

DOI: 10.18721/JPM.13415
УДК 535.3, 535-15, 535.417

УРОВЕНЬ ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТИ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ ОПТОВОЛОКОННЫХ СХЕМ С ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМИ БРЭГГОВСКИМИ РЕШЕТКАМИ ДЛЯ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Л.Б. Лиокумович¹, А.О. Костромитин^{2,1},
Ф.В. Складаров^{2,1}, О.И. Котов¹

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация;

² Концерн «ЦНИИ "Электроприбор"»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Данная работа продолжает цикл статей, посвященных предложенной авторами идеологии расчета параметров элементов и анализа выходной мощности в волоконно-оптических интерферометрических схемах с мультиплексированием чувствительных элементов по времени (TDM). Проанализирована схема мультиплексирования на основе волоконно-оптических брэгговских решеток. Расчетный метод определения параметров элементов предусматривает равные оптические мощности от всех мультиплексированных чувствительных элементов, обеспечивает оценку эффектов, связанных с отклонением параметров схем от заданных расчетным путем. В соответствии с идеологией расчета обоснована последовательность применения необходимых расчетных выражений, приведены примеры результатов расчетов и анализа характерных закономерностей для рассматриваемой структуры оптоволоконной схемы. Предложенный подход рекомендуется использовать для разработки интерферометрических измерителей с мультиплексированием волоконно-оптических чувствительных элементов.

Ключевые слова: волоконно-оптический интерферометрический датчик, брэгговская решетка, оптическая мощность, временное мультиплексирование

Ссылка при цитировании: Лиокумович Л.Б., Костромитин А.О., Складаров Ф.В., Котов О.И. Уровень выходной мощности интерферометрических оптоволоконных схем с волоконно-оптическими брэгговскими решетками для мультиплексирования чувствительных элементов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2020. Т. 13. № 4. С. 185–202. DOI: 10.18721/JPM.13415

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

AN OUTPUT POWER LEVEL OF THE FIBER-OPTIC INTERFEROMETRIC SCHEMES WITH FIBER BRAGG GRATINGS FOR MULTIPLEXING THE SENSITIVE ELEMENTS

L.B. Liokumovich¹, A.O. Kostromitin^{2,1},
Ph.V. Skliarov^{2,1}, O.I. Kotov¹

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russian Federation;

² Concern CSRI "Elektroprigor",
St. Petersburg, Russian Federation

The paper continues a series of articles devoted to the procedure proposed by the authors how to calculate the required elements' parameters and the output optical power level of the fiber-optic interferometric schemes with time-division multiplexing (TDM) of sensing elements. In particular, the schemes based on fiber Bragg gratings have been analyzed. The proposed method enables to ensure uniformity of powers of optical signals from individual sensing elements, as well as to evaluate how the deviations of elements' parameters from the nominal ones influence the optical powers. According to the calculation methodology, a sequence of applying the required expressions was substantiated and some obtained results and an analysis of characteristic behaviors for the considered optical fiber circuits were exemplified. The proposed approach was recommended for design of interferometric optical fiber sensors with multiplexed sensing elements.

Keywords: fiber-optic interferometric sensor, Bragg grating, optical power, time-division multiplexing

Citation: Liokumovich L.B., Kostromitin A.O., Skliarov Ph.V., Kotov O.I., An output power level of the fiber-optic interferometric schemes with fiber Bragg gratings for multiplexing the sensitive elements, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 13 (4) (2020) 185–202. DOI: 10.18721/JPM.13415

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 измерительные системы и устройства обладают рядом достоинств, связанных, прежде всего, с возможностью использования полностью оптических электронейтральных и пассивных оптоволоконных чувствительных трактов, а также трактов для связи чувствительных элементов с оптоэлектронной частью [1]. Среди оптоволоконных измерительных систем выделяются своей привлекательностью интерферометрические [2], благодаря тому, что обеспечивают наилучшее разрешение. В последние десятилетия подобные измерительные системы активно развиваются и внедряются в различных областях техники, например, в навигационных комплексах, в гидроакустике, в приборах нефтегазовой отрасли, в измерительном оборудовании для медицинских целей [3 – 6].

Практическое внедрение подобных измерительных систем прежде всего связано с теми, в которых реализуется мультиплексирование набора оптоволоконных чувствительных элементов (ЧЭ) в единый тракт, подключаемый к оптическому источнику и фотоприемнику. Для этого чаще всего применяется принцип мультиплексирования с разделением по времени (*англ.* Time Division Multiplexing (TDM)) [6], когда в оптоволо-

конную схему вместо непрерывного светового излучения подаются оптические импульсы, а на выходе схемы в ответ на каждый входной импульс формируется последовательность выходных, каждый из которых несет информацию о соответствующем ЧЭ и воздействии на него. Структура такой оптической схемы и параметры всех элементов (чувствительные сегменты волокна, светоделительные элементы, отражатели и т. п.) должны соответствовать целой совокупности соотношений для обеспечения работоспособности такой измерительной системы и ее эффективности.

Важной составляющей в наборе параметров для оптоволоконных схем с мультиплексированием ЧЭ в интерферометрической измерительной системе является так называемая энергетическая эффективность, а именно — уровень мощности выходных импульсов по отношению к мощности импульса на входе схемы. Энергетическая эффективность влияет непосредственно на достигаемое отношение сигнал/шум в формируемой серии интерференционных сигналов и, как следствие, на уровень выходных шумов измерительной системы. Тем не менее, в доступной авторам литературе не представлены комплексные методы расчета энергетической эффективности таких оптоволоконных схем. Обычно приводятся лишь



упрощенные оценки для частных случаев, когда нет возможности учета важных факторов (потери оптической мощности в элементах, возможные отклонения фактических параметров от требуемых оптимальных значений, в том числе случайные отклонения) [7]. Зачастую используются приближения, плохо выполняющиеся на практике, например, предполагается слишком большое или даже бесконечное число мультиплексируемых ЧЭ [7], в то время как в реальных системах обычно мультиплексируется до 16 или 32 ЧЭ, а нередко актуальны схемы и с восемью или даже с четырьмя ЧЭ.

Пример последовательной методики энергетического расчета для оптоволоконных схем с мультиплексируемыми ЧЭ приведен в нашей работе [8], где также показаны возможности анализа характеристик рассмотренных схем на основе развитой методики расчета.

В данной работе предлагается аналогичное рассмотрение методики энергетического расчета и краткий анализ полученных результатов для схемы другого типа, для такой, где в качестве светоделительных элементов используются волоконно-оптические брэгговские решетки (ВОБР) [10]. Этот вариант привлекателен для практического применения, в том числе и потому, что он позволяет обеспечивать улучшенные энергетические характеристики.

Однако такие схемы обладают серьезным недостатком: в них присутствует перекрестная связь между сигналами от разных ЧЭ [10].

В связи с вышеизложенным, чрезвычайно актуальной представляется возможность обоснованного комплексного расчета оптимальной системы параметров ВОБР и уровня мощности выходного оптического излучения в таких схемах, с учетом всех ключевых параметров элементов, а также параметров, характеризующих уровень паразитной перекрестной связи.

