

P86691338EA

СПЕЦИАЛЬНО РАЗРАБОТАННОЕ РАСПРЕДЕЛЕННОЕ УСИЛЕНИЕ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ВОЛОКОННЫХ ЛИНИЙ

Эйтан РОУЭН (Eitan ROWEN) и Эран ИНБАР (Eran INBAR)

5 ПЕРЕКРЕСТНАЯ ССЫЛКА

Данная заявка испрашивает приоритет на основании заявки на патент Израиля №254803, поданной 29 сентября 2017 г.

ОБЛАСТЬ РАСКРЫВАЕМОГО ТЕХНИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ

10 Раскрываемое техническое решение в целом относится к оптико-волоконным сенсорным системам большой дальности, а также, в частности, к способам и системам для увеличения зоны действия оптико-волоконных сенсорных систем без внешнего усиления.

ПРЕДПОСЫЛКИ РАСКРЫВАЕМОГО ТЕХНИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ

15 В настоящее время многие отрасли промышленности используют оптико-волоконные датчики (в данном документе сокращенно обозначено FOS) для случаев практического применения, которые требуют осуществления измерений на больших расстояниях. Указанное включает в себя распределенные системы измерения акустических волн, системы измерения температуры, системы обнаружения утечек, системы для контроля конструктивной устойчивости мостов, зданий, железных дорог и тому подобное.

20 Случаи практического применения измерений на больших расстояниях с использованием оптико-волоконных датчиков могут включать в себя сенсорные системы трубопроводов для определения точного месторасположения утечек в трубопроводах, транспортирующих жидкости и газы, такие как бензин и вода, а также пограничные системы обнаружения для обнаружения вторжений через границу.

25 В оптико-волоконных сенсорных системах используют оптико-волоконные кабели (также известные как, и которые называются оптическими волокнами или измерительными волокнами) для передачи на большие расстояния информации от

датчиков, расположенных вдоль оптико-волоконных кабелей. Датчики могут представлять собой точечные датчики, волоконные брэгговские решетки (в данном документе сокращенно обозначено FBG) и т.п. Переносимая информация по существу является светом и характеристики связаны со светом, который предоставляется процессору для обработки информации. Различия в характеристиках света, который достигает процессора, такие как амплитуды отражения FBG или сдвиги резонансной частоты, могут использоваться, например, для измерения температуры или механического напряжения. В других оптико-волоконных сенсорных системах вместо измерения света от дискретных датчиков информация переносится с помощью интенсивности рассеяния, резонансов или интерферограмм света, рассеянного по всей длине оптического волокна. В этом смысле оптико-волоконная сенсорная система представляет собой распределенную сенсорную систему. В таком типе сенсорной системы все оптическое волокно может служить в качестве непрерывной матрицы датчиков или распределенного оптико-волоконного датчика (в данном документе сокращенно обозначено DFOS). Для получения светового сигнала, характеристики которого можно определить с целью осуществления измерений, в системах DFOS могут использоваться различные известные физические явления рассеяния, такие как рэлеевское рассеяние, рамановское рассеяние и бриллюэновское рассеяние. Например, по линии измерительного волокна может быть сгенерирована карта возмущений или фазовых изменений в рэлеевской диаграмме обратного рассеяния, и использована для обнаружения утечки газа в трубе, нарушителя, наличия пожара в туннеле и тому подобного. В качестве альтернативы, по изменениям в одном из вышеупомянутых явлений рассеяния по линии измерительного волокна может быть определен физический параметр (такой как температура, деформация, давление и тому подобное). С помощью измерения сдвига частоты резонанса бриллюэновского рассеяния либо прямо-рассеянного или обратно-рассеянного света, либо путем измерения по линии измерительного волокна относительных амплитуд рамановского рассеяния по линии измерительного волокна может быть сгенерирована карта температуры. В системах DFOS принятый сигнал должен быть соотнесен с месторасположением события рассеяния в измерительном волокне, что позволяет определять месторасположение по линии измерительного волокна. Это можно сделать с помощью зондирующих импульсов и анализа рассеянного сигнала во временной области. В случае обратно-рассеянных сигналов этот способ известен как оптическая рефлектометрия во

временной области (в данном документе сокращенно обозначено как OTDR). В тех случаях, когда анализируют прямо-рассеянный сигнал, этот способ называется оптическим анализом во временной области (в данном документе сокращенно обозначено как OTDA). Альтернативный способ корреляции сигнала с месторасположением в измерительном волокне состоит в распространении лазерного сигнала и анализе измеренного сигнал в частотной области, как это делается, например, в способе, называемом оптической рефлектометрией в частотной области (в данном документе сокращенно обозначено обозначается как OFDR).

Оптико-волоконные сенсорные системы, в которых анализируют прямо-рассеянный сигнал, такие как OTDA, должны обеспечивать доступ к измерительному волокну на обоих концах, обеспечивая либо геометрию петли, либо наличие двух отдельных центров управления на обоих концах волокна, каждый из которых требует электричества и обмена информацией между ними. Примером такой сенсорной системы является бриллюэновская система OTDA (в данном документе сокращенно обозначено BOTDA). Оптико-волоконные сенсорные системы, в которых измеряют обратно-рассеянный сигналы, могут быть спроектированы таким образом, чтобы системе требовался доступ только к одному концу измерительного волокна, при этом зондирующий импульс или луч света передается и принимается одновременно из первого центра управления. Эти типы систем полезны в условиях, когда второй конец оптического волокна либо недоступен, либо труднодоступен. Примеры таких условий включают в себя трубопроводы, системы глубокого бурения, границы и дороги, в которых невозможно, проблематично или дорого обеспечить необходимую инфраструктуру (такую как системы электроснабжения и обмена информацией) на втором конце оптического волокна. Также отмечается, что в таких конфигурациях расстояние между центрами управления, которые требуют электричества, и системами обмена информацией могут быть в два раза больше длины измерительного волокна при условии, что доступ к обоим концам оптического волокна не требуется.

Практическая длина измерительного волокна ограничена слабыми обратно-рассеянными и/или прямо-рассеянными сигналами, а также ослаблением зондирующего света или импульса и затуханием рассеянных сигналов. Соотношение сигнал/шум (в данном документе сокращенно обозначено SNR) воспринимаемого рассеянного сигнала должно быть достаточно высоким, чтобы отличить

воспринимаемый сигнал от шума в сигнале. Для достаточно слабых сигналов дробовой шум является доминирующим источником шума, вызывающим снижение SNR с измеренной мощностью. Типичные опτικο-волоконные сенсорные системы могут подавать сигналы на расстояние до 20-50 километров, прежде чем затухание станет достаточно значительным, чтобы затруднить обнаружение сигнала. Одним из решений для увеличения длины обнаружения такой опτικο-волоконной сенсорной системы было бы размещение оптического усилителя каждые 40-50 километров таким образом, чтобы сигнал мог преодолевать расстояния в сотни километров, если это необходимо. Однако такое решение имеет ограничения. Для этого требуется доступ к измерительному волокну, которое может быть скрыто под землей, например, в случае подземного трубопровода или системы обнаружения нарушения границы. Кроме того, для этого требуется инфраструктура электричества и обмена информацией на каждом участке усиления. Кроме того, эти сайты могут нуждаться в защите от взлома и/или саботажа, что увеличивает затраты на обслуживание такой системы. Для многих условий стоимость настройки и обслуживания такого набора усилителей делает это решение непрактичным.

Еще одно решение для увеличения досягаемости системы FOS состояло бы в том, чтобы просто послать начальный зондирующий импульс или луч света с более высокой мощностью. Однако нелинейные эффекты и явления, такие как вынужденное рамановское рассеяние (в данном документе сокращенно обозначено SRS), вынужденное бриллюэновское рассеяние (в данном документе сокращенно обозначено SBS) и нестабильность модуляции (в данном документе сокращенно обозначено MI), ограничивают мощность зондирующего импульса или светового сигнала диапазоном от единиц милливатт до сотен милливатт в зависимости от случая практического применения и конфигурации системы FOS. Значения мощности выше этого диапазона приводят к нелинейным эффектам в измерительном волокне, тем самым не допуская точное обнаружение любых рассеянных сигналов. Диапазон мощности, выше которого начинают возникать нелинейные эффекты и явления, в данном документе называется нелинейным порогом.

Рассмотрим теперь Фигуру 1, которая является схематической иллюстрацией опτικο-волоконной сенсорной системы без дополнительного усиления, в общем обозначенную ссылочным номером 10, которая известна в данной области техники. Опτικο-

волоконная сенсорная система 10 представляет собой фазовую OTDR-систему, использующую прямое обнаружение обратно-рассеянного света от измерительного волокна, когда конец волокна недоступен для электроники или оптической накачки. Оптико-волоконная сенсорная система 10 включает в себя блок 26 формирования запросов, который соединен с измерительным оптическим волокном 22 (также называемым измерительным волокном, оптическим волокном или просто волокном). Блок 26 формирования запросов включает в себя зондирующий лазер 12 с узкой шириной линии, модулятор 14, циркулятор 16, детектор 18 и процессор 20. Модулятор 14 соединен с зондирующим лазером 12 и циркулятором 16. Детектор 18 соединен с процессором 20 и оптически соединен с циркулятором 16 для приема и обнаружения света, поступающего от циркулятора 16. Оптическое волокно 22 связано с циркулятором 16 и имеет конечную точку 24. Для простоты изложения опущены какие-либо каскады усиления, которые могут использоваться в оптико-волоконной измерительной системе 10 либо для усиления зондирующего света, генерируемого где-либо между зондирующим лазером 12 и измерительным оптическим волокном 22, либо для усиления обратно-рассеянного света в любом месте между измерительным оптическим волокном 22 и детектором 18.

Зондирующий лазер 12 обеспечивает зондирующий свет, который модулируется с помощью модулятора 14 для создания зондирующего импульса. Зондирующий импульс отправляется в циркулятор 16, который отправляет зондирующий импульс по длине оптического волокна 22. По мере того как зондирующий импульс проходит по оптическому волокну 22, он становится частично обратно-рассеянным в направлении циркулятора 16. Обратно-рассеянный свет отделяется от зондирующего импульса с помощью циркулятора 16, который может быть оптическим циркулятором или оптическим разветвителем.

Обратно-рассеянный свет подается циркулятором 16 на детектор 18, который определяет характеристики света и предоставляет выявленные характеристики в процессор 20. Процессор сравнивает интерферограммы, генерируемые различными импульсами, и коррелирует время принятого сигнала с месторасположением его отражения по линии измерительного волокна 22. При условии, что SNR зондирующего импульса является достаточно высоким, процессор 20 может определить, на каком расстоянии от блока 26 формирования запросов произошло достаточно значительное

изменение в фазе зондирующего импульса, которое может указывать на утечку, злоумышленника и тому подобное.

