

EDN: JYKTKG

УДК 681.586.5

2.2.6

## МОДЕЛЬ ФАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ОПТИЧЕСКОГО РЕФЛЕКТОМЕТРА С ГЕТЕРОДИННЫМ ДЕТЕКТИРОВАНИЕМ

*М. В. Дашков*

ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций  
и информатики»

Российская Федерация, 443090, г. Самара, Московское шоссе, 77

**Аннотация.** Статья посвящена разработке математической модели фазочувствительного оптического рефлектометра с гетеродинным приемом. Модель включает формирование потока обратного рассеяния с учетом амплитудных и фазовых характеристик при зондировании импульсным сигналом при использовании источника излучения с заданными спектральными характеристиками, учет влияния на характеристики сигнала обратного рассеяния внешнего локального воздействия на оптическое волокно, моделирование приемного устройства с демодуляцией фазы на основе гетеродинного детектирования. Приведены результаты апробации модели на основе сравнения с данными коммерческого фазочувствительного оптического рефлектометра.

**Ключевые слова:** фазочувствительный оптический рефлектометр, оптическое волокно, рэлеевское рассеяние, гетеродинное детектирование, фаза, виброакустическое воздействие.

### Введение

В настоящее время фазочувствительные оптические рефлектометры (ФОР), благодаря высокой чувствительности к микродеформациям и вибрациям оптического волокна (ОВ), нашли широкое применение в различных отраслях. Среди основных направлений применения можно выделить: акустический мониторинг протяженных инфраструктурных объектов (обнаружение и локализация утечек трубопроводов; предотвращение врезок; мониторинг состояния высоковольтных кабелей и линий электропередач; мониторинг железнодорожных путей; контроль состояния мостов, плотин, тоннелей; контроль телекоммуникационной инфраструктуры); системы охраны периметра для объектов критической инфраструктуры; геофизические и сейсмические исследования; нефтегазовая отрасль и добыча полезных ископаемых (скважинная шумометрия, вертикальное сейсмическое профилирование); мониторинг автодорожной ситуации [1].

Принцип работы ФОР основан на высокоточном измерении фазы обратно рассеянного рэлеевского излучения в ОВ. При этом стандартное ОВ становится распределенным виброакустическим датчиком, способным регистрировать внешние воздействия с высоким пространственным разрешением на участках протяженностью нескольких десятков километров, в том числе в режиме реального времени.

Существует несколько вариантов реализации ФОР, которые можно разделить на два класса: основанные на прямом детектировании и на когерентном детектировании. В случае прямого детектирования демодуляция фазы осуществляется в оптической области, для чего могут применяться двухимпульсные или интерферометрические схемы. При когерентном детектировании демодуляция фазы производится в электрической области или в результате цифровой обработки. В этом случае возможны реализации на основе гетеродинного или гомодинного детектирования. В силу ряда преимуществ реализация на основе гетеродинной схемы получили распространение в коммерческих приборах.

Данная статья посвящена разработке комплексной математической модели ФОР с гетеродинным детектированием, позволяющая учитывать влияние параметров основных модулей на характеристики детектируемого сигнала. Модель может быть использована при определении особенностей регистрируемых откликов на воздействия, а также применяться для оптимизации конфигурации ФОР под специализированные задачи.

### Общая структура разрабатываемой модели

В данной работе рассматривается реализация когерентного ФОР на основе гетеродинного детектирования, изображенная на рис. 1.

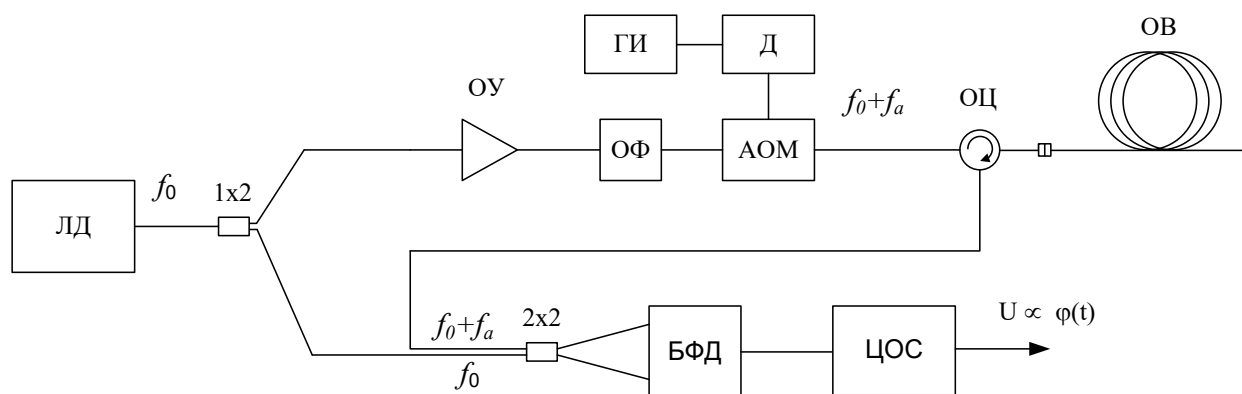


Рис. 1. Структурная схема фазочувствительного оптического рефлектометра на основе гетеродинного детектирования