Рассматриваемая схема и принципы организации расчетов

Предметом анализа является оптоволоконный тракт для мультиплексируемой

интерферометрической измерительной системы. Ее чувствительные элементы (ЧЭ) представляют собой отрезки волокна, смонтированные в определенных конструктивных узлах; последние оптимизированы для преобразования целевого возмущения, проходящего через этот отрезок, в изменение фазовой задержки света. Ключевой частью такой системы выступает оптическая схема, в которой N волоконных ЧЭ объединены в некоторый тракт с применением разветвителей и отражателей [11].

В схемах отражательного типа, в качестве ввода и вывода излучения может использоваться фактически один и тот же волоконный вывод (в приборной части системы для разделения могут использоваться дополнительный Y -разветвитель или циркулятор). В схемах проходного типа вход и выход находятся в разных концах тракта с ЧЭ. Если на вход схемы поступает короткий оптический импульс с мощностью P_{in} , то на выходе схемы должна сформироваться последовательность выходных импульсов с мощностями p_n , причем n -й импульс проходит через ЧЭ от первого до n -го и не проходит через остальные ЧЭ. Обычно формируется $N + 1$ импульс с номерами от 0 до N , где импульс с нулевым номером ($n = 0$) не проходит ни одного ЧЭ. Эти импульсы будут задержаны друг относительно друга вследствие задержки при прохождении соответствующей системы звеньев схемы ЧЭ.

Для схем, рассмотренных в нашей статье [8], а также рассматриваемых в данной работе (включая схемы, приведенные в Приложении 1), задержка света при прохождении звеньев схемы определяется, прежде всего, задержкой при распространении через волоконные ЧЭ. Далее в приборной части, за счет применения так называемого компенсирующего интерферометра, импульсы разделяются, смещаются, и каждый исходный импульс совмещается с предыдущим. В итоге, благодаря отдельной обработке импульсов, на выходе компенсирующего интерферометра можно регистрировать результат интерференции импульсов, разность фаз

которых задается фазовой задержкой света в n -м ЧЭ, и, следовательно, регистрировать информацию о целевом воздействии на данный элемент. В ходе работы измерительной системы входные импульсы повторяются, за счет чего формируется последовательность отсчетов интерференционного сигнала от каждого ЧЭ (от каждого канала).

Анализ таких схем подразумевает разные виды описания и расчетов, связанные с разными типами факторов, которые следует учитывать и согласовывать для обеспечения работоспособности системы и оптимизации ее характеристик. Здесь рассматривается фактор энергетической эффективности схемы, т. е. анализируются уровни оптической мощности импульсов, формируемых схемой.

По аналогии с подходом, использованном и описанном в статье [8], данная работа подразумевает выбор параметров делительных и отражающих элементов, обеспечивающий одинаковую мощность всех формируемых схемой импульсов: $p_n = P_0$. В этом случае основным параметром, характеризующим энергетическую эффективность оптической схемы, служит относительный уровень оптической мощности формируемой серии импульсов $P_{norm} = P_0/P_{in}$.

Типы оптоволоконных схем с мультиплексированием ЧЭ, проанализированные в статье [8], организованы так, что n -й обратный импульс, отраженный от n -го ЧЭ, дважды ответвляется разветвителем и, как следствие, величина P_{norm} быстро падает с ростом значения N (в лучшем случае зависимость выражается примерно как $1/N^2$).

Можно привести другой вариант организации схем с мультиплексированием волоконных ЧЭ, причем более выгодный с точки зрения уровня P_{norm} . Примером служит схема, привлекательная для практического использования (рис. 1), где используются частично отражающие волоконные элементы (полупрозрачные зеркала). В качестве последних в настоящее время преимущественно используются волоконно-оптические брэгговские решетки (ВОБР). По сравнению со схемами, примеры которых даны в статье [8], вариант,

включающий ВОБР, представляет другой вид (см. Приложение 1), обладающий двумя важными особенностями (положительной и отрицательной):

с одной стороны, схема формирует существенно больший относительный уровень мощности импульсов P_{norm} , который довольно медленно снижается с ростом значения N ;

с другой стороны, помимо основной последовательности выходных импульсов, в схеме формируются дополнительные, паразитные, которые вызывают перекрестные связи между целевыми сигналами от разных ЧЭ.

Как показано в Приложении 1, такими свойствами могут обладать не только схемы с проходными отражателями, но и с разветвителями, причем на их основе можно реализовывать схемы и отражательного, и проходного типов. Наличие существенной перекрестной связи значительно снижает привлекательность практического применения описываемых вариантов и нейтрализует достоинства таких схем по энергетической эффективности. А для снижения уровня перекрестной связи приходится выбирать параметры так, чтобы уменьшался относительный уровень мощности P_{norm} . Все это повышает актуальность развития адекватных методик расчета подобных схем.

Общий принцип и основные этапы расчета параметров элементов (в данном случае это, прежде всего, коэффициенты отражения ВОБР) и мощности выходных оптических импульсов полностью аналогичен подходу, описанному в нашей статье [8]. Часть методики расчета связана с получением и использованием мультипликативных выражений для расчета p_n , предполагающих, что все параметры элементов схемы заданы. Другая часть методики подразумевает вывод рекуррентных соотношений для основных элементов n -го звена схемы, за счет чего можно обеспечить выполнение условия равенства мощностей всех выходных импульсов ($p_n = P_0$). Эти части расчетных выражений позволяют не только определять требуемые значения параметров элементов схемы, но также учитывать и анализировать влияние

