и  $\{K_d\}$**

Приведем в виде сводной таблицы результаты расчета коэффициентов деления  $D$  и коэффициентов передачи  $K_d$ ,  $K_c$  для рассмотренных схем в случае  $N = 8$ ,  $\alpha_{el} = 0,977$ ,  $K_{sf} = 0,977$ ,  $K_f = 0,989$ , а также  $R = 0,99$  для отражательной схемы и  $K'_f = 0,989$  для проходной схемы (указанные коэффициенты соответствуют уровням  $\alpha_{el[дБ]} = \alpha_{sf[дБ]} = 0,1$ ;  $\alpha_{f[дБ]} = \alpha'_{f[дБ]} = 0,05$ ).

Хотя приведенные в таблице значения не столь показательны и интересны для рассмотренных зависимостей  $p_{norm}$  от  $N$  и от других параметров подобных характеристик, но при практической реализации оптимального варианта схемы с выполнением условия (2), необходимо выбирать разветвители с рассчитанным набором параметров  $\{K_c\}$  и  $\{K_d\}$ .

Таблица

**Результаты расчета значений параметров  $\{D\}$ ,  $\{K_c\}$  и  $\{K_d\}$  для отражательной и проходной схем при заданных значениях потерь оптической мощности в элементах схемы**

$n$	Отражательная схема			Проходная схема		
	$D$	$K_d$	$K_c$	$D$	$K_d$	$K_c$
0	9,848	0,887	0,09	16,857	0,923	0,055
1	8,405	0,873	0,104	3,543	0,762	0,215
2	7,026	0,855	0,122	3,520	0,761	0,216
3	5,71	0,832	0,146	3,498	0,76	0,217
4	4,453	0,798	0,179	3,475	0,759	0,218
5	3,253	0,747	0,23	3,453	0,758	0,219
6	2,106	0,663	0,315	3,43	0,757	0,221
7	1,012	0,491	0,486	3,408	0,756	0,222
8	–	–	–	15,374	0,918	0,06

Обозначение:  $n$  – номер Y-разветвителя.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. **Measures R.M.** Structural monitoring with fiber optic technology. Cambridge, Massachusetts, USA: Academic Press, 2001. 716 p.

2. **Langhammer J., Eriksrud M., Berg C., Nakstad H.** Fiber optic permanent seismic system for increased hydrocarbon recovery // Proceedings



of the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, European Association of Geoscientists & Engineers, Salvador, Brasil, 24–28 August, 2009. cp-195-00408.

3. **Plotnikov M.Y., Lavrov V.S., Dmitraschenko P.Y., Kulikov A.V., Meshkovskiy I.K.** Thin cable fiber-optic hydrophone array for passive acoustic surveillance applications // *IEEE Sensors Journal*. 2019. Vol. 19. No. 9. Pp. 3376–3382.

4. **Kersey A.D., et al.** Multiplexed interferometric fiber sensors // 7th Optical Fibre Sensors Conference. The Institution of Radio and Electronics Engineers Australia, 1990. Pp. 313–319.

5. **Akkaya O.C., Digonnet M.J.F., Kino G.S., Solgaard O.** Time-division-multiplexed interferometric sensor arrays // *Journal of Lightwave Technology*. 2013. Vol. 31. No. 16. Pp. 2701–2708.

6. **Liao Y., Austin E., Nash P.J., Kingsley S.A., Richardson D.J.** Highly scalable amplified hybrid TDM/DWDM array architecture for

interferometric fiber-optic sensor systems // *Journal of Lightwave Technology*. 2013. Vol. 31. No. 6. Pp. 882–888.

7. **Kersey A.D., Dandridge A., Dorsey K.L.** Transmissive serial interferometric fiber sensor array // *Journal of Lightwave Technology*. 1989. Vol. 7. No. 5. Pp. 846–854.

8. **Brooks J., Moslehi B., Kim B., Shaw H.** Time-domain addressing of remote fiber-optic interferometric sensor arrays // *Journal of Lightwave Technology*. 1987. Vol. 5. No. 7. Pp. 1014–1023.

9. **Lijuan Gu, Xiangge He, Duo Yi, et al.** Common-mode noise suppression technique in interferometric fiber-optic sensors // *Journal of Lightwave Technology*. 2019. Vol. 37. No. 21. Pp. 5619–5627.