Излучение узкополосного лазерного диода (ЛД) с частотой  $f_0$  поступает на оптический разветвитель 1x2 и разделяется на два потока. Первый поток поступает непосредственно на один из входов приемного модуля. Второй поток поступает на вход модуля формирования зондирующего сигнала. Излучение предварительно усиливается в оптическом усилителе (ОУ). Через полосовой оптический фильтр (ОФ), ограничивающий широкополосные шумы усиленного спонтанного излучения, излучение поступает на акустооптический модулятор (АОМ). Генератор импульсов (ГИ) формирует последовательность импульсов с заданной длительностью и частотой следования, которая поступает на драйвер АОМ, где преобразуется в поток радиоимпульсов с несущей частотой  $f_a$ . Значение будет определяться конструкцией АОМ и обычно составляет 40-100 МГц. На выходе АОМ формируется последовательность оптических импульсов с заданной длительностью и частотой следования, при этом оптическая частота приобретает сдвиг на величину  $f_a$ .

Через оптический циркулятор (ОЦ) зондирующий сигнал поступает в ОВ, выполняющего роль распределенного чувствительного элемента. В результате явления рэлеевского рассеяния формируется обратный поток. При внешнем воздействии на ОВ происходит локальное изменение фазы оптического излучения. Поток обратного рэлеевского рассеяния через ОЦ поступает на второй вход приемного модуля.

В приемном модуле реализован принцип когерентного приема: излучение опорного сигнала от ЛД и сигнала обратного потока, несущего информацию об изменениях фазы оптического излучения, объединяются. С выходов разветвителя сигналы поступают на входы балансного фотодетектора (БФД), где в результате формируется сигнал на разностной частоте, равной  $f_a$ .

В блоке цифровой обработки сигнала производится детектирование разности фаз опорного излучения и сигнала обратного рассеяния, поступающего с ОВ.

Разрабатываемая комплексная математическая модель сигнала ФОР описывает следующие этапы: формирование потока обратного рассеяния с учетом амплитудных и фазовых характеристик при зондировании импульсным сигналом с использованием источника излучения с заданными спектральными характеристиками; моделирование влияния на характеристики сигнала обратного рассеяния внешнего локального воздействия на ОВ; моделирование приемного устройства с демодуляцией изменения оптической фазы излучения обратного рассеяния на основе гетеродинного детектирования.

### Математическая модель

Общий принцип работы ФОР основан на регистрации сигнала обратного рэлеевского рассеяния, возникающего на микроскопических неоднородностях – флуктуациях показателя преломления [2], и последующего детектировании фазы. В отличие от стандартных телекоммуникационных рефлектометров в ФОР используются узкополосные лазерные диоды, у которых время когерентности значительно выше длительности зондирующих импульсов. При этом потоки рассеянного излучения с различных точек ОВ в пределах эффективной длины импульса будут интерферировать с вариацией интенсивности в соответствии со случайным характером разности фаз [3]. В результате для амплитудных характеристик обратного рассеяния по длине ОВ будут характерны резкие случайные вариации со значительной контрастностью. Вариации фазы обратного потока по длине ОВ также будут иметь случайный характер.

Для описания сигнала ФОР часто используются модели, основанные на случайном расположении центров рассеяния по длине ОВ [4, 5, 6]. При этом скопление микроскопических неоднородностей заменяется одним условным центром рассеяния (ЦР) на небольшом участке ОВ. Для этого вся длина ОВ разбивается на элементарные сегменты  $dz$  достаточно малой протяженности при соблюдении условия  $dz \ll L_W$ , где  $L_W$  эквивалентная ширина зондирующего импульса, определяемая по формуле:

$$L_W = \frac{c}{n_g} \frac{\tau_u}{2}, \quad (1)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме;  $n_g$  – эффективный групповой показатель преломления моды в ОВ;  $\tau_u$  – длительность зондирующего импульса.