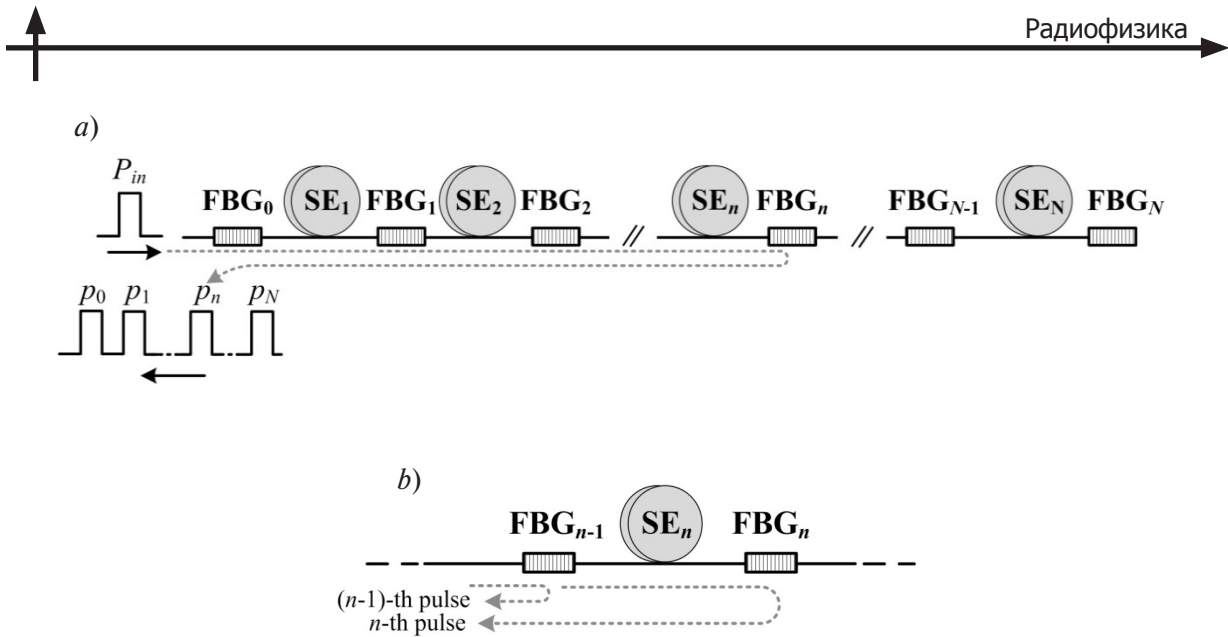


Рис. 1. Пример схемы на основе ВОБР с N чувствительными элементами (а), а также n -е звено данной схемы (b); SE _{i} – чувствительный элемент (Sensitive Element); FBG _{i} – волоконная брэгговская решетка (Fiber Brag Grating); P_{in}, p_n – мощности входного и выходных импульсов, соответственно

различных факторов, например потерь в элементах (в том числе случайных), отклонений фактических значений параметров элементов от номинальных или предусмотренных значений, а также прочих моментов, неизбежно присутствующих при создании практических систем.

Методика расчета параметров ВОБР и общий анализ уровня мощности выходных импульсов

Для описания действия ВОБР в качестве отражательного элемента, будем использовать коэффициент отражения R , равный отношению уровня мощности оптического излучения, направляемого решеткой в обратном направлении, к уровню мощности, поступающей к ВОБР. При этом мощность излучения, прошедшего через ВОБР, будем описывать коэффициентом пропускания K на рабочей длине волны, задаваемом выражением

$$K = (1 - R) (1 - \alpha_{el}),$$

где первый множитель учитывает тот факт, что часть мощности направлена решеткой в обратном направлении, а второй – наличие

внутренних (избыточных) потерь оптической мощности; эти потери характеризуется малым параметром α_{el} .

Будем также использовать коэффициент передачи мощности K_f для отрезка волокна с ЧЭ, учитывающий потери оптической мощности в данном отрезке. Поскольку в чувствительных элементах волокно может быть скручено в катушку или еще каким-либо образом смонтировано в конструкции ЧЭ, величина этих потерь может быть значимой, даже несмотря на относительно небольшую протяженность этого оптоволоконного отрезка. При наличии в схеме сварных или разъёмных соединений, потери в них также следует учитывать в значениях коэффициентов K_f .

На практике потери удобно характеризовать в децибелах, с применением стандартных соотношений

$$\alpha_{el[\text{dB}]} = 10 \cdot \lg(1 - \alpha_{el}),$$

$$\alpha_f = 10 \cdot \lg K_f.$$

Находить же значения K_f и α по α_f и $\alpha_{el[\text{dB}]}$ можно на основе тривиальных обратных соотношений.

С учетом введенных параметров и обозначений, если рассмотреть прохождения входного импульса до n -й ВОБР и обратно (см. рис. 1, *a*), то нетрудно записать мультипликативное выражение для p_n :

$$p_n = P_{in} \cdot R_n \cdot \prod_{q=1}^n (K_{q-1}^2 \cdot K_{fq}^2). \quad (1)$$

Формула (1) подразумевает, что если верхний предел произведения меньше нижнего (что имеет место при $n = 0$), то произведение равно единице. На практике часто можно полагать, что все ЧЭ эквивалентны и K_f не зависит от величины n . Тогда в выражении (1) этот параметр можно исключить из произведения и использовать дополнительный множитель K_f^{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 $p_{n-1} = p_n$; оно имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} R_{n-1} &= K_{n-1}^2 \cdot K_{fn}^2 \cdot R_n = \\ &= (1 - \alpha_{el(n-1)})^2 (1 - R_{n-1})^2 K_{fn}^2 \cdot R_n, \end{aligned} \quad (2)$$

где n может меняться от 1 до N .

Соотношение (2) представляет собой квадратное уравнение относительно R_{n-1} , которое имеет решение в виде

$$R_{n-1} = \frac{a + 1 - \sqrt{2a + 1}}{a}, \quad (3)$$

где использовано обозначение $a = 2[(1 - \alpha_{el(n-1)})K_{fn}]^2 R_n$.

Второе решение уравнения (2) имеет аналогичную структуру, но со знаком плюс перед квадратным корнем, и не соответствует физическому смыслу в рассматриваемой ситуации, так как приводит к получению значения $R > 1$.

Возможность применения рекуррентного

соотношения (3) предполагает выполнение двух условий.

Во-первых, необходимо задать некоторое значение коэффициента отражения замыкающего зеркала R_N , относительно которого можно далее рассчитывать коэффициенты отражения остальных ВОБР. Выбор этого значения и его влияние будут рассмотрены далее.

Во-вторых, соотношение (3) использует параметры K_{fn} (для $n = 1, 2, \dots, N$) и α_{eln} (для $n = 1, 2, \dots, N - 1$), связанные с потерями оптической мощности в элементах схемы. Коэффициенты передачи K_{fn} зависят от уровня потерь в ЧЭ, и они не связаны с выбором ВОБР, а должны быть известны. Но внутренние потери α_{el} в ВОБР, вообще говоря, могут быть связаны со значением R решетки, причем эта связь может быть разной в зависимости от технологии создания решеток и их монтажа в оптическую схему.

Для строгого формального решения рассматриваемой задачи зависимость α_{el} от R должна быть так или иначе задана, уравнение (2) должно решаться относительно R_{n-1} с учетом этой зависимости, а результат может существенно отличаться от задаваемого формулой (3).

В связи с изложенными обстоятельствами, конкретное решение уравнения (2) для общего случае зависимости $\alpha_{el}(R)$ привести проблематично. Поэтому предлагается в расчетах применять именно соотношение (3), в котором использовать в качестве α_{eln} некоторое фиксированное и не зависящее от n значение (типовое или среднее для ВОБР, которые предполагается использовать). При этом если условие малости потерь $\alpha_{eln} \ll 1$ выполняется достаточно строго, то влияние различия α_{el} из-за различия R_n будет мало влиять на получаемые значения p_n . Более того, после этапа расчета коэффициентов отражения решеток R_n данные о фактических потерях в ВОБР с этими значениями коэффициентов отражения можно далее учесть при анализе влияния этого фактора на значения p_n .

Если принять $\alpha_{eln} = \alpha_{el}$, то с учетом указанных пояснений рекуррентное выражение (3)



можно записать в более простом виде:

$$R_{n-1} = \frac{K_{fn}^2 \cdot R_n + b - \sqrt{K_{fn}^2 \cdot R_n + b^2}}{K_{fn}^2 \cdot R_n}, \quad (4)$$

где введена константа $b = 0,5/(1 - \alpha_{el})$.

Выбрав некоторый уровень отражения последнего отражателя R_N , можно далее по рекуррентному выражению (4) поочередно получать значения для остальных коэффициентов отражения R_n от $n = N - 1$ до $n = 0$.