5 Характеристики обратно-рассеянного света собираются детектором 18 и передаются в процессор 20 для извлечения информации об обратно-рассеянном свете. Примеры таких характеристик могут включать в себя частоту, фазу, интенсивность, помехи и тому подобное. На Фигура 1 пространственная разрешающая способность определяется шириной импульса, генерируемого модулятором 14. Пространственная разрешающая способность относится к разрешающей способности по расстоянию, при котором может быть определено изменение измеряемой величины, такой как температура или деформация, и практически относится к длине волокна, на которой может быть обнаружена утечка или нарушитель. Чтобы гарантировать, что нет перекрытия между обратным рассеянием последовательных зондирующих импульсов, частота повторения импульсов (в данном документе сокращенно обозначено PRR) зондирующего лазера должна быть ниже, чем обратная величина времени между отправкой запроса и получением ответа, которое требуется зондирующему импульсу для распространения по оптическому волокну 22 до конечной точки 24 и обратно в циркулятор 16. Как упомянуто выше, чтобы избежать нелинейных явлений, происходящих по линии оптического волокна 22, пиковая мощность зондирующего импульса должна быть ограничена.

20 Практическое использование оптико-волоконной сенсорной системы 10 представляет собой защитную систему обнаружения вторжения через границу с использованием рэлеевского рассеяния. Чтобы избежать нелинейных явлений в оптическом волокне 22, предполагается, что пиковая мощность, поступающая в измерительное волокно 22, ограничена 5 милливаттами (в данном документе сокращенно обозначено мВт).

25 Зондирующий импульс, обеспечиваемый зондирующим лазером 12, распространяется вниз по оптическому волокну 22, и любой свет, который обратно рассеивается по линии оптического волокна 22 вследствие рэлеевского рассеяния, принимается циркулятором 16 и подается на детектор 18. Интенсивность обратно-рассеянного света имеет спекл-структуру, возникающую вследствие интерференции между различными событиями рассеяния, которые происходят в пределах зондирующего импульса в различных местах по линии оптического волокна 22, одновременно достигая детектора 18. Любое локальное изменение показателя преломления изменит фазы между обратно-

рассеянными составляющими сигнала и приведет к изменению спекл-структуры последовательных зондирующих импульсов. Такое изменение результата измерения обратно-рассеянного зондирующего света указывает на злоумышленника, и, поскольку известно время прохождения зондирующего света, вызвавшего изменение, между отправкой запроса и получением ответа, можно определить месторасположение нарушения нарушителя по линии границы.

Теперь обратимся к Фигуре 2, которая представляет собой график моделирования использования оптико-волоконной сенсорной системы, представленной на Фигуре 1, который показывает абсолютное значение разницы между двумя последовательными измерениями зондирующего света в логарифмическом масштабе, в общем обозначенный ссылочным номером 30, который известен в данной области техники. График 30 включает в себя ось X 32, показывающую расстояние в километрах (в данном документе сокращенно обозначено км) по линии измерительного волокна (такого как оптическое волокно 22 на Фигуре 1) и ось Y 34, показывающую мощность в децибелах по отношению к одному милливатту (в данном документе сокращенно обозначено дБм). Моделирование, как показано, было разработано для выявления помех между измерениями по линии оптического волокна на следующих расстояниях: 15 км, 40 км, 65 км, 90 км и 115 км. В сенсорной системе, такой как представлена на Фигуре 1, дробовой шум является доминирующим источником шума и показан на графике 30 стрелкой 40. Как видно из стрелки 36, в уровне шума наблюдается естественное квазилинейное затухание порядка около 0,2 децибел (в данном документе сокращенно обозначено дБ) на километр. Это является результатом затухания порядка около 0,4 дБ/км в обратно-рассеянном сигнале (0,2 дБ/км в каждом направлении туда и обратно) и зависимости квадратного корня от мощности дробового шума в мощности сигнала. Первое возмущение показано на 15 км стрелкой 38, тогда как второе возмущение показано на 40 км стрелкой 42. При моделировании ширина импульса была установлена на 100 наносекунд (в данном документе сокращенно обозначено нс), что соответствует пространственной разрешающей способности около 10 метров. Для выбранных параметров, как показано, первое возмущение на 15 км (стрелка 38) легко обнаруживается процессором, однако второе возмущение на 40 км (стрелка 42) практически невозможно обнаружить, учитывая затухание по линии оптического волокна. На 40 км дробовой шум является настолько сильным при возмущении, что возмущение невозможно отобразить, если не использовать какую-либо форму

линейного усиления для повышения уровня сигнала возмущения над шумовым сигналом. Возмущения на 65 км, 90 км и 115 км заглушены шумом. Таким образом, сенсорная система, показанная на Фигуре 1, может быть полезна для случаев практического применения, в которых требуется зона действия до 40 км, однако для 5 расстояний, превышающих это значение, сенсорная система, показанная на Фигуре 1, не подходит. Такие сенсорные системы известны из предшествующего уровня техники и описаны, например, в Grattan, K.T.V. и Sun, T., “Fiber optic sensor technology: an overview”, *Sensors and Actuators A Physical*, том 82, номера 1–3, май 2000, стр. 40–61 и в Santos, J.L. и Farahi, F., *Handbook of Optical Sensors*, CRC Press, Boca Raton, 2015.

10 Как показано и объяснено выше на Фигурах 1 и 2, мощность собранного детектором обратно-рассеянного света или сигнала, как правило, составляет небольшую долю мощности зондирующего импульса, которая сама по себе ограничена. В случае оптико-волоконных сенсорных систем, использующих волоконные брэгговские решетки (в данном документе сокращенно обозначено FBG), мощность собранного обратно- 15 рассеянного сигнала может составлять менее чем 10% от мощности зондирующего импульса, тогда как в системах DFOS мощность собранного обратно-рассеянного сигнала может составлять менее чем 10-3% от мощности зондирующего импульса. Если дополнить указанное естественным ослаблением как зондирующего импульса, так и обратно-рассеянного светового импульса, это делает применение систем DFOS на 20 длине в десятки километров нетривиальным. Как показано на Фигуре 2, низкий SNR обратно-рассеянного светового импульса может ограничивать пространственную разрешающую способность сенсорной системы, что приводит к высокой частоте ложных тревог, неправильной классификации или пропущенным событиям в системе обнаружения вторжения, а также приводит к низкой точности измеряемых величин, 25 таких как механическое напряжение, температура, расход и/или давление в других случаях практического применения измерений.

Как упомянуто выше, один из способов расширения зоны действия оптико-волоконной сенсорной системы, например, для расширения зоны действия системы, представленной на Фигуре 1, как смоделировано на Фигуре 2, состоит в размещении 30 усилителей по линии оптического волокна для преодоления затухания в пределах волокна. Такой подход известен в данной области техники и описан в Lai, M. и другие, «Ultra-long Distance Distributed Intrusion Detecting System Assisted With In-line

Amplification», IEEE Photonics Journal, том 9, номер 2, апрель 2017 года, стр.1-10. В то время как этот подход может увеличить радиус действия оптико-волоконной сенсорной системы, он требует подведения электричества и средств обмена информацией к нескольким центрам управления или контрольным точкам по линии оптического
5 волокна. Это может включать в себя подачу светового пучка накачки к дополнительным усилителям, расположенным по линии оптического волокна, а также добавление точек обслуживания, что приводит к потере некоторых преимуществ FOS на больших расстояниях.

Один из подходов к увеличению зоны досягаемости оптико-волоконной сенсорной
10 системы без использования внешних усилителей заключается в использовании линейного рамановского усиления зондирующего импульса, обратно-рассеянного сигнала или их обоих. Рассмотрим теперь Фигуру 3, которая является схематической иллюстрацией оптико-волоконной сенсорной системы, использующей линейное рамановское усиление, в общем обозначенную ссылочным номером 50, которая
15 известна в данной области техники. Оптико-волоконная сенсорная система 50 включает в себя блок 70 формирования запросов, который соединен с измерительным оптическим волокном 68. Блок 70 формирования запросов включает в себя зондирующий лазер 52 с узкой шириной линии, модулятор 54, циркулятор 56, детектор 58, процессор 60, фильтр 62 мультиплексора с разделением по длине волны (в данном
20 документе сокращенно обозначено WDM) и рамановский лазер 64 с накачкой. Модулятор 54 соединен с зондирующим лазером 52 и циркулятором 56. Детектор 58 соединен с процессором 60 и оптически соединен с циркулятором 56 для приема и обнаружения света, поступающего от циркулятора 56. Фильтр 62 WDM связывает свет от рамановского лазера 64 с накачкой с измерительным волокном 68. Оптическое
25 волокно 68 соединено с циркулятором 56 через фильтр 62 WDM и имеет конечную точку 66. Для простоты изложения опущены какие-либо каскады усиления, которые могут использоваться в оптико-волоконной измерительной системе 50 либо для усиления зондирующего света где-либо между зондирующим лазером 52 и измерительным оптическим волокном 68, либо для усиления обратно-рассеянного
30 света между измерительным оптическим волокном 68 и детектором 58.

Сенсорная система, показанная на Фигуре 3, функционирует аналогично сенсорной системе, показанной на Фигуре 1, однако она отличается тем, что оптико-волоконная

сенсорная система 50 использует рамановское усиление первого порядка. Рамановский лазер 64 с накачкой создает световой пучок накачки, который объединяется с зондирующим импульсом, генерируемым модулятором 54 (из света, генерируемого зондирующим лазером 52). Световой пучок накачки объединяется с оптическим

5 волоконном 68 посредством фильтра 62 WDM и может обеспечивать линейное усиление как зондирующего импульса, проходящего по оптическому волокну 68, так и обратно-рассеянного света, генерируемого в измерительном волокне 68 и распространяющегося к циркулятору 56. Как правило, длину волны светового пучка накачки, генерируемого рамановским лазером 64 с накачкой, выбирают таким образом, чтобы она находилась

10 вблизи пика спектра рамановского рассеяния. Подобно зондирующему импульсу, световой пучок накачки, обеспечиваемый рамановским лазером 64 с накачкой, также ослабляется при распространении по оптическому волокну 68. Световой пучок накачки экспоненциально ослабевает и затухает на длине отрезка оптического волокна 68. Следовательно, максимальное рамановское усиление находится на конце оптического

15 волокна 68, ближе всего к блоку 70 формирования запросов. Мощность рамановского лазера 64 с накачкой должна быть ограничена, чтобы избежать нежелательных нелинейных явлений, таких как спонтанное рамановское рассеяние, происходящих по линии оптического волокна 68, что может маскировать любые обратно-рассеянные сигналы и ухудшать SNR сигнала. Таким образом, мощность накачки рамановского

20 лазера поддерживается ниже порогового значения для спонтанного рамановского рассеяния во всех местах по линии оптического волокна 68. Затухание светового пучка накачки при его распространении по линии оптического волокна 68 ограничивает линейное усиление зондирующего импульса расстоянием, пропорциональным длине затухания длины волны рамановского лазера 64 с накачкой. Обычно оно составляет

25 около 10 км.

Как упомянуто выше, свет, генерируемый рамановским лазером 64 с накачкой, усиливает как обратно-рассеянный свет, так и сам зондирующий импульс. Чтобы поддерживать мощность зондирующего импульса ниже порогового значения, при котором проявляются нелинейные явления, либо должна быть ограничена мощность

30 рамановского лазера, что частично совпадает с зондирующим импульсом, и происходит очень низкое усиление, либо должна быть ограничена мощность зондирующего импульса, что в конечном итоге может снизить SNR зондирующего импульса. Следовательно, когда модулятор 54 генерирует зондирующий импульс, мощность

рамановского лазера 64 с накачкой может быть уменьшена или даже установлена на ноль.