Для того чтобы смоделировать хаотичное распределение «вмороженных» неоднородностей в реальном волокне, положения центров рассеяния в пределах этих элементарных сегментов задается случайным образом. Тогда выражение, описывающее положение  $k$ -го центра рассеяния, можно записать в виде

$$z_k = (k-1) \cdot dz + U(0,1) \cdot dz, \quad (2)$$

где  $dz$  – длина элементарного сегмента ОВ;  $U(0,1)$  – случайное значение от 0 до 1, полученное с помощью генератора случайных чисел с равномерным законом распределения.

Электрическое поле потока обратного рассеяния, соответствующее определенной координате ОВ, будет описываться суммой электрических полей от всех центров рассеяния в пределах эффективного участка зондирующего импульса.

Запишем значение напряженности электрического поля (ЭП) оптического излучения обратного потока, возвращающегося к началу ОВ с  $k$ -го элементарного участка, в дискретном виде

$$dE_{op,k} = E_0 \cdot r_k \cdot \exp\left(j \frac{4\pi}{\lambda} \sum_{m=1}^k n_m \cdot (z_m - (m-1) \cdot dz)\right) \cdot \exp(-2\alpha z_k), \quad (3)$$

где  $E_0$  - напряженность ЭП на входе ОВ;  $r_k$  - коэффициент обратного рассеяния в  $k$ -й точке ОВ;  $n_m$  - локальное значение показателя преломления;  $\lambda$  - длина волны;  $\alpha$  - коэффициент затухания ОВ.

Коэффициент обратного рассеяния, определяющий долю обратно-рассеянного излучения, можно выразить как произведение коэффициента затухания рэлеевского рассеяния и коэффициент захвата волноводной структурой [2]. В общем случае, в работе [5] указывалось, что значения данных коэффициентов могут быть описаны как независимые случайные величины с равномерными распределениями.

Сигнал обратного рассеяния, формируемый при зондировании импульсом конечной длительности, можно представить в виде суммы элементарных потоков с участка ОВ протяженностью  $L_W$ . При этом в процессе распространения импульса по ОВ его действие можно представить в виде операции свертки. Для обеспечения эффективности вычисления при моделировании процесс расчета свертки выполняется в спектральной области.

$$E_{op}(z) = dE_{op} \otimes W = F^{-1} \left\{ F \{ dE_{op} \} * F \{ W \} \right\}, \quad (4)$$

где  $W$  - функция формы зондирующего импульса;  $F$  и  $F^{-1}$  - оператор прямого и обратного Фурье-преобразования, соответственно.

На отклик ФОР также оказывает влияние ширина спектра источника излучения, так как для каждой спектральной компоненты будут наблюдаться различные условия интерференции, что приведет как к изменению контрастности вариаций интенсивности, так и фазовых соотношений. Типовая ширина спектра узкополосных ЛД, используемых в ФОР, составляет от единиц до десятков килогерц, однако при этом требуется учитывать также уширение спектра при амплитудной модуляции. Оценку ширины спектра зондирующего сигнала будем производить на основании преобразования Фурье и в результате получим

$$\Delta f \approx K / T_{0.5}, \quad (5)$$

где  $T_{0.5}$  - полная ширина импульса по уровню половины амплитуды;  $K$  - коэффициент, зависящий от формы импульса (для прямоугольного импульса  $K = 0.886$ , для гауссового импульса  $K = 0.44$ , для супер-гауссового импульса  $K = (0.265 + 0.62(1 - 1/m)) \cdot 2 \cdot \ln(2)$ ).

Аналогично работе [6] оптический спектр зондирующего импульса будем моделировать набором дискретных спектральных компонент с заданным интервалом. При этом интервал должен быть достаточно мал, чтобы обеспечить условие когерентности при интерференции - длина когерентности спектральной компоненты должна быть много больше пространственной длины импульса  $L'_C \gg L_W$ , тогда требуемое количество индивидуальных частот  $N$  будет определяться выражением

$$N = \frac{M \cdot L_W \cdot n \cdot \Delta f}{c}, \quad (6)$$

где  $\Delta f$  - ширина спектра;  $c$  - скорость света в вакууме;  $n$  - показатель преломления;  $M$  - коэффициент, определяющий степень дискретизации спектра и выбираемый в пределах от 20 до 100.

В результате для каждой спектральной компоненты отдельно выполняется моделирование в соответствии с приведенным ранее алгоритмом и производится суммирование результатов.