После определения набора требуемых коэффициентов отражения решеток R_n , в порядке заключительного этапа расчетов можно найти значение мощностей импульсов p_n на основе выражения (1). Если параметры K_{fn} и α_{eln} не зависят от n , то, согласно принципу вывода выражения (4), все p_n будут одинаковы и равны P_0 . Поэтому для оценки P_0 можно использовать, например, простейшее соотношение

$$P_0 = p_0 = P_{in} \cdot R_0.$$

С другой стороны, если есть априорная информация о фактических значениях K_{fn} и α_{eln} , то с помощью выражения (1) можно найти p_n и рассмотреть их средние и среднеквадратичные отклонения от P_0 . Если имеются данные о связи избыточных потерь в ВОБР с коэффициентом отражения решетки, то можно найти значения α_{eln} по рассчитанным R_n и учесть зависящие от n потери при вычислении p_n на основе выражения (1).

Кроме того, в силу тех или иных причин значения R'_n (реальные значения коэффициентов отражения ВОБР, которые предполагается использовать) могут отличаться от значений R_n (исходно рассчитанные). Если такие данные известны, то на этом этапе их можно учесть, используя в выражении (1) значения R'_n , а не R_n . Примером может служить случай, когда коэффициенты отражения R'_n реально

изготавливаемых ВОБР задаются с округлением до некоторого уровня, тогда рассчитанные значения R_n надо будет округлить; либо возможен случай, когда расчеты выполняются для изучения влияния случайных отклонений параметров реальных элементов от заданных.

Для общего анализа энергетической эффективности схем обычно достаточно определения относительного уровня P_{norm} ; для расчета данного параметра нужно подставить $P_{in} = 1$ в формулу (1).

Чтобы показать вид зависимостей общего характера, приведем примеры расчетов для случая пренебрежения потерями, когда можно принять, что $K_{fn} = K_n = 1$. На рис. 2 с этой целью представлен результат расчета R_n при $n = 0, 1, \dots, 16$, когда $R_N = 100\%, 50\%, 30\%, 10\%$ и 5% . Для наглядности дальнейшего анализа приведены зависимости $R(m)$, где m – номер ВОБР от конца тракта, т. е. $m = N - n$. При такой нумерации $R_N = R(0)$. В соответствии с принципом рекуррентного расчета, представленные зависимости отражают результат для любого числа чувствительных элементов N в пределах от 0 до 15. Для заданного N нужно использовать первые $N + 1$ значений коэффициентов $R(m)$, где m принимает значения от 0 до N . Остальные же расчетные коэффициенты со значениями $m > N$ в этом случае не нужны.

Как уже упоминалось, если не вводить в расчеты мощностей по формуле (1) различия между фактическими значениями коэффициентов отражения и исходными расчетными, то мощность P_0 можно оценить как $P_0 = P_{in} \cdot R_0$. Тогда

$$P_{norm} = R_0 = R(m)|_{m=N}.$$

Из этого следует, что представленные зависимости $R(m)$ одновременно отображают связь между величинами P_{norm} и N , что также отмечено на рис. 2. Для возможности анализа конкретных значений $R(m)$ или $P_{norm}(N)$, показанных на рис. 2, эти значения приведены в виде таблицы в Приложении 3.

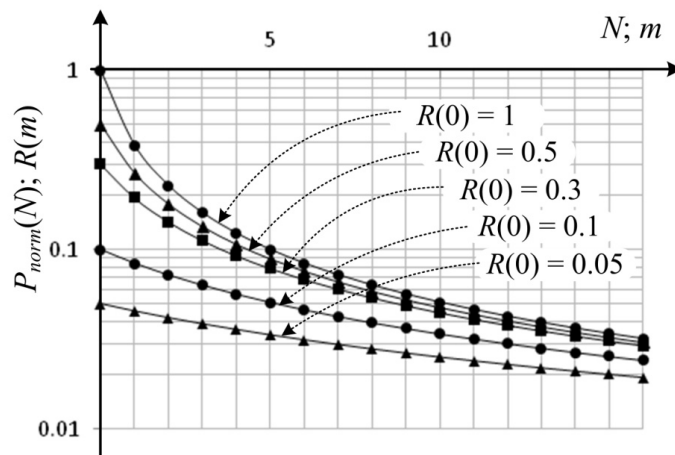


Рис. 2. Зависимости относительного уровня мощности импульсов P_{norm} от числа элементов N (N меняется от 1 до 16) и коэффициентов отражения ВОБР R от номера решетки m (нумерация от конца тракта, n – номер звена схемы, $m = N - n$ и также меняется от 0 до 16) для разных значений коэффициента отражения конечного элемента $R(0)$

В случае $R_N = 1$ (на рис. 2 это соответствует $R(0) = 1$) для области значений N от 1 до 15 зависимость $P_{norm}(N)$ с хорошей точностью пропорциональна $1/N$; аппроксимация дает зависимость $P_{norm} = 0,45 / N^{0,95}$. Для значений коэффициента отражения конечного элемента, равных 50%, 30% и 10% ($R(0) = 0,5, 0,3$ и $0,1$), зависимости также хорошо соответствуют степенным, но показатель степени снижается, и при $R_N = 10\%$ зависимость уже пропорциональна $1/\sqrt{N}$. При значении $R(0) = 0,05$ ($R_N = 5\%$), зависимость уже лучше описывается не степенной, а логарифмической зависимостью; аппроксимация дает функцию

$$P_{norm} = 0,051 - 0,011 \cdot \ln N.$$

Если сравнить эти результаты с аналогичными расчетными данными для схем на основе разветвителей, которые свободны от перекрестных связей каналов [9], то для всех значений N очевиден существенный выигрыш в уровне выходных оптических импульсов, даже если использовать относительно низкие значения R_N , такие как 5%. Более того, в случае альтернативного типа схем, зависимости $P_{norm}(N)$ можно аппрок-

симировать степенными зависимостями, с показателями, близкими к 2 или более высокими [8].

Очевидно, что для любого значения N максимальный уровень P_{norm} обеспечивается при $R_N = 1$. Однако снижение коэффициента отражения конечной ВОБР и, соответственно, остальных решеток, позволяет снизить уровень перекрестной связи каналов. Количественной характеристикой указанной связи служит коэффициент K_{cr} (см. Приложение 2). Если пренебречь потерями в волоконных элементах, то для рассматриваемой схемы он вводится выражением (а4) и имеет вид

$$K_{cr} = R^2_{N-1} R_{N-2} / [R_N (1 - R_{N-1})^2].$$

При нумерации $R(m)$, используемой на рис. 2, можно записать:

$$K_{cr} = R(1)^2 \cdot R(2) / [R(0) (1 - R(1))^2].$$

С учетом полученных данных (можно, например, использовать сведения из Приложения 3), для случаев $R_N = 100\%$, 10% и 5% коэффициенты перекрестной связи K_{cr} приобретают значения $0,087$; $6,06 \cdot 10^{-3}$ и $1,91 \cdot 10^{-3}$ соответственно.