В разновидности оптико-волоконной сенсорной системы 50 световой пучок накачки, генерируемый рамановским лазером с накачкой, может быть связан с концом измерительного волокна и распространяться встречно к зондирующему импульсу, генерируемому зондирующим лазером (на Фигуре 3 не показано).

Теперь обратимся к Фигуре 4, которая представляет собой график моделирования использования оптико-волоконной сенсорной системы, представленной на Фигуре 3, который показывает абсолютное значение разницы между двумя последовательными измерениями зондирующего света в логарифмическом масштабе, в общем обозначенный ссылочным номером 80, который известен в данной области техники. График 80 включает в себя ось X 82, показывающую расстояние в километрах по линии оптического волокна (например, измерительного волокна 68, представленного на Фигуре 3), и ось Y 84, показывающую мощность в дБм. Моделирование, как показано, было разработано для выявления помех между измерениями по линии оптического волокна на следующих расстояниях: 15 км, 40 км, 65 км, 90 км и 115 км. Что касается параметров сенсорной системы, представленной на Фигуре 3, при генерировании зондирующих импульсов рамановский лазер с накачкой устанавливается на ноль. В остальное время мощность рамановского лазера составляет 400 мВт, что чуть ниже порогового значения для спонтанного рамановского рассеяния. Все остальные параметры, как описано выше относительно Фигуры 2, одинаковы. Дробовой шум показан стрелкой 90. Рамановский световой пучок накачки и усиление, которое он придает обратно-рассеянному свету, экспоненциально ослабляются при распространении по волокну. В относительно близких местах, например, примерно до 17 км, это усиление больше, чем затухание зондирующего импульса и обратно-рассеянного света, поэтому возвращаемый сигнал из этой области фактически больше, чем места, расположенные дальше по линии измерительного волокна. Поскольку и дробовой шум 90, и SNR растут с увеличением мощности, первоначально как дробовой шум 90, так и SNR обратно-рассеянного света увеличиваются, как показано в разделе 86А. Приблизительно через 17 км обеспеченное усиление меньше, чем объединенное затухание зондирующего импульса и обратно-рассеянного света. Таким образом, после примерно 20 км наблюдается незначительное линейное рамановское усиление, и

скорость затухания сигнала, показанная в виде сечения 86В, аналогична представленной на Фигуре 2. Три отдельные стрелки 88А, 88В и 88С соответственно показывают полученную мощность возмущений на 15 км, 40 км и 65 км соответственно. Как показано на графике, расстояние по линии оптического волокна, на котором сгенерирован самый сильный сигнал зондирующего импульса, составляет около 20 км. Возмущения на 15 и 40 км отчетливо видны и различимы, тогда как возмущение на 65 км, показанное стрелкой 88С, сопоставимо по мощности с мощностью дробового шума. Однако возмущения на 90 и 115 км маскируются дробовым шумом и не могут быть обнаружены с помощью сенсорной системы, представленной на Фигуре 3. Сенсорная система, представленная на Фигуре 3, улучшает охват FOS относительно сенсорной системы, представленной на Фигуре 1, однако полезные расстояния такой сенсорной системы все еще ограничены.

Такие сенсорные системы, как описанные на Фигуре 3, известны в данной области техники и описаны, например, в патенте США № 8989526, выданном Хартогу (Hartog), под названием «Raman Amplification in Distributed Optical Fiber Sensing Systems» и в «Phase-sensitive Optical Time Domain Reflectometer Assisted by First-order Raman Amplification for Distributed Vibration Sensing Over >100 km», Мартинс (H.F. Martins) и другие, Journal of Lightwave Technology, том 32, номер 8, апрель 2014 года, стр. 1510–1518.

Ограничения сенсорной системы, представленной на Фигуре 3, могут быть частично преодолены с помощью сенсорной системы, использующей рамановское усиление второго порядка. Такая сенсорная система показана на Фигуре 5. Рассмотрим теперь Фигуру 5, которая является схематической иллюстрацией оптико-волоконной сенсорной системы, использующей линейное рамановское усиление второго порядка, в общем обозначенную ссылочным номером 100, которая известна в данной области техники. Оптико-волоконная сенсорная система 100 включает в себя блок 102 формирования запросов и оптическое измерительное волокно 126. Блок 102 формирования запросов включает в себя зондирующий лазер 106, модулятор 108, циркулятор 110, детектор 112, процессор 114, первый фильтр 116 WDM, рамановский лазер 118, первые FBG 120А, вторые FBG 120В и второй фильтр 122 WDM. Блок 102 формирования запросов соединен с оптическим волокном 126 на обоих концах, образуя тем самым оптико-волоконную петлю 124. Второй WDM 122 соединен с рамановским

лазером 118, а вторые FBG 120B соединяет второй WDM 122 с оптическим волокном 126. Модулятор 108 соединен с зондирующим лазером 106 и циркулятором 110. Детектор 112 соединен с процессором 114 и оптически соединен с циркулятором 110 для приема и обнаружения сигналов, поступающих от циркулятора 110. Первый фильтр 5 116 WDM связан с циркулятором 110, рамановским лазером 118 и первыми FBG 120A. Блок 102 формирования запросов по существу представляет собой соответствующий центр управления, которому требуется энергия для того, чтобы обеспечить работу зондирующего лазера и рамановского лазера. Рамановский лазер 118 может обеспечивать распространяющийся вперед световой пучок накачки посредством 10 первого WDM 116 и первых FBG 120A, распространяющийся в обратном направлении световой пучок накачки посредством второго WDM 122 и вторых FBG 120B, или может обеспечивать оба. Для простоты изложения опущены какие-либо каскады усиления, которые могут использоваться в оптико-волоконной измерительной системе 100 для усиления зондирующего света где-либо между зондирующим лазером 106 и 15 оптическим волокном 126, или для усиления обратно-рассеянного света между оптическим волокном 126 и детектором 112.

Сенсорная система, показанная на Фигуре 5, является примером распространяющегося в обратном направлении светового пучка накачки, поскольку рамановский лазер 118 может обеспечивать распространяющийся в обратном направлении рамановский 20 световой пучок накачки посредством второго WDM 122. Однако сенсорная система представленная на Фигуре 5, требует, чтобы оба конца оптического волокна 126 были доступны для блока 102 формирования запросов, допуская исключительно геометрию петли для измерительного волокна 126 (то есть оптико-волоконную петлю 124). Вследствие геометрии петли максимальный охват по линии измерительного волокна 25 для измерений составляет лишь половину длины измерительного волокна 126. Таким образом, такая сенсорная система не может использоваться в условиях, где один конец волокна должен быть свободным и недоступным, а также вдвое сокращает максимальное расстояние между контрольными точками в условиях больших расстояний. В условиях, где измерительное волокно 126 действительно образует петлю, 30 возможно использовать систему, аналогичную оптико-волоконной сенсорной системе 50 (Фигура 3), с двумя измерительными волокнами со свободными концами (каждое идет в противоположном направлении), тем самым образуя петлю с общей длиной, которая вдвое превышает длину единичного измерительного волокна (как показано на

Фигуре 5). Чтобы сравнить характеристики системы, представленной на Фигуре 5, с другими системами предшествующего уровня техники, ниже, как показано на Фигуре 6, представлено моделирование системы Фигуры 5, при этом световой пучок накачки от рамановского лазера распространяется только совместно, то есть системы, в которой 5 второй WDM 122 отсутствует, и помимо вторых FBG 120B, измерительное волокно 126 имеет свободный конец.

Сенсорная система, показанная на Фигуре 5, также является примером структуры линейного рамановского усиления второго порядка, которая позволяет расширить зону усиления в оптическое волокно еще больше по сравнению с сенсорной системой, 10 представленной на Фигуре 3. Пример этого описан в «Brillouin optical time-domain analysis assisted by second-order Raman amplification», Мартин-Лопез (S. Martin-Lopez) и другие, Optics Express, том 18, номер 18, август 2010 года, стр. 18769–18778. В системе Мартина-Лопеса (Martin-Lopez) и других FBG и диодные лазеры накачки расположены на обоих концах оптического волокна как часть оптико-волоконной сенсорной 15 системы, тем самым создавая ультра длинный рамановский волоконный лазер (в данном документе сокращенно обозначено URFL).

В сенсорной системе, представленной на Фигуре 5, рамановское усиление для зондирующего импульса и обратно-рассеянного света обеспечивается режимом URFL. Динамика URFL требует нескольких циклических процессов этого режима для его 20 построения и обеспечения значительного рамановского усиления. В такой структуре невозможно существенно модулировать рамановское усиление в соответствии с желаемым временным профилем усиления, как это было в случае с оптико-волоконной сенсорной системой 50 (Фигура 3). В частности, в сенсорной системе, представленной на Фигуре 5, рамановское усиление не может быть уменьшено в течение времени 25 зондирующего импульса. Чтобы предотвратить достижение мощности зондирующего импульса нелинейного порогового значения, необходимо уменьшить мощность зондирующего импульса, что связано с оптическим волокном 126, чтобы после рамановского усиления мощность зондирующего импульса достигла максимально допустимой мощности (т.е. нелинейное пороговое значение) только на некотором 30 расстоянии по линии измерительного волокна.

Теперь обратимся к Фигуре 6, которая представляет собой график моделирования использования оптико-волоконной сенсорной системы, представленной на Фигуре 5,

который показывает абсолютное значение разницы между двумя последовательными измерениями зондирующего света в логарифмическом масштабе, в общем обозначенный ссылочным номером 140, который известен в данной области техники. График 140 включает в себя ось X2 142, показывающую расстояние в километрах по линии оптического волокна (такого как оптическое волокно 126, представленного на Фигуре 5), и ось Y 144, показывающую мощность в дБм. Моделирование, как показано, было разработано для выявления помех между измерениями по линии оптического волокна на следующих расстояниях: 15 км, 40 км, 65 км, 90 км и 115 км. Что касается параметров сенсорной системы, представленной на Фигуре 5, то для того, чтобы оставаться в пределах порогового значения предотвращения нелинейных явлений, пиковая мощность зондирующего импульса была уменьшена до 100 микроватт. Мощность накачки вперед рамановского усиления второго порядка для распространяющегося вперед светового пучка накачки была установлена равной 1,45 Вт, а для обеспечения функционирования с одним концом (с целью сравнения, как объяснено выше), мощность накачки назад рамановского усиления для распространяющегося в обратном направлении светового пучка накачки была установлена на ноль. Этот набор параметров гарантирует, что зондирующий импульс не будет превышать нелинейный пороговое значение мощности 5 мВт, а также поддерживает мощность режима URFL ниже порогового значения 400 мВт для спонтанного рамановского рассеяния.