Любое внешнее виброакустическое воздействие (вибрация, звуковые волны, ударные воздействия), прикладываемое к ОВ, будет приводить к изменению фазы распространяющегося оптического излучения вследствие двух основных физических механизмов влияния: изменения геометрической длины участка ОВ и изменения показателя преломления материала ОВ в результате фотоупругого эффекта. Результирующее изменение фазы будет определяться выражением [6]

$$\Delta\varphi = \beta \cdot \varepsilon \cdot l \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{2} n_{эфф}^2 [(1 - \mu)p_{12} - \mu \cdot p_{11}] \right\}, \quad (7)$$

где  $\beta$  - постоянная распространения моды излучения в ОВ;  $\varepsilon$  - деформация участка ОВ (относительное изменение длины);  $l$  - длина участка ОВ, подверженного деформации;  $n_{эфф}$  - эффективный показатель преломления;  $p_{11}$ ,  $p_{12}$  - фотоупругие коэффициенты;  $\mu$  - коэффициент Пуассона.

Для кварцевого ОВ, подставляя типовые значения параметров, получим  $\Delta\varphi \approx \beta \cdot \varepsilon \cdot l \cdot 0.78$ .

В данной модели будем полагать, что при деформации ОВ локальные коэффициенты обратного рассеяния остаются постоянными, а изменяется только расположение ЦР в пределах элементарного сегмента  $dz$  в соответствии с параметрами внешнего воздействия. Тогда значения координат для ЦР на участке, подверженном влиянию, будут определяться как

$$z'_k(t) = z_k + \varepsilon(t) \cdot dz, \quad (8)$$

где  $\varepsilon(t)$  - величина деформации, определяемая параметрами и законом изменения воздействующего сигнала.

Сделанное предположение корректно при условии, что удлинение ОВ значительно меньше длины интервала рассеяния  $dz$ , поэтому на начальном этапе при формировании массива координат ЦР по формуле (2) целесообразно заложить запас на деформацию, ограничив, например, предельные значения закона распределения.

В результате на основе приведенных выше выражений формируется набор характеристик сигнала обратного рассеяния, представляющий собой массив, где каждая строка соответствует временным зависимостям характеристики обратного рассеяния от времени  $E_{op}(z_k, t)$  для определенной координаты ОВ.

При смешении излучений опорного и принимаемого сигналов на выходе фотоприемного устройства формируется сигнал биений на промежуточной частоте (ПЧ), равной разности несущих частот, в котором сохраняется полная информация об амплитуде и фазе

анализируемого сигнала. Учитывая схему включения фотодиодов в БФД, при которой происходит вычитание фототоков, для силы тока на выходе БФД можно записать [7]

$$i_{БФД}(t) = 2R\sqrt{P_s(t)P_{lo}} \cos(\omega_{IF}t + \varphi_s(t) + \varphi_{sn}(t) - \varphi_{lo}(t)), \quad (9)$$

где  $R$  - чувствительность фотодиода;  $P_s(t)$ ,  $P_{lo}$  - мощности детектируемого сигнала и сигнала опорного осциллятора, соответственно;  $\omega_{IF}$  - промежуточная частота;  $\varphi_s(t)$  - фаза, содержащая информацию о виброакустическом воздействии;  $\varphi_{sn}(t)$  - фазовый шум сигнала;  $\varphi_{lo}(t)$  - шум опорного осциллятора.

В данной модели для формирования сигнала на выходе БФД принимаем  $\omega_{IF} = 2\pi f_a$ , а  $P_s(t)$  и  $\varphi_s(t)$  определяются как модуль и аргумент значений смоделированного массива  $E_{op}(z, t)$ , соответственно.

Фазовый шум опорного осциллятора является важнейшим источником шумов в ФОР [8]. Моделирование фазового шума  $\varphi_{lo}(t)$  может быть реализовано во временной области на основе Винеровского процесса [9] и в конечном итоге может быть использовано описание случайной величиной, подчиняющейся нормальному закону распределения вида

$$f(\Delta\varphi) = \frac{1}{2\pi\sqrt{\Delta f \cdot \Delta t}} \exp\left(-\frac{\Delta\varphi^2}{4\pi\Delta f \cdot \Delta t}\right), \quad (10)$$

где  $\Delta\varphi$  - изменение фазы между двумя соседними интервалами времени;  $\Delta t$  - шаг дискретизации по времени;  $\Delta f$  - ширина спектра излучения.

В процессе моделирования данный шум генерируется в зависимости от параметров источника излучения и аддитивно добавляется к полезному сигналу.

Для демодуляции фазы далее могут быть использованы различные методы, например, квадратурное синхронное детектирование или метод на основе преобразования Гильберта [10]. Реализация данных методов преимущественно производится в цифровом виде.