Таблица 1

Зависимость уровня оптической мощности формируемой системы импульсов от значений ключевых параметров схемы

R_N	K_{cr}	P_{norm}		
		$N = 4$	$N = 8$	$N = 16$
1,00	0,087	0,123	0,063	0,032
0,10	$6,06 \cdot 10^{-3}$	0,056	0,039	0,024
0,05	$1,91 \cdot 10^{-3}$	0,036	0,028	0,019

Обозначения: N – число чувствительных элементов, R_N – коэффициент отражения последнего отражателя в схеме, K_{cr} – коэффициент перекрестной связи.

Таким образом, уменьшение коэффициента отражения конечного отражателя R_N в 20 раз приводит к снижению коэффициента перекрестной связи K_{cr} в 45 раз. Однако при этом будет снижаться относительный уровень мощности оптических импульсов P_{norm} , формируемых схемой. Это демонстрирует табл. 1, где сопоставлены значения R_N , K_{cr} и P_{norm} . При этом, согласно данным табл. 1, снижение перекрестной связи почти на два порядка обеспечивается при относительно небольшом снижении P_{norm} . Для схемы с четырьмя ЧЭ уровень мощности снижается в 3,4 раза. Для более привлекательных вариантов с $N = 8$ и $N = 16$ мощность снижается уже менее существенно: для восьми ЧЭ величина P_{norm} снижается в 2,3 раза, а для шестнадцати – всего в 1,6 раза.

Влияние потерь мощности в элементах схемы и различия между расчетными и фактическими значениями коэффициентов отражения

Рассмотренная методика расчета позволяет учитывать потери в элементах схемы. Комплексный анализ влияния потерь на зависимости $R(m)$ и $P_{norm}(N)$ вызывает определенные затруднения ввиду слишком высокой вариативности возможных значений параметров при их существенном влиянии на характеристики схемы. В связи с этим ограничимся просто примерами расчетов, показывающих учет таких потерь и их влияние. Так

например, на рис. 3,а показаны зависимости $R(m)$ или $P_{norm}(N)$ (при введенной нумерации эти зависимости будут совпадать, см. пояснения выше). График демонстрирует снижение коэффициентов отражения ВОБР, требуемых для равенства мощности выходных импульсов, а также снижение относительного уровня этой мощности вследствие учета потерь в оптоволоконных ЧЭ и избыточных потерь в ВОБР. В этом примере потери элементов всех звеньев схемы полагаются одинаковыми. Нетрудно видеть, что учет незначительных потерь заметно влияет на расчетные зависимости, особенно при большом числе ЧЭ.

На рис. 3,б приведены результаты расчета $P_{norm}(N)$ при разных значениях $R_N = R(0)$ для случая учета потерь $\alpha_f = 0,10$ дБ и $\alpha_{el} = 0,05$ дБ. Несмотря на заметное влияние потерь на приведенные зависимости (если их сравнивать с кривыми на рис. 2), остается справедливым общий вывод об относительно небольшом снижении уровня выходной мощности при существенном снижении значений R_N и K_{cr} .

Как уже было отмечено, важное достоинство рассматриваемой методики – это возможность учета различий между расчетными и фактическими значениями параметров элементов схемы, а также анализа влияния таких различий.

В качестве примера рассмотрим случай, когда для реальных ВОБР коэффициенты отражения могут быть заданы с конечной

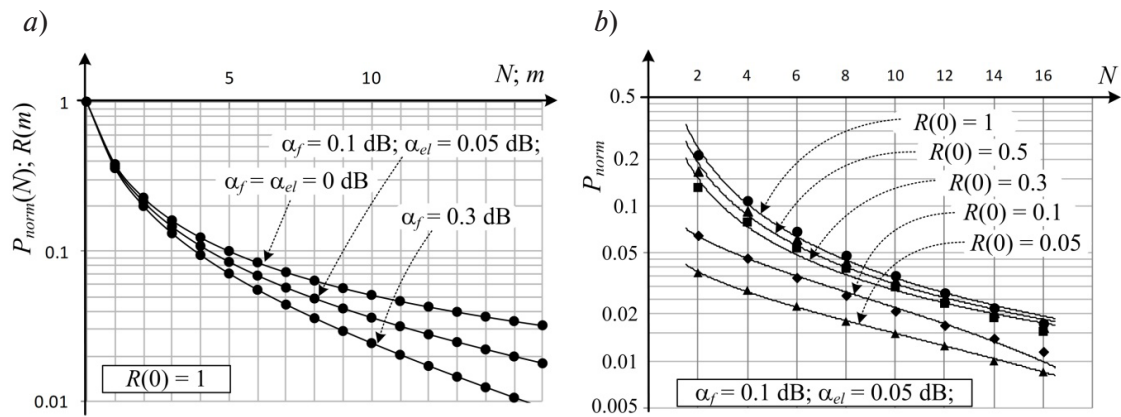


Рис. 3. Примеры результатов расчетов, учитывающих потери оптической мощности в элементах схемы. Представлены зависимости $R(m)$ (либо $P_{norm}(N)$, зависимости совпадают) при $R(0) = 1$ и разных значениях коэффициентов потерь (a), а также $P_{norm}(N)$ для разных значений R_N (b)

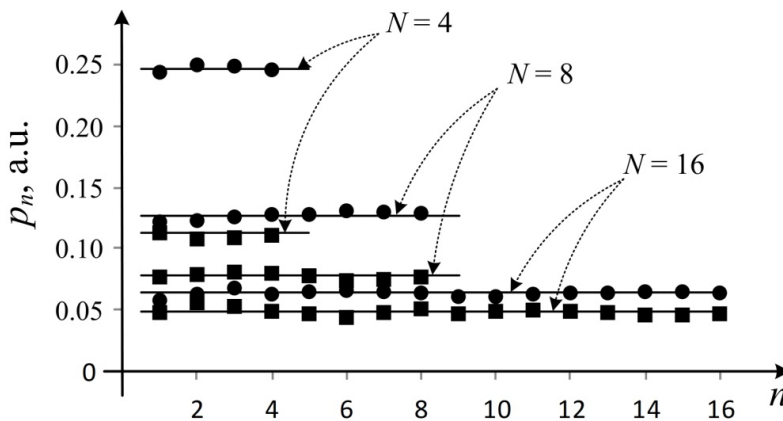


Рис. 4. Зависимости мощности выходных импульсов от номера звена схемы для разных N и двух значений R_N , %: 99 и 10 (круглые и квадратные символы соответственно). Значения p_n нормализованы на мощность входного импульса P_m . Рассмотрен случай, когда значения R'_n получены при округлении R_n до 1 %; сплошными линиями показаны уровни P_{norm} при отсутствии округления

точностью, например, с точностью до 1%. В Приложении 3 показан результат такого округления значений R_n , полученных при пренебрежении потерями. Если обратиться к данным таблицы в Приложении 3, то можно убедиться, что округление может вносить существенные различия между R'_n и R_n , так как сами исходные значения R_n невелики, особенно при относительно больших значениях N и малых коэффициентах отражения R_N . Влияние округления на неравномерность

p_n демонстрируют графики на рис. 4, где в качестве примера приведены результаты расчетов значений p_n при подстановке округленных коэффициентов R'_n в формулу (1). Видно, что при этом вносимые вариации p_n хотя и заметны, но не существенны. Более точные количественные данные, характеризующие зависимости, приведенные на рис. 4, представлены в табл. 2. Эти данные показывают, что отклонение среднего значения мощностей импульсов отличается от ис-