Показана кривая 146 мощности шума, демонстрирующая начальное уменьшение в течение первых 10–15 км, показанное стрелкой 150, а затем значительное увеличение мощности, достигающее пика около 40 км, после чего наблюдается медленное затухание в течение следующих 100 км. Дробовой шум 152, присутствующий в оптическом волокне, показан вместе с некоторым количеством стрелок 148A, 148B, 148C и 148D, указывающих возмущения на 40 км, 65 км, 90 км и 115 км соответственно. Однако, возмущение на 15 км маскируется дробовым шумом и не может быть обнаружено с помощью сенсорной системы, представленной на Фигуре 5.

Следует отметить, что малая мощность зондирующего импульса может вносить дополнительный шум в оптическое волокно, что не учитывается при моделировании, представленном на Фигуре 6. Моделирование системы, представленной на Фигуре 5, как показано на Фигуре 6, не учитывает как распространяющийся вперед, так и

распространяющийся в обратном направлении рамановский световой пучок накачки, однако тем не менее, система, представленная на Фигуре 5, требует доступа к обоим концам оптического волокна для установки двух FBG, которые могут быть существенным недостатком и препятствовать установке такой системы, например, на существующий проложенный в грунте оптико-волоконный кабель. Хотя использование линейного рамановского усиления второго порядка еще больше увеличивает усиление в волокне, которое сейчас достигает пика на расстоянии около 40 км, конфигурация по-прежнему страдает от недостатка полного контроля усилением с течением времени. Тот факт, что мощность рамановского режима первого порядка определяется FBG, делает невозможным управление мощностью рамановского усиления в меньшем масштабе времени, чем время прохождения туда и обратно, что имело место при моделировании, показанном на Фигуре 4. Результатом этого отсутствия управления мощностью рамановского усиления является низкая входная мощность зондирующего импульса, о чем свидетельствует стрелка 150, что приводит к низкому SNR, показанному в начале оптического волокна, до того, как зондирующий импульс усиливается до 5 мВт. Как уже упоминалось, это очень заметно в зондирующем импульсе на 15 км, где мощность сигнала сравнима с пределом дробового шума, по существу делая возмущение на 15 км незаметным и не обнаруживаемым.

Использование рамановского усиления второго порядка предшествующего уровня техники показано на Фигуре 5. Эта сенсорная система в нескольких отношениях отличается от сенсорной системы, представленной на Фигурах 1 и 3. Одним из них является то, что оптическое волокно соединено с FBG на каждом конце. FBG образуют резонатор на длине волны, для которой длина волны зондирующего импульса находится вблизи спектрального пика рамановского рассеяния. Для образования URFL полость накачена с обоих концов. Длина волны диодного лазера накачки выбирается такой, чтобы длина волны резонатора была близка к пику рамановского рассеяния. Как уже упоминалось выше, эта архитектура имеет несколько недостатков. Во-первых, оптическое волокно должно быть доступно с обоих концов. Это исключает использование этой сенсорной системы в суровых условиях окружающей среды, где электронику нельзя использовать из-за электромагнитного шума, жары, сильного холода или по другим причинам. В тех случаях практического применения, когда требуется несколько блоков управления, таких как длинные трубопроводы и границы, длина которых может составлять сотни, если не тысячи километров, сенсорная система,

представленная на Фигуре 5, вдвое сокращает расстояние между станциями управления или контрольными точками, где должны быть установлены детекторы. Кроме того, в сенсорной системе, представленной на Фигуре 5, режимом рамановского рассеяния первого порядка невозможно управлять независимо от рамановского режима второго порядка, поэтому профиль усиления определяется конструкцией и не может быть изменен в случае отклонения от нормативов в процессе производства. Кроме того, профиль усиления не может быть динамически изменен для адаптации к условиям окружающей среды, области интересов или изменениям мощности зондирующих импульсов и обратно-рассеянных сигналов.

10 СУЩНОСТЬ НАСТОЯЩЕГО РАСКРЫВАЕМОГО ТЕХНИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ

Целью раскрываемого технического решения является создание нового способа и системы для линейного рамановского усиления высокого порядка в оптической волоконной сенсорной системе, чтобы расширить зону усиления сенсорной системы без необходимости иметь доступ к обоим концам оптического волокна, и таких, которые предоставляют динамический контроль над рамановским усилением.

Таким образом, в соответствии с раскрываемым техническим решением предложен способ обеспечения линейного рамановского усиления в оптико-волоконной сенсорной системе. Способ включает в себя процедуры генерирования зондирующего света с зондирующей длиной волны, передачу зондирующего света в оптическое волокно и генерирование по меньшей мере одного рамановского светового пучка накачки на соответствующей длине волны накачки и мощности накачки. Соответствующая длина волны накачки короче зондирующей длины волны, так что соответствующая разность частот между соответствующей длиной волны накачки и зондирующей длиной волны кратна сдвигу частоты, для которого коэффициент рамановского рассеяния составляет по меньшей мере 25% от коэффициента резонансного рамановского рассеяния. Способ дополнительно содержит процедуры генерирования по меньшей мере одного рамановского затравочного света на соответствующей затравочной длине волны и затравочной мощности, при этом соответствующая затравочная длина волны находится между соответствующей длиной волны накачки и зондирующей длиной волны, передачу рамановского светового пучка накачки в оптическое волокно и передачу рамановского затравочного света в оптическое волокно. Способ также содержит процедуру распространения рамановского светового пучка накачки, рамановского

затравочного света и зондирующего света по линии оптического волокна для достижения распределенного рамановского усиления сигнального света, создаваемого зондирующим светом, когда он распространяется по линии оптического волокна.

Таким образом, в соответствии с еще одним аспектом раскрываемого технического решения, обеспечивается оптико-волоконная сенсорная система, использующая линейное рамановское усиление высокого порядка. Сенсорная система включает в себя источник зондирующего излучения, оптическое волокно, сепаратор, детектор, процессор, по меньшей мере, один рамановский затравочный лазер, по меньшей мере один рамановский лазер с накачкой и по меньшей мере одно соединительное устройство. Детектор оптически соединен с сепаратором, а процессор соединен с детектором. Источник зондирующего излучения включает в себя зондирующий лазер для генерирования зондирующего света с зондирующей длиной волны. Зондирующий свет оптически связан с оптическим волокном. Сепаратор предназначен для отделения светового сигнала, исходящего из оптического волокна, от света, соединенного с оптическим волокном. Детектор предназначен для обнаружения сигнального света, а процессор предназначен для анализа обнаруженного сигнального света. Рамановский затравочный лазер предназначен для генерирования соответствующего рамановского затравочного света с соответствующей затравочной длиной волны и затравочной мощностью, а рамановский лазер с накачкой предназначен для генерирования соответствующего рамановского светового пучка накачки с соответствующей длиной волны накачки и мощностью накачки. Соединительное устройство предназначено для соединения рамановского лазера с накачкой и рамановского затравочного лазера с оптическим волокном. Затравочная длина волны находится между длиной волны накачки и зондирующей длиной волны. Соответствующий рамановский световой пучок накачки, соответствующий рамановский затравочный свет и зондирующий свет распространяются по линии оптического волокна для достижения распределенного рамановского усиления сигнального света, создаваемого зондирующим светом, когда он распространяется по линии оптического волокна.

В соответствии с дополнительным аспектом раскрываемого технического решения оптико-волоконная сенсорная система может дополнительно включать в себя лазер с накачкой, соединенный с концом оптического волокна, противоположным концу источника зондирующего излучения, соединенного с оптическим волокном. Лазер с

накачкой предназначен для генерирования светового пучка накачки с длиной волны накачки, и, кроме того, сепаратор предназначен для подачи светового пучка накачки в оптическое волокно. Сигнальный свет представляет собой зондирующий свет, который усиливается световым пучком накачки и, по меньшей мере, одним из источников зондирующего излучения, и лазер с накачкой пульсирует для получения пространственной разрешающей способности.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ГРАФИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Раскрываемое техническое решение будет понято и оценено более полно из следующего подробного описания, приведенного в сочетании с графическими материалами, на которых:

Фигура 1 представляет собой схематическую иллюстрацию оптико-волоконной сенсорной системы без дополнительного усиления, которая известна в данной области техники;

Фигура 2 представляет собой график моделирования использования оптико-волоконной сенсорной системы, представленной на Фигуре 1, который показывает абсолютное значение разницы между двумя последовательными измерениями зондирующего света в логарифмическом масштабе, который известен в данной области техники;

Фигура 3 представляет собой схематическую иллюстрацию оптико-волоконной сенсорной системы, использующей линейное рамановское усиление, которая известна в данной области техники;

Фигура 4 представляет собой график моделирования использования оптико-волоконной сенсорной системы, представленной на Фигуре 3, который показывает абсолютное значение разницы между двумя последовательными измерениями зондирующего света в логарифмическом масштабе, который известен в данной области техники;

Фигура 5 представляет собой схематическую иллюстрацию оптико-волоконной сенсорной системы, использующей линейное рамановское усиление второго порядка, которая известна в данной области техники;

Фигура 6 представляет собой график моделирования использования оптико-волоконной сенсорной системы, представленной на Фигуре 5, который показывает абсолютное значение разницы между двумя последовательными измерениями зондирующего света в логарифмическом масштабе, который известен в данной области техники;

Фигура 7 представляет собой схематическую иллюстрацию оптико-волоконной сенсорной системы, использующей линейное рамановское усиление второго порядка, которая требует доступа лишь к одному концу оптического волокна, созданной и функционирующей в соответствии с вариантом осуществления раскрываемого технического решения;

Фигура 8 представляет собой график моделирования использования оптико-волоконной сенсорной системы, представленной на Фигуре 7 раскрываемого технического решения, который показывает абсолютное значение разницы между двумя последовательными измерениями зондирующего света в логарифмическом масштабе, созданной и функционирующей в соответствии с вариантом осуществления раскрываемого технического решения;

Фигура 9 представляет собой график, показывающий изменения мощности различных рамановских режимов по длине оптического волокна с использованием сенсорной системы, описанной на Фигуре 7, и сенсорной системы предшествующего уровня техники, описанной на Фигуре 3, созданной и функционирующей в соответствии с дополнительным вариантом осуществления раскрываемого технического решения;

Фигура 10 представляет собой график, показывающий усиление зондирующего импульса по линии оптического волокна с использованием рамановского усиления, описанного выше на Фигурах 7-9, созданного и функционирующего в соответствии с еще одним вариантом осуществления раскрываемого технического решения; и

Фигура 11 представляет собой график, показывающий теоретическую среднюю мощность обратно-рассеянных сигналов, которые достигают детектора, с учетом мощности зондирующего импульса, показанной на Фигуре 10, и обратно-рассеянного усиления, показанного на Фигуре 9, в зависимости от месторасположения обратно-рассеянного сигнала в оптическом волокне, по сравнению с предшествующим уровнем

техники, созданных и функционирующих в соответствии с дополнительным вариантом осуществления раскрываемого технического решения.