В данной работе моделируется цифровое квадратурное синхронное детектирование. После выделения ПЧ из выходного сигнала БФП и детектирования фазы как функции расстояния (временной масштаб при этом соответствует скорости распространения излучения в ОВ) производится дифференцирование фазы через интервал, называемый измерительной длиной. При этом измерительная длина определяет эффективное пространственное разрешение прибора при локализации воздействий.

Обязательным этапом далее является процедура развертки фазы, так как в силу интерферометрической природы отклик величины фазы на воздействие является периодической функцией и любому значению детектируемой фазы может соответствовать бесконечное число возможных значений воздействующего параметра. Для решения данной задачи широко применяется алгоритм, представленный в работе [11].

В результате, выполняя данные операции для каждой реализации зондирующего импульса, получается динамическая картина изменения фазы, пропорционально внешним воздействиям.

### Апробация модели

Для апробации разработанной модели были проведены измерения с использованием коммерческой системы виброакустического мониторинга (СВАМ), реализованной на основе когерентного ФОР с гетеродинным приемом. Предварительно были определены технические характеристики оборудования: центральная длина волны 1550,14 нм; ширина спектра излучения не более 100 кГц; длительность зондирующего импульса 50 нс; частота следования импульсов от 1 до 20 кГц (определяется частотой опроса); максимальная протяженность ОВ 20 км; измерительная база от 5 до 80 м; интервал между отсчетами рефлектограммы 1.25 м; пиковая мощность импульса до 100 мВт.

Первый этап измерений производился на макете №1, представляющем собой катушку ОВ рек. МСЭ-Т G.652.D, протяженностью 23 км. Для исключения возможности наложения реализаций от различных импульсов была установлена частота опроса 5 кГц, обеспечивающая максимальную регистрируемую частоту 2.5 кГц и максимальную протяженность тестируемого ОВ без перекрытия до 40 км.

Моделирование производилось для аналогичных условий, при этом в модели задавались следующие исходные данные: размер элементарного участка  $dz = 5$  мм, что соответствовало 1000 участкам в пределах интервала, занимаемого импульсом длительностью 50 нс ( $L_W = 5$  м); шаг дискретизации по расстоянию 1.25 м; измерительная длина 5 м; зондирующий импульс супергауссовой формы с коэффициентом 8.

На рис. 2 представлены вариации мощности сигнала обратного рассеяния по длине ОВ, полученные экспериментально и численным моделированием.

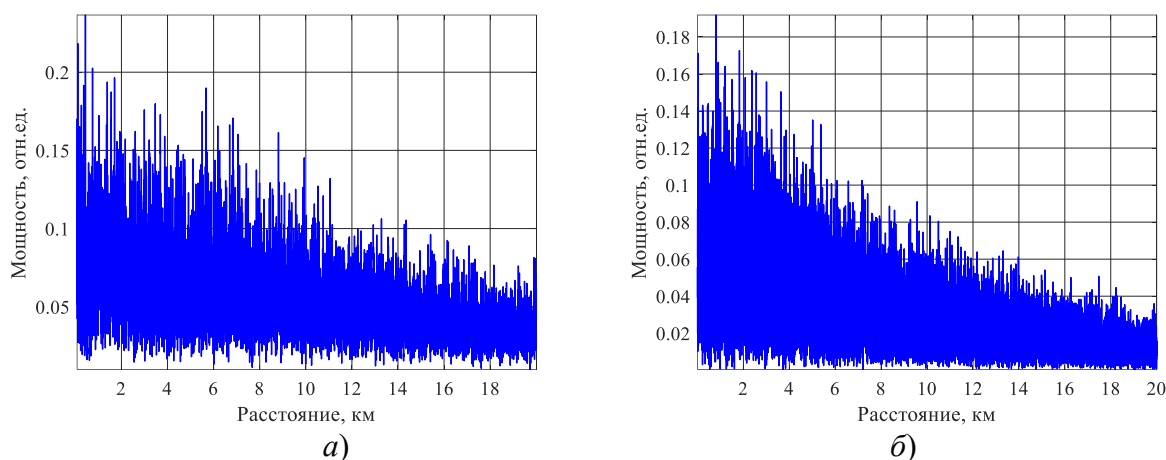


Рис. 2. Распределение мощности сигнала обратного рассеяния ФОР по длине ОВ: а) результаты экспериментального измерения на макете; б) результаты моделирования

При этом отмечаются схожие особенности: сильная изрезанность характеристик вследствие когерентного сложения составляющих рэлеевского рассеяния; случайный характер вариаций; размах вариаций с ростом длины уменьшается из-за затухания.