10. **Yoshida M., Hirayama Y., Takahara A.** Real-time displacement measurement system using phase-shifted optical pulse interferometry: Application to a seismic observation system // *Japanese Journal of Applied Physics*. 2016. Vol. 55. No. 2. P. 022701.

*Статья поступила в редакцию 16.04.2020, принята к публикации 25.04.2020.*

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**КОСТРОМИТИН Алексей Олегович** – инженер АО “Концерн «ЦНИИ “Электроприбор”», Санкт-Петербург; аспирант Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

197046, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Малая Посадская ул., 30.  
kostromitin.aleksei@yandex.ru

**ЛИОКУМОВИЧ Леонид Борисович** – доктор физико-математических наук, профессор Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
leonid@spbstu.ru

**СКЛЯРОВ Филипп Владимирович** – начальник группы АО “Концерн «ЦНИИ “Электроприбор”», Санкт-Петербург; аспирант Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

197046, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Малая Посадская ул., 30.  
sklyarov.fil@gmail.com

**КОТОВ Олег Иванович** – доктор физико-математических наук, профессор Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
kotov@rphf.spbstu.ru

## REFERENCES

1. **Measures R.M.**, Structural monitoring with fiber optic technology, Academic Press, Cambridge, Massachusetts, USA, 2001.
2. **Langhammer J., Eriksrud M., Berg C., Nakstad H.**, Fiber optic permanent seismic system for increased hydrocarbon recovery, In: Proceedings of the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, European Association of Geoscientists & Engineers, Salvador, Brasil, 24–28 Aug. 2009, cp-195-00408.
3. **Plotnikov M.Y., Lavrov V.S., Dmitraschenko P.Y., et al.**, Thin cable fiber-optic hydrophone array for passive acoustic surveillance applications, IEEE Sensors Journal. 19 (9) (2019) 3376–3382.
4. **Kersey A.D., et al.**, Multiplexed interferometric fiber sensors, 7th Optical Fibre Sensors Conference, The Institution of Radio and Electronics Engineers Australia (1990)313–319.
5. **Akkaya O.C., Digonnet M.J.F., Kino G.S., Solgaard O.**, Time-division-multiplexed interferometric sensor arrays, Journal of Lightwave Technology. 31 (16) (2013) 2701–2708.
6. **Liao Y., Austin E., Nash P.J., et al.**, Highly scalable amplified hybrid TDM/DWDM array architecture for interferometric fiber-optic sensor systems, Journal of Lightwave Technology. 31 (6) (2013) 882–888.
7. **Kersey A.D., Dandridge A., Dorsey K.L.**, Transmissive serial interferometric fiber sensor array, Journal of Lightwave Technology. 7 (5) (1989) 846–854.
8. **Brooks J., Moslehi B., Kim B., Shaw H.**, Time-domain addressing of remote fiber-optic interferometric sensor arrays, Journal of Lightwave Technology. 5 (7) (1987) 1014–1023.
9. **Lijuan Gu, Xiangge He, Duo Yi, et al.**, Common-mode noise suppression technique in interferometric fiber-optic sensors, Journal of Lightwave Technology. 37 (21) (2019) 5619–5627.
10. **Yoshida M., Hirayama Y., Takahara A.**, Real-time displacement measurement system using phase-shifted optical pulse interferometry: Application to a seismic observation system, Japanese Journal of Applied Physics. 55 (2) (2016) 022701.

Received 16.04.2020, accepted 25.04.2020.

## THE AUTHORS

**KOSTROMITIN Aleksey O.**

Concern CSRI “Elektropribor”; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University  
30 Malaya Posadskaya St., St. Petersburg, 197046, Russian Federation  
kostromitin.aleksei@yandex.ru

**LIOKUMOVICH Leonid B.**

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation  
leonid@spbstu.ru

**SKLIAROV Philipp V.**

*Concern CSRI “Elektropribor”; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*  
30 Malaya Posadskaya St., St. Petersburg, 197046, Russian Federation  
sklyarov.fil@gmail.com

**KOTOV Oleg I.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation  
kotov@rphf.spbstu.ru