ПОДРОБНОЕ ОПИСАНИЕ ВАРИАНТОВ РЕАЛИЗАЦИИ ИЗОБРЕТЕНИЯ

Раскрываемое техническое решение преодолевает недостатки предшествующего уровня техники, предоставляя оптико-волоконную сенсорную систему и способ, использующие линейное рамановское усиление второго порядка для того, чтобы расширить зону охвата сенсорной системы без необходимости иметь доступ к обоим концам оптического волокна, и таких, которые предоставляют динамический контроль над рамановским усилением. Таким образом обеспечивается оптико-волоконная сенсорная система для использования линейного рамановского усиления высокого порядка и способ использования линейного рамановского усиления высокого порядка в оптико-волоконных сенсорных системах. Это достигается за счет новой конфигурации оптико-волоконной сенсорной системы с использованием двух рамановских лазеров, расположенных в едином блоке управления или корпусе. Раскрываемое техническое решение обеспечивает независимое управление мощностью рамановского светового пучка накачки второго порядка и рамановского затравочного света первого порядка, что таким образом позволяет управлять усилением зондирующего импульса и сигнального света и адаптировать его к конкретному случаю практического применения оптико-волоконной сенсорной системы. В соответствии с раскрываемым техническим решением, накачивая оптическое волокно световым пучком накачки, который смещается на несколько порядков рамановского рассеяния, можно увеличить входную мощность накачки и расстояние, на котором происходит рамановское усиление по оптическому волокну, поскольку согласно раскрываемому техническому решению спонтанное рамановское рассеяние первого порядка входного светового пучка накачки больше не является ограничивающим фактором. Это связано с тем, что спонтанное рамановское рассеяние светового пучка накачки происходит на длине волны, которая значительно отличается от длины волны зондирующего света и длины волны сигнального света и поэтому может быть отфильтрована перед обнаружением. В соответствии с раскрываемым техническим решением длина волны светового пучка накачки короче длины волны зондирующего света, так что соответствующая разность частот между длиной волны накачки и зондирующей длиной волны кратна сдвигу

частоты, для которого коэффициент рамановского рассеяния составляет по меньшей мере 25% от коэффициента резонансного рамановского рассеяния.

Кроме того, раскрываемое техническое решение позволяет осуществлять управление рамановским усилением с течением времени, обеспечивая различные усиления для зондирующих импульсов и измеряемого сигнала в случае, когда измеряемый сигнал распространяется в обратном направлении к зондирующим импульсам, например, в случае рэлеевского или бриллюэновского обратно-рассеянного света или отраженного от FBG света.

Одна только мощность накачки рамановского лазера второго порядка приводит к очень небольшому усилению в зондирующем импульсе и обратно-рассеянном сигнале. Таким образом, раскрываемое техническое решение включает в себя рамановский затравочный лазер и рамановский лазер с накачкой. Рамановский затравочный лазер стимулирует вынужденное рамановское рассеяние (SRS) рамановского светового пучка накачки в рамановском режиме первого порядка и, таким образом, действует как механизм управления и точная настройка для рамановского усиления зондирующего света и сигнального света.

Режим рамановского затравочного лазера (также называемый в данном документе рамановским режимом первого порядка) усиливается рамановским лазером с накачкой с помощью SRS, когда свет от обоих лазеров распространяется по линии измерительного оптического волокна. Поскольку рамановский режим первого порядка от рамановского затравочного лазера является усиленным, он обеспечивает усиление зондирующего импульса и любого обратно-рассеянного сигнала. Расстояние по линии оптического волокна, в котором имеется значительная мощность в рамановском режиме первого порядка, определяется мощностью накачки рамановского режима второго порядка, а также затравочной мощностью рамановского режима первого порядка. Варьируя величину мощности накачки рамановского режима второго порядка и мощности рамановского затравочного лазера, в соответствии с раскрываемым техническим решением можно установить как самую высокую мощность рамановского режима первого порядка в оптическом волокне, так и месторасположение по линии оптического волокна, в котором достигается эта мощность и, следовательно, усиление. Таким образом, величина распределенного усиления в оптико-волоконной сенсорной

системе может быть динамически адаптирована для особого или конкретного использования, не требуя доступа к обоим концам оптического волокна.

Увеличение мощности рамановского лазера с накачкой или рамановского затравочного лазера, или настройка длины их волны ближе к резонансу рамановского рассеяния увеличивает максимальную мощность затравочных импульсов рамановского режима первого порядка. Месторасположение этого максимума по линии оптического волокна может быть увеличено путем увеличения мощности рамановского лазера с накачкой и уменьшения мощности рамановского затравочного лазера (или путем настройки разности длин волн между рамановским лазером с накачкой и рамановским затравочным лазером вдали от резонанса рамановского рассеяния) соответственно. Используя раскрываемое техническое решение, можно довести пиковое усиление до любого требуемого расстояния по линии оптического волокна вплоть до расстояния более 20 км для рамановской накачки второго порядка. Это максимальное расстояние зависит от значений длины затухания как длины волны рамановский лазер с накачкой, так и рамановский затравочный лазер, а также и от используемого порядка рамановского рассеяния, и может быть увеличено еще больше, используя рамановскую накачку более высокого порядка. Таким образом, характеристика рамановского затравочного света может быть оптимизирована для получения усиления обратно-рассеянного сигнального света из определенного места по линии оптического волокна 222. Данная характеристика может быть мощностью и/или длиной волны рамановского затравочного света. Как упомянуто выше, мощность и/или длина волны рамановского лазера с накачкой и/или рамановского затравочного лазера могут использоваться для точной настройки сенсорной системы и характера линейного рамановского усиления, обеспечиваемого в соответствии с раскрываемым техническим решением. Примеры настройки длины волны в соответствии с раскрываемым техническим решением могут включать в себя настройку длины волны накачки для оптимизации коэффициента рамановского рассеяния от длины волны накачки к затравочной длине волны, настройку затравочной длины волны для оптимизации коэффициента рамановского рассеяния от любой длины волны накачки до затравочной длины волны, от длины волны накачки до занимающих промежуточное положение различных затравочных длин волны (в случае, когда используется более одного рамановского затравочного лазера) и от затравочная длина волны до зондирующей длины волны. Например, с помощью 5-ваттной рамановской накачки с использованием рамановской накачки

третьего порядка и рамановской затравочной мощности в 20 нановатт и 10 нановатт, соответственно, для рамановских затравочных лазеров второго порядка и первого порядка, можно достичь максимального рамановского режима первого порядка в 400 мВт на расстоянии 30 км по линии измерительного волокна.

- 5 Такое регулирование может быть достигнуто без превышения порогового значения для спонтанного рамановского рассеяния, которое будет спектрально перекрываться с зондирующим или сигнальным режимами при одновременном управлении пиковым усилением для зондирующего импульса, чтобы гарантировать, что уровень мощности зондирующего импульса остается ниже порогового значения, при котором начинают
- 10 появляться нелинейные явления. Это контрастирует с известными в настоящее время системами линейного рамановского усиления первого порядка предшествующего уровня техники, в которых максимальное усиление зондирующего импульса обязательно находится в точке, где рамановский лазер с накачкой соединен с оптическим волокном, и таким образом зона усиления зондирующего света
- 15 сокращается.

В соответствии с раскрываемым техническим решением увеличенная зона усиления по длине оптического волокна позволяет достигать более мощных обратно-рассеянных сигналов, которые можно использовать для одного или нескольких из следующего:

- Увеличение длины оптического волокна, в котором обратно-рассеянные сигналы
- 20 можно отличить от дробового шума;

Улучшение пространственной разрешающей способности зондирующего импульса путем сокращения длины зондирующего импульса;

Увеличение общего SNR обратно-рассеянных сигналов для более точных результатов измерений измеряемой величины; а также

- 25 Сокращение времени сбора обратно-рассеянных сигналов, поскольку требуется меньше усреднения или его не требуется совсем, что увеличивает полосу измерения зондирующего импульса.

Следует отметить, что раскрываемое техническое решение описано с использованием примера рамановского затравочного лазера второго порядка, однако конфигурация

- волоконного лазера оптико-волоконной сенсорной системы может быть расширена до рамановского режима рассеяния более высокого порядка с более высокими мощностями рамановского лазера с накачкой. Как описано ниже, это достижимо, в соответствии с раскрываемым техническим решением, с использованием нескольких
- 5 рамановских затравочных лазеров для управления рамановским рассеянием многочисленного порядка. Управление, обеспечиваемое рамановскими затравочными лазерами совместно, может использоваться для увеличения расстояния рамановского режима мощности первого порядка по линии оптического волокна от того, где рамановские лазеры соединены с оптическим волокном.
- 10 Чтобы обеспечить возможность сравнения характеристик раскрываемого технического решения с описанным предшествующим уровнем техники, раскрываемое техническое решение также описано в контексте фазочувствительной OTDR-системы с прямым детектированием, в которой один конец оптического волокна недоступен для электроники, оптической накачки, обмена информацией и/или технического
- 15 обслуживания. Однако раскрываемое техническое решение не ограничивается такими системами и может использоваться в других типах оптико-волоконных сенсорных систем и систем обнаружения. Как упомянуто выше, одним из случаев практического применения раскрываемого технического решения является ситуация и условия, когда один конец оптического волокна недоступен, например, глубокое бурение вглубь
- 20 поверхности Земли. Другое использование представляет собой в пограничный контроль, когда количество центров или станций управления должно быть минимизировано. Раскрываемое техническое решение может использоваться в других условиях, когда усилитель для увеличения диапазона усиления не должен или не может быть размещен где-нибудь по линии оптического волокна.
- 25 В случае охраны границы нежелательно устанавливать здания каждые несколько километров или даже десятки километров, чтобы обеспечить подачу электричества для усиления сигнала, и кроме того, также удовлетворять требования дополнительной защиты по линии границы для защиты здания, в котором размещается усилитель. В соответствии с раскрываемым техническим решением вдоль границы может быть
- 30 проложен обычный оптико-волоконный кабель, а не особенный, то есть выполнена обычная телекоммуникационная прокладка, без необходимости размещать вдоль границы множество усилителей. Если усилитель расположен где-либо по линии

оптического волокна, для усилителя требуется энергия, поэтому даже если ремонтпригодность поставлена под угрозу и эти усилители размещены под землей, чтобы избежать необходимости обеспечивать безопасность для находящегося в поле видимости здания, каждый усилитель, размещенный по линии оптического волокна, увеличивает стоимость сенсорной системы, поскольку на усилители по-прежнему необходимо подавать энергию.