Для сравнения статистических характеристик вариации уровня сигнала анализ производился для участков протяженностью 1 км в разных точках рефлектограммы, чтобы затухание ОВ не оказывало влияния на результат. На рис. 3 представлен пример гистограмм распределения для участка в диапазоне 9-10 км.

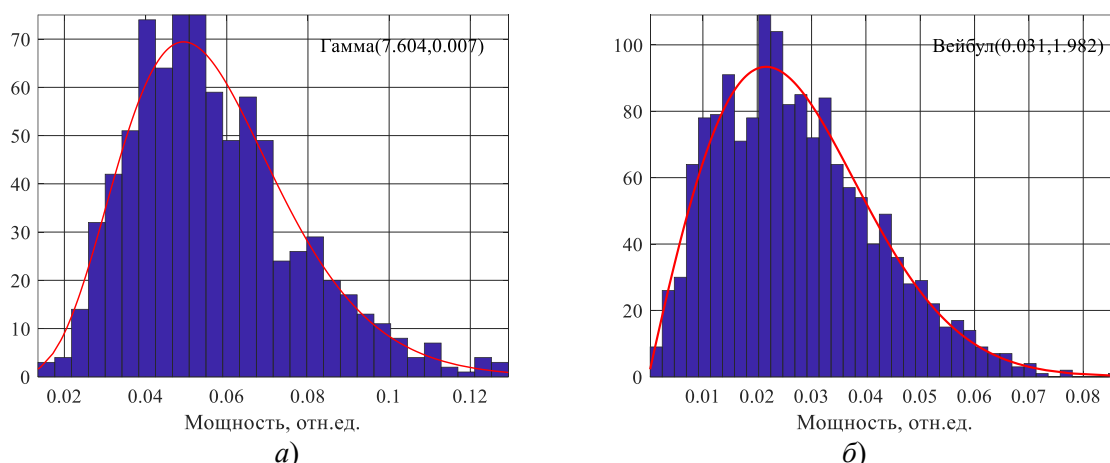


Рис. 3. Гистограммы мощности сигнала обратного рассеяния для отдельных участков ОВ: а) результаты экспериментального измерения на макете; б) результаты моделирования

В результате оценки по критерию Пирсона было определено, что для описания распределения уровней сигнала в случае экспериментального измерения может быть использовано Гамма-распределение, в то время как для результатов моделирования наиболее подходящим оказался закон распределения Вейбулла. Несмотря на данное расхождение зависимости распределений в целом имеют схожий характер.

Коммерческий ФОР выдает информацию только о динамике изменения фазы, поэтому сравнить статистику вариации фазы оптического сигнала по длине ОВ не представлялось возможным.

Для определения нелинейности передаточной функции ФОР были произведены экспериментальные измерения на макете № 2, состоящем из двух катушек ОВ, между которыми был вставлен участок ОВ длиной 6 метров, из которого 15 витков были намотаны на пьезокерамическую трубку (ПКТ) диаметром 40 мм. Для осуществления деформации ОВ к ПКТ подключался генератор сигналов (ГС), формирующий синусоидальный сигнал с заданной частотой и амплитудой. Данные ФОР сохранялись на персональном компьютере (ПК) и далее обрабатывались в специально разработанном программном обеспечении. Предварительно были откалиброваны зависимости амплитуды сигнала, выдаваемого коммерческим ФОР, от величины детектируемого изменения фазы. Параметры измерения и моделирования были аналогичными предыдущему эксперименту.

На рис. 4 представлена схема экспериментальной установки.

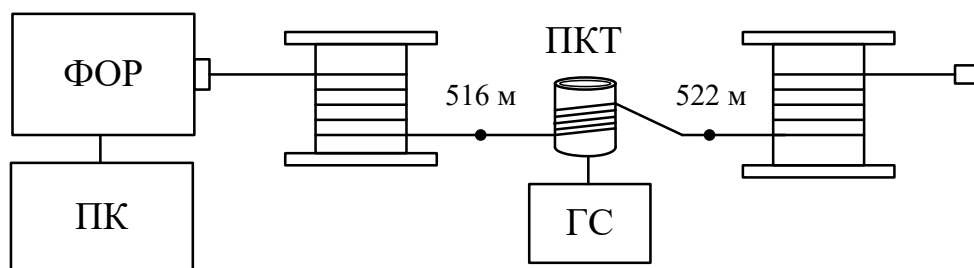


Рис. 4. Схема экспериментальной установки на макете №2

Для определения нелинейности передаточной характеристики производился спектральный анализ откликов ФОР и рассчитывались коэффициенты гармоник



$$K_{iГ} = \frac{A_{iГ}}{A_1} \cdot 100\%, \quad (11)$$

где  $A_{iГ}$  - амплитуда  $i$ -ой гармоники;  $A_1$  - амплитуда первой гармоники (основного тона).