Таблица 2

**Влияние округления расчетных значений R_n до 1% при вычислении
оптической мощности выходных импульсов по формуле (1)**

N	$R_n, \%$	P_{norm} (без округления)	$^{mean}p_n$	$(^{SD}p_n / ^{mean}p_n), \%$
4	99	0,246	0,247	1,1
	10	0,113	0,11	2,0
8	99	0,1267	0,1266	2,5
	10	0,0783	0,0776	3,0
16	99	0,006357	0,006369	6,0
	10	0,004842	0,004863	3,6

Обозначения: P_{norm} – относительный уровень выходной мощности при отсутствии округления; $^{mean}p_n$ – среднее значение p_n и $^{SD}p_n$ – среднеквадратичное (стандартное) отклонение p_n , нормализованные на мощность входного импульса P_{in} ; остальные идентичны представленным в табл. 1.

ходной оценки P_{norm} только в третьем значащем разряде. И даже для $N = 16$, где влияние более существенно ввиду низких исходных значений R_n , среднеквадратичное отклонение набора значений p_n составляет 6 %, что можно считать приемлемым.

Аналогичным образом можно учитывать другие варианты отклонений фактических параметров от расчетных при вычислении исходных значений R_n (в том числе фактические значения потерь в элементах) и анализировать их влияние на получаемые значения p_n . При этом можно учитывать и анализировать как регулярные, так и случайные отклонения значений параметров.

Аналогичным образом можно учитывать другие факторы отклонения R'_n от R_n . Также на последнем этапе расчета по формуле (1) можно учесть различия фактических значений других параметров и значений, использованных в первом этапе расчетов, при вычислении исходных значений R_n , и анализировать их влияние на получаемые значения p_n . При этом можно учитывать и анализировать как регулярные, так и случайные отклонения значений параметров.

Заключение

Предложена идеология расчета параметров элементов интерферометрических оп-

товолоконных схем мультиплексированных волоконно-оптических датчиков с использованием ВОБР, позволяющая оптимизировать схему по признакам достижения максимального уровня и контраста формируемых интерференционных сигналов. Показана процедура получения выражений для расчета коэффициентов отражения ВОБР, обеспечивающих одинаковые мощности выходных импульсов. Предложенная методика расчета учитывает потери оптической мощности как в ВОБР, так и в отрезках волокон чувствительных элементов. Показано, что в расчетах можно учесть влияние различий между параметрами элементов, используемыми и получаемыми в процессе исходного расчета, и фактическими параметрами элементов, которые будут применены при создании реальной оптической схемы.

Приведены примеры расчетов параметров ВОБР в рассмотренной схеме для разного числа чувствительных элементов и разных уровней перекрестной связи в схеме. Примеры расчетов демонстрируют возможность анализа влияния потерь в элементах схемы и использования округленных значений коэффициентов отражения ВОБР.

Представленные методы и результаты расчетов могут непосредственно использоваться при проектировании оптоволоконных

интерферометрических измерительных систем на основе мультиплексирования чувствительных элементов в схеме с ВОБР.

Приложение 1
Два класса оптоволоконных схем с мультиплексированными чувствительными элементами

Для пояснения особенностей анализируемой схемы кратко опишем два класса оптоволоконных схем для интерферометрических систем с мультиплексированием чувствительных элементов (ЧЭ). В качестве характерных примеров схем первого класса можно указать схемы, рассмотренные в нашей статье [8] и показанные на рис. А1. Первая является схемой отражательного типа, вторая – проходного типа.

Возможен другой класс оптических схем, примеры которых показаны на рис. А2. Этот класс также включает отражательные (*a, b*) и проходные (*c*) схемы. В таких схемах можно использовать отражающие волоконные элементы с низкими потерями, например ВОБР, в режиме частичного отражения/пропускания.

Во всех этих схемах *n*-й выходной оптический импульс формируется, проходя через чувствительные элементы от 1-го до *n*-го. В

отражательных схемах с совмещенным входным/выходным волоконным выводом импульс проходит через эти ЧЭ дважды; в схемах с разделенными волокнами входа и выхода импульс проходит ЧЭ однократно.

Нетрудно убедиться, что в схемах на рис. А1 *n*-й импульс, пройдя через каждый ЧЭ от первого до *n*-го, проходит также через *n*-й разветвитель этого звена схемы по прямому пути (прохождение основной доли мощности) и дважды проходит через разветвитель *n*-го звена по перекрестному пути (ответвление малой доли мощности). В схемах на рис. А2 (*b* и *c*) все происходит аналогичным образом, но *n*-й импульс проходит через *n*-й разветвитель в перекрестном направлении только один раз. В случае схемы ВОБР (*a*) имеет место та же ситуация, если полагать, что прохождение света через ВОБР соответствует прямому прохождению через разветвитель, а отражение от решетки соответствует перекрестному прохождению через него. Именно дополнительный перекрестный проход через разветвитель в схемах первого класса приводит к существенному снижению уровня мощности импульсов, по сравнению со схемами второго класса, поскольку требуемый перекрестный коэффициент пропу-

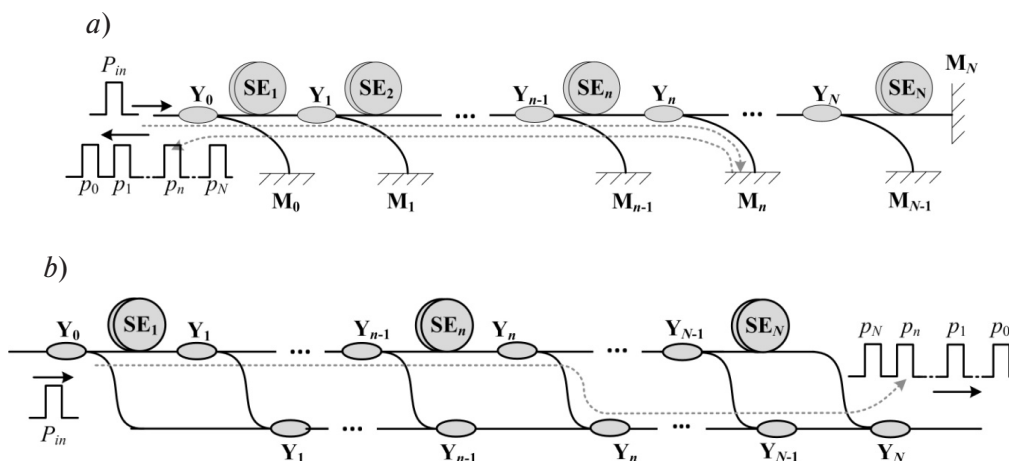


Рис. А1. Оптоволоконные схемы мультиплексирования ЧЭ первого класса: отражательного типа на основе разветвителей и зеркал (*a*) и проходного типа на основе разветвителей (*b*); SE_i – чувствительный элемент (Sensitive Element); Y_i – волоконный разветвитель Y-типа; M_i – зеркало (mirror); P_{in}, P_n – мощности входного и выходных импульсов, соответственно