Другие варианты использования раскрываемого технического решения могут включать в себя проверку температуры на большом расстоянии, контроль железных дорог, дорог, трубопроводов и других инфраструктур, включая контроль устойчивости зданий, мостов и других крупных сооружений, проверку давления на большом расстоянии, а также потока масла или других жидкостей в трубе на большом расстоянии. В этом контексте большое расстояние может составлять от сотен до тысяч километров. В соответствии с раскрываемым техническим решением, другие типы обратно-рассеянных сигналов, помимо рамановского рассеяния, могут использоваться для определения измеряемой величины по линии оптического волокна или могут использоваться для извлечения информации о возмущении по линии оптического волокна. Раскрываемое техническое решение может быть реализовано с использованием рэлеевского рассеяния в OTDR-системах, а также в системах оптической рефлектометрии в частотной области (в данном документе сокращенно обозначено OFDR). Как упомянуто выше, возмущение представляет собой изменение анализируемой в процессоре диаграммы рассеяния и может быть вызвано изменением температуры, изменением давления или изменением других физических явлений, которые могут вызывать локальное изменение показателя преломления волокна или могут повлиять на диаграмму рассеяния. Раскрываемое техническое решение также может быть реализовано с использованием бриллюэновского рассеяния в OTDR-системах. Например, смещения бриллюэновского рассеяния измеряют изменение температуры или механического напряжения, поэтому это явление хорошо для случаев, когда измеряемой величиной является температура или механическое напряжение. В таких вариантах осуществления раскрываемого технического решения нет необходимости в распространении измеренного сигнала обратно от точки измерения. В BOTDA-системе (бриллюэновская система оптического анализа во временной области) измеренным сигналом является распространяющийся вперед зондирующий свет, который усиливается распространяющимся в обратном направлении бриллюэновским

световым пучком накачки. В этом варианте осуществления по меньшей мере один из следующего: зондирующий лазер и лазер накачки (генерирующий бриллюэновский световой пучок накачки) - может быть импульсным, чтобы обладать пространственной разрешающей способностью. Оба могут быть усилены с помощью раскрываемого

5 технического решения. Также отмечается, что согласно раскрываемому техническому решению различные полученные диаграммы рассеяния могут анализироваться процессором и могут быть классифицированы в соответствии с типом объекта, который вызвал возмущение и изменение диаграммы рассеяния. Например, в сенсорных системах обнаружения пересечения границы могут быть идентифицированы различные

10 диаграммы рассеяния, представляющие автомобили, животных, людей и тому подобное.

Рассмотрим теперь Фигуру 7, представляет собой схематическую иллюстрацию оптико-волоконной сенсорной системы, использующей линейное рамановское усиление второго порядка, которая требует доступа лишь к одному концу оптического

15 волокна, в общем обозначенную ссылочным номером 200, созданной и функционирующей в соответствии с вариантом осуществления раскрываемого технического решения. Оптико-волоконная сенсорная система 200 включает в себя блок 202 формирования запросов и оптическое волокно 222. Блок 202 формирования запросов включает в себя источник 203 зондирующего излучения, сепаратор 208,

20 детектор 210, процессор 212, соединительное устройство 214, рамановский затравочный лазер 216 и рамановский лазер 218 с накачкой. Источник 203 зондирующего излучения включает в себя зондирующий лазер 204 и модулятор 206. Модулятор 206 является необязательным компонентом. Оптическое волокно 222 включает в себя конец 220 волокна, который может быть недоступен. Источник 203

25 зондирующего излучения соединен с сепаратором 208. В одном варианте (как показано) модулятор 206 соединен с зондирующим лазером 204 и сепаратором 208. Детектор 210 соединен с процессором 212 и оптически соединен с сепаратором 208 для приема и обнаружения сигналов, поступающих от сепаратора 208. Соединительное устройство 214 соединено с сепаратором 208, рамановским затравочным лазером 216,

30 рамановским лазером 218 с накачкой и оптическим волокном 222. Блок 202 формирования запросов представляет контрольную точку, центр управления или точку доступа для установки сенсорной системы раскрываемого технического решения. Для простоты изложения опущены какие-либо каскады усиления, которые могут

использоваться в оптико-волоконной измерительной системе 200 либо перед подачей зондирующего света в оптическое волокно 222, либо перед подачей обратно-рассеянного света в детектор 210.

Зондирующий лазер 204 может быть выполнен в виде любого лазера с узкой шириной
5 линии. Зондирующий лазер 204 может представлять собой лазер с фазовым сканированием, лазер с фазовой модуляцией, лазер с частотной модуляцией или лазер с амплитудной модуляцией. Зондирующий лазер 204 генерирует зондирующий свет, который проходит по линии оптического волокна 222 и который создает обратно-рассеянные световые сигналы, которые в конечном итоге принимаются детектором 210.

10 Зондирующий свет может представлять собой непрерывно излучаемый свет или световой импульс. Модулятор 206 является необязательным компонентом и не является существенным для конфигурации, показанной на Фигуре 7. Модулятор 206 может представлять собой любой известный модулятор для модуляции лазерного излучения, как например, оптико-акустический модулятор, электро-абсорбционный модулятор или
15 электро-оптический модулятор, и его использование зависит от требуемой схемы измерения. Например, в OTDR-системах модулятор создает зондирующий импульс и определяет пространственную разрешающую способность. Затем измеренный сигнал коррелируется с месторасположением события рассеяния с помощью определения времени перемещения. В OFDR-системах модулятор не используется, и
20 пространственная корреляция определяется в соответствии с диаграммой биений сигнала и зондирующего лазера 204, который в этом случае является лазером с качающейся частотой. Сепаратор 208 используется для отделения распространяющегося вперед зондирующего импульса от любого обратно-рассеянного света, поступающего от оптического волокна 222. Сепаратор 208 может быть выполнен
25 как циркулятор, соединительное устройство, фильтр WDM или любой другой известный элемент, который может отделять распространяющиеся вперед световые лучи от распространяющихся в обратном направлении световых лучей. Детектор 210 может представлять собой любой известный детектор света с шириной полосы в диапазоне от нескольких мегагерц (в данном документе сокращенно обозначено МГц)
30 до десятков гигагерц (в данном документе сокращенно обозначено ГГц). Тип детектора, используемого для детектора 210, может представлять собой, среди прочего, фотодиод, лавинный фотодиод и трубку фотоумножителя. Соединительное устройство 214 связывает световые импульсы, генерируемые рамановским затравочным лазером

216 и рамановским лазером 218 с накачкой, с оптическим волокном 222 и может быть выполнен в виде любого тип светового соединительного устройства. Например, соединительное устройство 214 может представлять собой WDM, соединительное устройство 2x2 и тому подобное. Рамановский затравочный лазер 216 и рамановский лазер 218 с накачкой могут быть выполнены в виде диодных лазеров, рамановских волоконных лазеров и тому подобного. В одном варианте осуществления изобретения рамановский затравочный лазер 216 может быть выполнен в виде диодного лазера, при этом рамановский лазер 218 с накачкой может быть выполнен в виде волоконного лазера, диодного лазера или рамановского волоконного лазера. Рамановский лазер 218 с накачкой может функционировать в режиме непрерывной волны (в данном документе сокращенно обозначено CW) или в импульсном режиме. В показанных вариантах осуществления рамановский затравочный лазер 216 модулируется и не является импульсным, однако в других вариантах осуществления он может быть импульсным. Как показано, блок 202 формирования запросов включает в себя единичный рамановский лазер с накачкой и единичный рамановский затравочный лазер, однако в других вариантах осуществления раскрываемого технического решения, как описано ниже, блок 202 формирования запросов может включать в себя некоторое количество рамановских затравочных лазеров и/или лазеров с рамановской накачкой, если требуется рамановское усиление более высокого порядка. В показанном варианте осуществления как рамановский затравочный лазер 216, так и рамановский лазер 218 с накачкой соединены с соединительным устройством 214 после сепаратора 208. В других вариантах осуществления раскрываемого технического решения рамановский затравочный лазер 216 и рамановский лазер 218 с накачкой могут быть соединены между сепаратором 208 и модулятором 206 (не показано). Рамановский затравочный лазер 216 и рамановский лазер 218 с накачкой также могут быть отдельно связаны с оптическим волокном 222 (не показано), при этом каждый из перечисленного: рамановский затравочный лазер 216 и рамановский лазер 218 накачки - соединены через отдельное соединительное устройство (не показано). Кроме того, в конфигурации, показанной на Фигуре 7, рамановский затравочный лазер 216 и рамановский лазер 218 с накачкой соединены с одним концом оптического волокна 222, так что конец 220 волокна может оставаться недоступным. В других вариантах осуществления раскрываемого технического решения один из перечисленного: рамановский затравочный лазер 216 или рамановский лазер 218 с накачкой - может

быть соединен с концом 220 волокна (не показано). В то время как такая конфигурация теряет преимущество, заключающееся в том, что требуется доступ только к одному концу оптического волокна 222, такая конфигурация имеет преимущество в достижении еще большего расстояния по линии оптического волокна, в отличие от конфигурации, показанной на Фигуре 7. Конфигурация, показанная на Фигуре 7, использует прямое обнаружение сигнала (то есть обратно-рассеянный свет). В дополнительных вариантах осуществления раскрываемого технического решения сигнал объединяется с выходным излучением зондирующего лазера 204 для обеспечения когерентного обнаружения на единичном детекторе или сбалансированном детекторе (показанном как детектор 210). Этот сигнал представляет собой сигнал, отделенным с помощью сепаратора 208. Как правило, обнаружение может представлять собой гомодинное детектирование или гетеродинное детектирование. Кроме того, сигнальный свет, который обнаруживается детектором 210, в зависимости от конкретного использования сенсорной системы, представленной на Фигуре 7, может представлять собой отраженный свет, усиленный свет, обратно-рассеянный свет, прямо-рассеянный свет, рамановский рассеянный свет, бриллюэновский рассеянный свет или рэлеевский рассеянный свет, генерируемый от зондирующего света, созданного зондирующим лазером 204. Обнаруженный сигнал подается из детектора 210 в процессор 212, который может анализировать обнаруженный сигнальный свет для получения информации, касающейся оптического волокна 222, среды, в которой расположено оптическое волокно 222, или и того и другого. Также отмечается, что обнаруженный сигнал может коррелировать с зондирующим светом или зондирующим импульсом. Это сделано для того, чтобы сократить время между зондирующими импульсами и может быть осуществлено кодированием каждого зондирующего импульса с помощью диаграммы. Таким образом, некоторое количество зондирующих импульсов могут быть переданы за одно время прохождения туда и обратно. Неоднозначность в сигнальном свете между различными зондирующими импульсами, передаваемыми в течение одного времени прохождения туда и обратно, может быть устранена путем корреляции принятого сигнального света с помощью различных диаграмм.