На рис. 5 и 6 представлены результаты экспериментального исследования и численного моделирования, соответственно.

В результате эксперимента был отмечен рост уровня и количества гармоник по мере увеличения степени деформации ОВ, а соответственно, и набега фазы. При этом спектральные характеристики, полученные при увеличении управляющего напряжения с фиксированным количеством витков на ПКТ, и, полученные при увеличении количества витков с фиксированным напряжением, носили схожий характер.

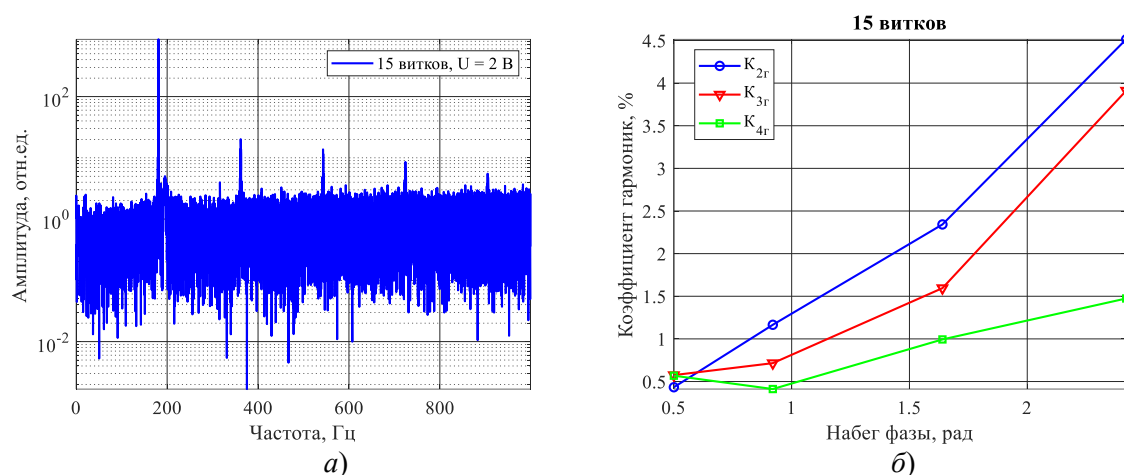


Рис. 5. Экспериментальные результаты анализа коэффициента гармоник: а) пример спектра отклика; б) зависимость коэффициента гармоник от величины набега фазы

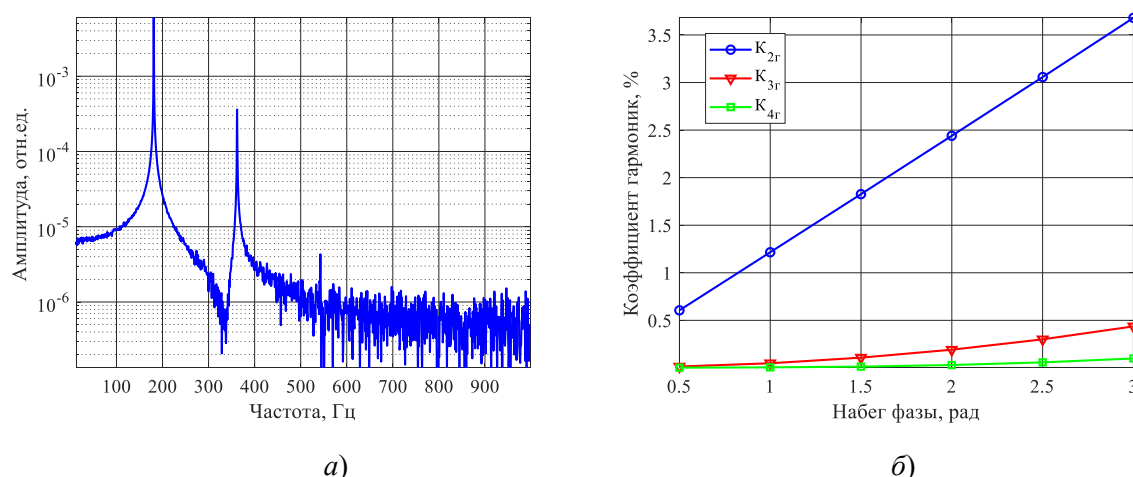


Рис. 6. Результаты моделирования: а) пример спектра отклика; б) зависимость коэффициента гармоник от величины набега фазы

Результаты, полученные численным моделированием, также демонстрируют наличие высших гармоник в спектре. Однако если для второй гармоники результаты сопоставимы, то гармоники 3го и более высоких порядков существенно ниже.