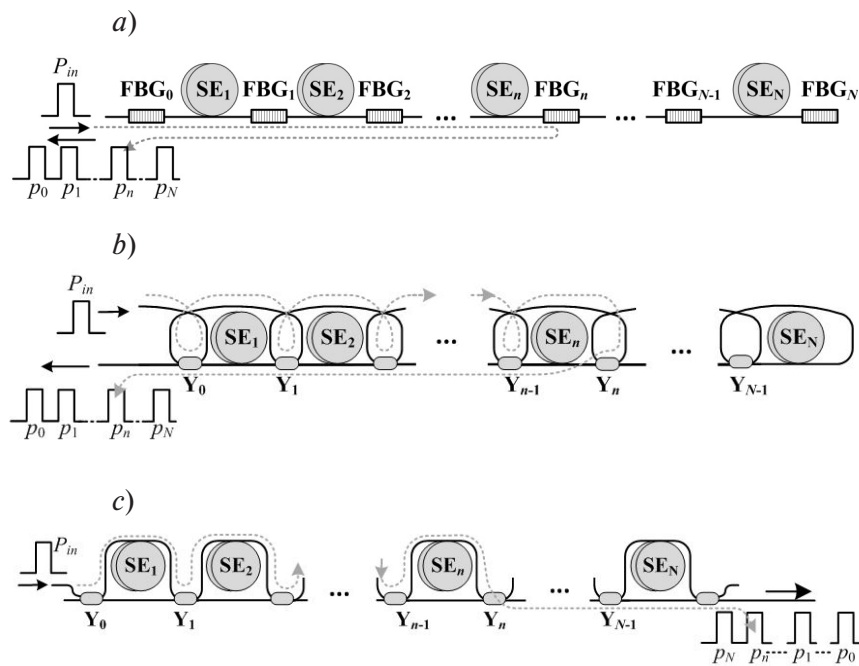


Рис. А2. Оптоволоконные схемы мультиплексирования ЧЭ второго класса: отражательные на основе ВОБР (a) и разветвителей (b), а также проходного типа с разветвителями (c); FBG_i – волоконные брэгговские решетки (Fiber Brag Grating), остальные обозначения идентичны приведенным на рис. А1

скания разветвителей мал и уменьшается с ростом числа ЧЭ N .

Однако нетрудно видеть, что в схемах второго класса n -й выходной импульс может формироваться и при других путях распространения, что более детально описано в Приложении 2. Например, в схеме на рис А1, b импульс может не пройти через n -й ЧЭ, но дважды пройти через любой предыдущий элемент. А в схеме на рис. А1, c импульс может пройти ЧЭ с 1-го по $(n - 1)$ -й, потом пройти мимо n -го ЧЭ и затем пройти через любой из последующих. Если общее число пройденных ЧЭ будет равно n , то в выходной последовательности импульсов этот импульс будет находиться в n -й позиции. Это приводит к тому, что далее в формировании интерференционного сигнала n -го канала участвуют импульсы, фазы которых отличаются не только задержкой в n -м ЧЭ, но и фазовыми задержками в других ЧЭ. Формирование дополнительного n -го импульса связано с дополнительными перекрестными проходами разветвителей и существенным дополнитель-

ным ослаблением. Но тем не менее, наличие не только основных, но и дополнительных импульсов в выходной последовательности приводит к перекрестному влиянию измеряемых целевых возмущений в разных каналах. Более детальное рассмотрение путей формирования дополнительных импульсов в схеме с ВОБР дано в Приложении 2.

Отметим, что в схемах первого класса (см., например, рис. А1) альтернативных путей формирования n -го импульса в выходной последовательности нет. Однако для того, чтобы при организации схемы исключить такую возможность, неизбежно приходится вводить дополнительный перекрестный проход разветвителя и существенно ухудшать энергетическую эффективность схемы.

Таким образом, снижение относительно уровня мощности выходных импульсов является своего рода расплатой за исключение перекрестной связи каналов, и наоборот, можно увеличивать уровень мощности импульсов, если допускать перекрестную связь каналов.

Приложение 2

Формирование паразитных выходных импульсов в схеме мультиплексирования на основе ВОБР

Рассмотрим формирование дополнительных выходных импульсов, определяющих перекрестную связь каналов в рассматриваемой оптоволоконной схеме с ВОБР. Основная последовательность выходных импульсов формируется при прохождении n -го импульса до n -ой решетки и обратно, и при этом отражение происходит один раз (на рис. А3 этот путь обозначен номером 1). Однако возможны и другие пути прохождения схемы, которые имеют ту же протяженность, за счет чего возникают дополнительные импульсы, совпадающие с основным n -м импульсом. Прежде всего такие дополнительные варианты связаны с однократным дополнительным переотражением между ВОБР, когда отражение происходит три раза, причем один раз свет отражается от $(n - 1)$ -й ВОБР. На рис. А3 такие варианты показаны под номерами 2, 3. Под номером 3 показаны два варианта с отражениями от ВОБР и номерами $(n - 2)$ и $(n - 3)$, которые различаются направлением прохода. Но можно предложить и аналогичные пути с переотражениями между двумя любыми соседними ВОБР. Важно отметить, что в этом случае происходит ослабление дополнительного импульса и его мощность отличается от мощности основного импульса множителем

$$k_{crn}(k) = R_k R_{k-1} K_{fk} R_{n-1} \times [R_n (1 - R_{n-1})^2 (1 - \alpha_{el(n-1)})^2 K_{fn}]^{-1}, \quad (a1)$$

где подразумевается дополнительное переотражение от ВОБР с номерами k и $(k - 1)$ (полагается, что $k \leq n$).

Первые четыре множителя учитывают факторы ослабления паразитного импульса, добавленные к факторам ослабления основного, а множители в квадратных скобках учитывают те факторы ослабления, которые есть у основного импульса, но отсутствуют у паразитного. Дополнительное отражение

может происходить не только между соседними ВОБР, но отстоящими на несколько позиций (например, см. рис. А3, вариант 4). В этом более сложном случае коэффициент ослабления имеет дополнительные компоненты:

$$k_{crn}(k, m) = R_k R_m (K_{fk} K_{f(k+1)} \dots K_{fm}) \times \{R_{n-\Delta} [R_n (1 - R_{n-\Delta})^2 \times (1 - \alpha_{el(n-\Delta)})^2 K_{fn} \dots K_{f(n-\Delta)}]^{-1}\}, \quad (a2)$$

где $\Delta = k - m$; разные k и m ($k \geq m$) могут быть любыми, но меньше, чем n .

На рис. А3, вариант 4, показан случай для $k = n - 2, m = n - 4$.