В соответствии с раскрываемым техническим решением лазерный свет на двух различных длинах волны соединены с оптическим волокном 222, в то время как зондирующий лазер 204 подает зондирующий свет на оптическое волокно 222, который

может быть преобразован в зондирующие импульсы модулятором 206. Рамановский лазер 218 с накачкой обеспечивает световой пучок накачки, тогда как рамановский затравочный лазер 216 обеспечивает затравочный свет. Рамановский лазер 218 с накачкой обеспечивает свет высокой мощности, тогда как рамановский затравочный

5 лазер 216 обеспечивает свет более низкой мощности. В одном варианте осуществления изобретения рамановский лазер с накачкой обеспечивает световой пучок накачки в течение всего цикла измерения, а рамановский затравочный лазер обеспечивает только затравочные импульсы между зондирующими импульсами. В еще одном варианте осуществления изобретения мощность рамановского затравочного света уменьшается

10 во время зондирующих импульсов, но не до нуля. Это сделано для того, чтобы не дать затравочным импульсом увеличить мощность зондирующих импульсов выше порогового значения, при котором в пределах оптического волокна 222 могут возникать нелинейные явления. В одном варианте осуществления изобретения рамановский лазер 218 с накачкой выдает световые импульсы мощностью от 50 мВт до

15 10 Вт, тогда как рамановский затравочный лазер 216 вырабатывает световые импульсы мощностью менее 10 мВт. В общем, характеристика затравочного света, создаваемого рамановским затравочным лазером 216, и/или светового пучка накачки, излучаемого рамановским лазером 218 с накачкой, может модулироваться в соответствии с изменениями мощности в зондирующем свете. Характеристика может быть мощностью

20 и/или длиной волны рамановского затравочного лазера и/или рамановского лазера с накачкой. Это делается для того, чтобы избежать высокой мощности в зондирующем свете, которая может вызвать возникновение нелинейных явлений в любом месте по линии оптического волокна 222. Свет высокой мощности, обеспечиваемый лазером 218 с рамановской накачкой, имеет сдвиг длины волны, почти вдвое превышающий

25 рамановский сдвиг зондирующего света. Например, если зондирующий лазер 204 излучает свет с длиной волны 1550 нанометров (в данном документе сокращенно обозначено нм), то рамановский лазер 218 с накачкой может генерировать световой пучок накачки с длиной волны в диапазоне от 1340 до 1400 нм с рамановским сдвигом в диапазоне от 150 до 210 нм (эквивалентно сдвигу частоты от 20 до 30 терагерц (в

30 данном документе сокращенно обозначено ТГц)). Затем, рамановский лазер 218 с накачкой может иметь мощность в диапазоне от 50 милливатт до 10 Вт. Свет малой мощности, обеспечиваемый рамановским затравочным лазером 216, обеспечена длиной волны вблизи стоксово рамановского пика светового пучка накачки и стоксово

рамановского сдвига длины волны вблизи длины волны зондирующего света. Например, если зондирующий лазер 204 генерирует зондирующий свет с длиной волны 1550 нм, то рамановский затравочный лазер 216 может генерировать затравочный свет с длиной волны в диапазоне от 1430 до 1500 нм с рамановским сдвигом в диапазоне от 50 до 120 нм (эквивалентно частотному сдвигу в диапазоне от 7 до 16 ТГц). В таком случае рамановский затравочный лазер 216 может иметь мощность менее 10 милливатт. В общем, длина волны затравочного света должна находиться между длиной волны светового пучка накачки и длиной волны зондирующего света. Как упомянуто выше, значения длины волны зондирующего света, рамановского светового пучка накачки и рамановского затравочного света должны выбираться в пределах определенного диапазона и соотношения для того, чтобы раскрываемое техническое решение достигало требуемого линейного рамановского усиления второго порядка. В общем, в соответствии с раскрываемым техническим решением длина волны светового пучка накачки короче длины волны зондирующего света, так что соответствующая разность частот между длиной волны накачки и зондирующей длиной волны кратна сдвигу частоты, для которого коэффициент рамановского рассеяния составляет по меньшей мере 25% от коэффициента резонансного рамановского рассеяния. В одном варианте осуществления раскрываемого технического решения длина волны накачки, затравочная длина волны и зондирующая длина волны выбираются таким образом, чтобы соответствующая разность частот между длиной волны накачки и зондирующей длиной волны была в два раза больше частотного сдвига, для которого коэффициент рамановского рассеяния (или коэффициент рамановского рассеяния одного порядка) составляет по меньшей мере 25% от коэффициента резонансного рамановского рассеяния. В этом варианте осуществления изобретения значения длины волны также выбираются так, чтобы разность частот между затравочной длиной волны и зондирующей длиной волны, и между затравочной длиной волны и длиной волны накачки представляла собой частотный сдвиг, для которого коэффициент рамановского рассеяния составляет по меньшей мере 25% по сравнению с частотным сдвигом резонансного рамановского рассеяния. Следует отметить, что в одном варианте осуществления раскрываемого технического решения мощность зондирующего лазера 204 не должна превышать 1 Вт.

Для того, чтобы преодолеть затухание как зондирующих импульсов, так и обратно-рассеянного света, желательно иметь хорошо распределенное усиление по всему

оптическому волокну. В соответствии с раскрываемым техническим решением рамановский световой пучок накачки и рамановский затравочный свет взаимодействуют друг с другом в измерительном волокне для достижения распределенного рамановского усиления обратно-рассеянного света (то есть 5 сигнального света), генерируемого из зондирующего света, когда он распространяется по линии измерительного волокна. При использовании рамановского лазера 218 с накачкой и рамановского затравочного лазера 216 усиление, обеспечиваемое для оптического волокна 222, можно регулировать и настраивать в зависимости от использования оптико-волоконной сенсорной системы 200. Например, увеличивая 10 мощность светового пучка накачки и уменьшая мощность затравочного света, усиление можно перемещать вперед по линии оптического волокна. Тем не менее, уменьшая мощность светового пучка накачки и увеличивая мощность исходного света, усиление можно перемещать назад по линии оптического волокна, в направлении к соединительному устройству 214. Следует отметить, что в одном варианте 15 осуществления раскрываемого технического решения длина оптического волокна 222 должна быть больше 10 км, а оптическое волокно 222 должно быть воплощено как одномодовое оптическое волокно.

Следует отметить, что в сенсорной системе, представленной на Фигуре 7, рамановский затравочный лазер 216 и рамановский лазер 218 с накачкой совместно распространяют 20 свет, генерируемый зондирующим лазером 204. Как упомянуто выше, в других вариантах осуществления раскрываемого технического решения, по меньшей мере один из перечисленного: рамановский затравочный лазер 216 и рамановский лазер 218 с накачкой (или оба) - также соединены с волоконным концом 220. В таком варианте осуществления изобретения затравочный свет и/или световой пучок накачки могут 25 совместно распространяться с зондирующим светом, встречно распространяться с зондирующим светом или двунаправленно распространяться с зондирующим светом.

Теперь обратимся к Фигуре 8, которая представляет собой график моделирования использования оптико-волоконной сенсорной системы, представленной на Фигуре 7 раскрываемого технического решения, который показывает абсолютное значение 30 разницы между двумя последовательными измерениями зондирующего света в логарифмическом масштабе, созданной и функционирующей в соответствии с вариантом осуществления раскрываемого технического решения. График 240 включает

в себя ось X 242, показывающую расстояние в километрах по линии оптического волокна (например, оптического волокна 222, представленного на Фигуре 7), и ось Y 244, показывающую мощность в дБм. Моделирование, как показано, было разработано для выявления помех между измерениями по линии оптического волокна на
5 следующих расстояниях: 15 км, 40 км, 65 км, 90 км и 115 км. Моделирование, показанное на Фигуре 8, использует те же параметры, что и моделирование, показанное выше на Фигуре 2, но со следующими дополнительными параметрами. Мощность рамановского лазера с накачкой была установлена равной 1,9 Вт, при этом генерировался рамановский световой пучок накачки второго порядка, мощность
10 рамановского затравочного лазера была установлена на уровне 22 нановатт при генерировании зондирующих импульсов, и равной 1 микроватт в другое время, что создавало рамановский световой режим первого порядка. Эти значения мощности накачки были выбраны таким образом, чтобы рамановский световой режим первого порядка не превышал предел 400 мВт для спонтанного рамановского рассеяния во всех
15 местах по линии оптического волокна, а также для предотвращения превышения зондирующего импульса предела мощности в 5 мВт, выше которого начнут происходить нелинейные явления.

Как можно видеть, кривая 246 демонстрирует относительно плоский уровень мощности шума (показывая изменение приблизительно в 10 дБ), указывая относительно плоский
20 уровень мощности (показывая изменение приблизительно в 20 дБ) по сравнению с кривыми, показанными на Фигурах 2, 4 и 6 выше, которые представляют предшествующий уровень техники. Кривая 246 в конечном итоге также снижается до уровней, где дробовой шум сопоставим с уровнем сигнала, однако это происходит на расстояниях, близких к 150 км. Хорошо видны пики возмущений на проектных
25 расстояниях 15 км, 40 км, 65 км, 90 км и 115 км, что показано стрелками 248А, 248В, 248С, 248D и 248Е. Понижение обратно-рассеянной мощности показано стрелкой 250, тогда как максимальное значение обратно-рассеянной мощности показано стрелкой 252. Это понижение и максимум регулируются и настраиваются в соответствии с раскрываемым техническим решением путем регулировки уровней мощности, а именно
30 затравочной мощности рамановского режима первого порядка и мощности накачки рамановского режима второго порядка. Увеличение мощности накачки светового пучка и уменьшение мощности затравочного света перемещает максимум мощности зондирующего импульса (показано стрелкой 252) далее по линии оптического волокна,

тогда как уменьшение мощности накачки светового пучка и увеличение мощности затравочного света сдвигает максимум мощности зондирующего импульса (показано стрелкой 252) назад по линии оптического волокна и уменьшает понижение, показанное стрелкой 250. Как объяснено выше, раскрываемое техническое решение использует управляемое рамановское рассеяние второго порядка для создания хорошо распределенного усиления, которое далеко распространяется в оптическое волокно. Управление как мощностью накачки рамановского светового пучка, так и мощностью рамановского затравочного импульса позволяет динамически регулировать распределение усиления для оптимального усиления зондирующего импульса и

10 обратно-рассеянного светового сигнала.

Рассмотрим теперь Фигуру 9, которая представляет собой график, показывающий изменения мощности различных рамановских режимов по длине оптического волокна с использованием сенсорной системы, описанной на Фигуре 7, и сенсорной системы предшествующего уровня техники, описанной на Фигуре 3, в общем обозначенный

15 ссылочным номером 270, созданный и функционирующий в соответствии с дополнительным вариантом осуществления раскрываемого технического решения; На Фигуре 9 описаны изменения мощности различных рамановских режимов при распространении вниз по оптическому волокну с использованием сенсорной системы, представленной на Фигуре 7, в предположении, что мощность обратно-рассеянного

20 сигнала относительно мала (как показано на Фигуре 8) и не истощает мощность рамановского режима первого порядка. Для сравнения, на Фигуре 9 также показано распределение мощности рамановского светового пучка накачки для линейного рамановского усиления с использованием сенсорной системы предшествующего уровня техники, представленной на Фигуре 3.