Предположительно это может быть связано с более выраженной нелинейностью характеристики реального ФОР и тем, что детектируемое значение фазы по факту определяется не только набегом фазы, наведенным на участке, подверженном влиянию, но и вкладом случайных вариаций собственных фаз центров рассеяния на границах измерительной длины [1].

### Заключение

Разработанная модель ФОР с гетеродинным детектированием в целом соответствует поведению физического прибора и может быть использована для разработки алгоритмов анализа сигналов ФОР, а также на этапе проектирования для формулирования требований к компонентной базе.

Дальнейшее развитие модели требует включения учета случайных вариаций состояния поляризации и применения в схеме ФОР техники разнесения по поляризации, а также вклада помех от относительно сильных локальных воздействий [12].

### Благодарность

Исследование выполнено за счет средств федерального бюджета, учредитель - Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций.

### Список литературы

1. Hartog A.H. An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors. CRC Press: Taylor and Francis Group. 2017. 472 p.
2. Nakazawa M. Rayleigh backscattering theory for single-mode optical fibers // Journal of the Optical Society of America. – 1983. – V. 73. – P. 1175-1180.
3. Shatalin S.V., Treschikov V.N., Rogers A.J. interferometric optical time-domain reflectometry for distributed optical-fiber sensing // Applied optics. – 1998. – V. 37. – Is. 24. – P. 5600-5604.
4. Тозони О., Аксенов С. Б., Подивилов Е.В., Бабин С.А. Модель волоконного фазочувствительного рефлектометра и ее сравнение с экспериментом // Квантовая электроника. – 2010. – Т. 40. – № 10. – С. 887–892.
5. Liokumovich, L. B. et al. Fundamentals of optical fiber sensing schemes based on coherent optical time domain reflectometry: Signal model under static fiber conditions // Journal of Lightwave Technology. – 2015. – V. 33. – № 17. – P. 3660–3671.
6. Masoudi A., Trevor P. Newson Analysis of distributed optical fibre acoustic sensors through numerical modelling // Optics Express. – 2017. – V. 25, - P. 32021-32040.
7. Kikuchi K. Fundamentals of Coherent Optical Fiber Communications // Journal of Lightwave Technology. – 2016. – V. 34. – № 1. – P. 157-179.
8. Фомиряков Э.А., Бенгальский Д.М., Харасов Д.Р., Наний О.Е., Никитин С.П., Трещиков В.Н. Влияние фазовых шумов лазера на работу когерентного рефлектометра при использовании волокон с массивами искусственных отражателей// Автометрия. – 2023. – Т. 59. – № 1. – С. 87-11.
9. Magarini M. et al. Empirical modeling and simulation of phase noise in long-haul coherent optical transmission systems // Optic Express. – 2011. – V. 19. – P. 22455-22461
10. Du S. et al. Hardware-Efficient Phase Demodulation for Digital  $\phi$ -OTDR Receivers with Baseband and Analytic Signal Processing// Sensors. – 2025. – V. 25. – № 10. – P. 3218.
11. Itoh K. Analysis of the phase unwrapping algorithm//Applied Optics, 1982, 21, -p. 2470-2470.

12. Бенгальский Д.М., Харасов Д.Р., Фомиряков Э.А., Никитин С.П., Наний О.Е., Трещиков В.Н. Работа когерентного рефлектометра в условиях сильного локального воздействия на волокно // Квантовая электроника. – 2021. – Т. 51. – № 2. – С. 175-183.

## MODEL OF A PHASE-SENSITIVE OPTICAL REFLECTOMETER WITH HETERODYNE DETECTION

*M.V. Dashkov*

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics,  
Samara, Moskovskoe shosse, 77, 443090, Russia

**Absrtact.** The article is devoted to the development of a mathematical model for a phase-sensitive optical reflectometer with heterodyne reception. The model encompasses the formation of the backscatter signal, taking into account amplitude and phase characteristics during probing with a pulse signal using a laser source with specified spectral properties, the consideration of the influence of external local impact on the optical fiber on the backscatter signal characteristics, and the modeling of the receiving device with phase demodulation based on heterodyne detection. The results of testing the model by comparing it with data from a commercial phase-sensitive optical reflectometer are presented.

**Keywords:** phase-sensitive optical time-domain reflectometer, optical fiber, Rayleigh scattering, heterodyne detection, phase, vibro-acoustic disturbance

Статья представлена в редакцию 12 декабря 2025 г.