Как следует из пояснений, дополнительных траекторий n -го импульса может быть много. И хотя для конкретного значения N их число конечно, полное рассмотрение общего случая проблематично. Представляется целесообразным обратить внимание на вариант, когда дополнительный импульс имеет максимальную мощность. Согласно методике, развитой в данной статье, выравнивание мощностей выходных импульсов требует выполнения условия $R_n > R_{n-1}$. Если также предположить, что потери в элементах малы и примерно одинаковы, то нетрудно видеть, что наибольший уровень дополнительных импульсов с однократным переотражением будет в случае 2, показанном на рис. А3 для $k = n$ и $n = N$. Поэтому с учетом выражения (a1) в качестве некоторой количественной меры, характеризующей относительный уровень мощности дополнительных импульсов и перекрестной связи, можно привести коэффициент

$$K_{cr} = k_{crN}(N - 1) = R_{N-1}^2 R_{N-2} K_{f(N-1)} \times [R_N (1 - R_{N-1})^2 \times (1 - \alpha_{el(N-1)})^2 K_{fN}]^{-1}. \quad (a3)$$

Для случая, когда можно не учитывать потери в элементах схемы, коэффициент K_{cr} можно записать в виде

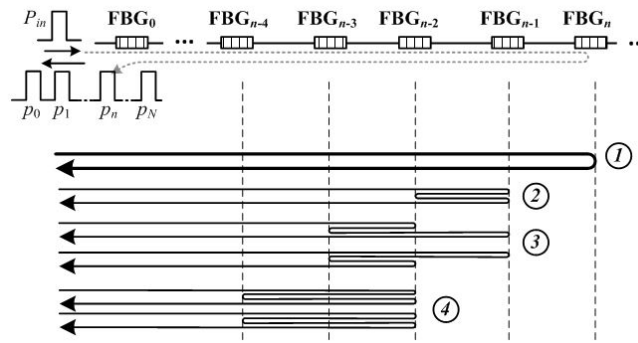


Рис. А3. Варианты (1 – 4) прохождения света через схему с ВОБР с формированием дополнительного n -го импульса на выходе

$$K_{cr} = R_{N-1}^2 R_{N-2} / [R_N(1 - R_{N-1})^2]. \quad (a4)$$

Кроме траекторий, показанных на рис. А3, можно привести и другие типы формирования дополнительного n -го импульса, за счет двукратного переотражения. В этом случае импульс отражается, например, от $(n - 2)$ -й ВОБР и еще дважды переотражается между ней и $(n - 3)$ -й ВОБР. Однако нетрудно понять, что в этом случае уровень мощности будет иметь существенное дополнительное ослабление, прежде всего за счет дополнительного умножения на два коэффициента отражения ВОБР. Поэтому мерой перекрестной связи более логично полагать коэффициент (а3).

Приложение 3

Результаты расчетов зависимостей $R(m)$

В основном тексте статьи результаты расчетов зависимостей $R(m)$ представлены графически на рис. 2 (m – номер ВОБР от конца схемы). Однако для более точного понимания и анализа этих результатов целесообразно видеть числовые значения рассчитанных коэффициентов $R(m)$. Для случая отсутствия потерь результаты расчетов $R(m)$ при трех значениях R_N представлены в таблице. Также для иллюстрации использования ВОБР с округленными коэффициентами R' , там же показан вариант $R'(m)$ с округлением до 1 %.

Таблица

Результаты расчетов зависимости коэффициентов отражения ВОБР R от номера решетки m , с округлением значений и без него

m	R , без округления			R , округление до 1%	
	$R_N = R(0) = 1$	$R_N = R(0) = 0,1$	$R_N = R(0) = 0,05$	$R_N = R(0) = 1$	$R_N = R(0) = 0,1$
18	0,0318	0,0242	0,01940	0,03	0,03
15	0,0339	0,0254	0,02018	0,03	0,03
14	0,0363	0,0268	0,02102	0,04	0,03
13	0,0391	0,0283	0,02193	0,04	0,03
12	0,0424	0,0299	0,02293	0,04	0,03
11	0,0462	0,0318	0,02402	0,05	0,03
10	0,0508	0,0339	0,02521	0,05	0,04
9	0,0564	0,0364	0,02653	0,06	0,04

Окончание таблицы

8	0,0633	0,0392	0,02800	0,06	0,04
7	0,0722	0,0424	0,02964	0,07	0,05
6	0,0839	0,0462	0,03147	0,08	0,05
5	0,0999	0,0508	0,03355	0,10	0,06
4	0,1234	0,0564	0,03592	0,12	0,06
3	0,1605	0,0634	0,03865	0,16	0,07
2	0,2278	0,0722	0,04182	0,23	0,08
1	0,3820	0,0839	0,04555	0,38	0,10
0	1,0000	0,1000	0,05000	1,00	0,03

Работа выполнена в рамках Государственного задания на проведение фундаментальных исследований (код темы FSEG-2020-0024).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Jones J.D.C.** 30 Years of the OFS conference: the origins and directions of our subject // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2014. Vol. 9157. P. 9157C2.
2. **Udd E., Spillman Jr. W.B.** (Eds.) Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists. 2nd edition. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2011. 512 p.
3. **Measures R.M.** Structural monitoring with fiber optic technology. Cambridge, Massachusetts, USA: Academic Press, 2001. 716 p.
4. **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 Aug. 2009. cp-195-00408.
5. **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.
6. **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.
7. **Kersey A.D.** Multiplexed interferometric fiber sensors // Proceedings of the 7th Optical Fiber Sensors Conference, December 2 – 6, 1990. The Institution of Radio and Electronics Engineers. Sydney, New South Wales, Australia. 1990. Pp. 313–319.
8. **Костромитин А.О., Ликумович 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.
9. **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.
10. **Ren Z., Cui K., Zhu R., Peng W., Qian J.** Efficient and compact inline interferometric fiber sensor array based on fiber Bragg grating and rectangular-pulse binary phase modulation // IEEE Sensors Journal. 2018. Vol. 18. No. 23. Pp. 9556–9561.
11. **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 30.09.2020, принята к публикации 14.10.2020.

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

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

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

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. **Jones J.D.C.**, 30 Years of the OFS conference: the origins and directions of our subject, Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering. 9157 (2014) 9157C2.
2. **Udd E., Spillman Jr W.B.** (Eds.), Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, USA, 2011.
3. **Measures R.M.**, Structural monitoring with fiber optic technology, Academic Press, Cambridge, Massachusetts, USA, 2001.
4. **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 Aug. 2009, cp-195-00408.
5. **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.
6. **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.
7. **Kersey A.D.**, Multiplexed interferometric fiber sensors, Proceedings of the 7th Optical Fiber Sensors Conference, December 2 – 6, 1990, The Institution of Radio and Electronics Engineers, Australia, Sydney, New South Wales (1990) 313–319.
8. **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.

9. **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.

10. **Ren Z., Cui K., Zhu R., et al.**, Efficient and compact inline interferometric fiber sensor array

based on fiber Bragg grating and rectangular-pulse binary phase modulation, *IEEE Sensors Journal*. 18 (23) (2018) 9556–9561.

11. **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 30.09.2020, accepted 14.10.2020.

THE AUTHORS

LIOKUMOVICH Leonid B.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation

leonid@spbstu.ru

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

SKLIAROV Philip 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