25 График 270 включает в себя ось X 272, показывающую расстояние в километрах по линии оптического волокна, и ось Y 274, показывающую мощность в ваттах. Линия 276 показывает пороговое значение 400 мВт для спонтанного рамановского рассеяния, выше которого спонтанное рамановское рассеяние в рамановском режиме первого порядка может уменьшить SNR. Линия 278 представляет мощность рамановского

30 режима первого порядка предшествующего уровня техники, линия 280 представляет мощность рамановского режима первого порядка раскрываемого технического решения, как показано на Фигуре 7, а линия 282 представляет мощность рамановского

режима накачки второго порядка раскрываемого технического решения, как показано на Фигуре 7. Как показано линией 282, исходная мощность светового пучка накачки рамановского режима второго порядка может превышать пороговое значение в 400 мВт, показанное линией 276, в пять раз (около 2 Вт), поскольку спонтанное рамановское рассеяние должно оставаться небольшим по сравнению с рамановский режимом первого порядка, а не низкая мощность обратно-рассеянных сигналов. Линия 282 показывает затухание светового пучка накачки рамановского режима второго порядка с константой затухания 0,3 дБ/км вследствие SRS. Кроме того, используя SRS, мощность передается от рамановского светового пучка накачки второго порядка к рамановскому затравочному свету первого порядка, как показано максимумом линии 280, показанному стрелкой 284. Максимум мощности рамановского режима первого порядка ограничен мощностью, показанной линией 276, для предотвращения спонтанного рамановского рассеяния. Начальные значения мощности рамановского затравочного режима (линия 280) и рамановского режима накачки (линия 282) определяют месторасположение и амплитуду пиковой мощности (стрелка 284) рамановского затравочного режима первого порядка. На Фигуре 9 рамановская затравочная мощность в 1 микроватт была выбрана таким образом, чтобы мощность рамановского затравочного режима первого порядка достигала максимальной мощности 400 мВт на расстоянии немного более 20 км по линии оптического волокна. Как упомянуто выше, с целью сравнения, мощность рамановского режима первого порядка для линейного усиления, как показано в сенсорной системе предшествующего уровня техники, представленной на Фигуре 3, показана в виде линии 278, имеет такую же пиковую мощность в 400 мВт, что и максимальная пиковая мощность затравочного света раскрытого изобретения и затухает по длине оптического волокна. Рамановское усиление, обеспечиваемое для зондирующего импульса, пропорционально мощности световых пучков накачки рамановского режима первого порядка, показанных в виде линий 278 (в случае предшествующего уровня техники) и 280 (в случае раскрываемого технического решения). Как видно на Фигуре 9, раскрытое изобретение имеет следующие преимущества по сравнению с предшествующим уровнем техники. Во-первых, пиковое усиление рамановского режима первого порядка находится далее в оптическом волокне. Во-вторых, кривая усиления имеет вытянутый хвост в оптическое волокно. Для справки: мощность, при которой рамановское усиление точно компенсирует затухание по линии оптического волокна в 0,2 дБ/км, составляет 60 мВт.

Несмотря на то, что с помощью сенсорных систем линейного рамановского усиления предшествующего уровня техники этот уровень мощности достигается на расстоянии около 30 км, раскрываемое техническое решение и схема усиления позволяют достичь такого усиления более чем на 50 км. Общее усиление, обеспечиваемое зондирующим импульсом в каждой точке от 15 км и далее, выше с использованием усиления затравочного света рамановского режима второго порядка раскрываемого технического решения. Даже более низкое усиление раскрываемого технического решения по сравнению с накачкой рамановского режима первого порядка предшествующего уровня техники ближе к детектору сенсорной системы, показанному стрелкой 288, имеет преимущество. Поскольку начальная мощность светового пучка накачки (линия 280) очень мала и не усиливается вблизи конца волокна, ближайшего к соединительному устройству (не показано), усиление зондирующего импульса возможно без уменьшения начальной пиковой мощности зондирующего импульса.

Рассмотрим теперь Фигуру 10, которая представляет собой график, показывающий усиление зондирующего импульса по линии оптического волокна с использованием рамановского усиления, описанного выше на Фигурах 7-9, в общем обозначенный ссылочным номером 300, созданного и функционирующего в соответствии с еще одним вариантом осуществления раскрываемого технического решения. График 300 был образован с использованием тех же параметров для оптико-волоконной сенсорной системы 200 (Фигура 7), которые использовались в моделировании, показанном выше на Фигуре 8. График 300 включает в себя ось X 302, показывающую расстояние в километрах по линии оптического волокна, и ось Y 304, показывающую мощность в милливаттах. Линия 306 показывает мощность зондирующего импульса при его распространении по линии оптического волокна без усиления, как описано выше в сенсорной системе предшествующего уровня техники, представленной на Фигуре 1. Линия 308 показывает мощность зондирующего импульса, усиленного затравочным светом рамановского режима первого порядка (не показано) с входной мощностью 22,5 нВт, так что мощность зондирующего импульса не превышает пороговое значение 5 мВт. Подобно линии 306, мощность линии 308 ослабляется с расстоянием, как показано стрелкой 310, однако, поскольку усиление в соответствии с раскрываемым техническим решением продвигает усиление по линии оптического волокна, мощность зондирующего импульса усиливается на некотором расстоянии по линии оптического волокна, и как показано стрелкой 312, достигает максимума около 50 км по линии

оптического волокна. В то время как мощность зондирующего импульса ослабляется примерно на 0,3 дБ/км в предшествующий уровень техники (линия 306), раскрываемое техническое решение позволяет мощности зондирующего импульса оставаться выше 10% от порогового значения (около 0,5 мВт) вплоть до расстояния более 100 км. Это специальное дифференциальное усиление зондирующего импульса и обратно-рассеянного сигнала невозможно при использовании технических решений предшествующего уровня техники. Система предшествующего уровня техники, представленная на Фигуре 3, не имеет показанной зоны досягаемости, в то время как система по предшествующему уровню техники, представленная на Фигуре 5, не имеет свободы управления с течением времени рамановским затравочным режимом, что необходимо для дифференциального усиления.

Рассмотрим теперь Фигуру 11, которая представляет собой график, показывающий теоретическую среднюю мощность обратно-рассеянных сигналов, которые достигают детектора, с учетом мощности зондирующего импульса, показанной на Фигуре 10, и обратно-рассеянного усиления, показанного на Фигуре 9, в зависимости от месторасположения обратно-рассеянного сигнала в оптическом волокне, по сравнению с предшествующим уровнем техники, в общем обозначенный ссылочным номером 320, созданных и функционирующих в соответствии с дополнительным вариантом осуществления раскрываемого технического решения. График 320 включает в себя ось X 322, представляющую расстояние по линии оптического волокна, из которого обратно-рассеянный сигнал распространяется в направлении детектора (не показано) в сенсорной системе, и ось Y 324, представляющую мощность по отношению к общему исходному уровню мощности. Линия 326 представляет среднюю мощность обратно-рассеянного сигнала, достигающего детектора без какого-либо усиления (как, например, в сенсорной системе предшествующего уровня техники, представленной на Фигуре 1). Линия 328 представляет среднюю мощность обратно-рассеянного сигнала, достигающего детектора, используя только рамановское усиление первого порядка (как, например, в сенсорной системе предшествующего уровня техники, представленной на Фигуре 3). Линия 330 представляет среднюю мощность обратно-рассеянного сигнала, достигающего детектора, используя рамановское усиление второго порядка, при этом рамановский затравочный режим генерируется FBG, формируемыми UFRL (как, например, в сенсорной системе предшествующего уровня техники, представленной на Фигуре 5), и накачивается только на конце оптического

волокна. Линия 332 представляет среднюю мощность обратно-рассеянного сигнала, достигающего детектора, используя схему усиления раскрываемого технического решения, при этом независимо управляют мощностью светового пучка накачки и затравочного импульса (как, например, в сенсорной системе, представленной на 5 Фигуре 7).

Линии 326, 328, 330 и 332, представленные на Фигуре 11, показаны в логарифмическом масштабе, разделенном на обратно-рассеянный сигнал, полученный в результате зондирующего импульса 5 мВт в точке оптического волокна, ближайшей к блоку формирования запросов (не показано). В случае отсутствия рамановского усиления (линия 326) обратно-рассеянный сигнал затухает по линии оптического волокна с 10 ослаблением 0,4 дБ/км, что связано с ослаблением 0,2 дБ/км для каждого зондирующего импульса и обратно-рассеянного сигнала. В случае рамановского усиления первого порядка (линия 328), имеет место начальное увеличение обратно-рассеянного сигнала примерно до 17 км, показанное стрелкой 340, и с этой точки 15 сигнал начинает затухать. В случае рамановского усиления второго порядка предшествующего уровня техники (линия 330) относительная мощность существенно ниже, чем даже в случае отсутствия усиления, вследствие низкой мощности зондирующего импульса, необходимой для того, чтобы избежать нелинейного порогового значения с линейным усилением, однако резкое увеличение начинается 20 около 20 км и превосходит обратно-рассеянный сигнал усиления первого порядка около 30 км (показано стрелкой 335). В раскрываемом техническом решении (линия 332) обратно-рассеянный сигнал первоначально уменьшается, но увеличивается примерно на 15 км, что показано стрелкой 334, и достигает пика около 50 км, показано стрелкой 336. Линия 338 показывает максимальную мощность обратно-рассеянного 25 сигнала, используя только рамановское усиление первого порядка. Как показано линией 338, мощность обратно-рассеянного сигнала, использующая рамановское усиление раскрываемого технического решения, остается выше, чем максимальная мощность обратно-рассеянного сигнала рамановского усиления первого порядка, приблизительно до 90 км. После рамановского усиления все обратно-рассеянные 30 сигналы затухают со скоростью 0,4 дБ/км, однако общая мощность обратно-рассеянного сигнала по линии оптического волокна согласно раскрываемому техническому решению остается более чем на 8 дБ больше, даже если обратно-рассеянный сигнал ослабевает по сравнению со схемами рамановского усиления

предшествующего уровня техники. Параметры, выбранные для моделирования, показанного на Фигуре 11, являются типичными значениями, таким образом представляя преимущества раскрываемого технического решения по сравнению с предшествующим уровнем техники.

- 5 Следует отметить, что раскрываемое техническое решение не ограничено параметрами, выбранными для образования графика 320, включая выбранные значения мощности зондирующего лазера, рамановского лазера с накачкой и рамановского затравочного лазера. Графики, показанные на Фигурах 8–11, были приведены просто в качестве примеров преимуществ и использования раскрываемого технического решения. В
- 10 соответствии с раскрываемым техническим решением, рамановское усиление с использованием усиления N -порядка используется для управления усилением, обеспечиваемым для зондирующего импульса в оптико-волоконной сенсорной системе, где N равно двум или более. В общем, в соответствии с раскрываемым техническим
- 15 решением используется рамановский лазер с накачкой с такой длиной волны, что резонанс рамановского рассеяния N -го порядка совпадает с длиной волны зондирующего света. Рамановские затравочные лазеры используются со значениями длины волны, близкими ко всем промежуточным резонансам рамановского рассеяния $N-1$ рамановского светового пучка накачки. Рамановские лазеры с накачкой могут быть
- 20 соединены с одним или обоими концами измерительного оптического волокна. Мощность в рамановских затравочных лазерах можно изменять в соответствии с мощностью зондирующего импульса, таким образом оптимизируя амплитуду усиления и распределение как для зондирующего импульса, так и для обратно-рассеянного
- 25 сигнала. Как упомянуто выше, например, затравочные лазеры более высокого порядка (которые могут быть одним затравочным лазером или более) могут быть выключены во время передачи зондирующего импульса, чтобы предотвратить рамановское усиление зондирующего импульса. В качестве альтернативы, значения мощности затравочного
- 30 света более высокого порядка могут быть установлены так, чтобы обеспечивать существенное усиление только на расстоянии, где мощность зондирующего импульса значительно ослаблена. В одном варианте осуществления изобретения все -
- рамановский лазер с накачкой и рамановские затравочные лазеры - распространяют излучение совместно с зондирующим лазером. В других вариантах осуществления, в которых доступен дальний конец измерительного волокна, рамановский лазер с накачкой и рамановские затравочные лазеры могут быть присоединены к обоим концам

измерительного волокна. Можно регулировать дифференциальное усиление для зондирующего импульса и обратно-рассеянного света, динамически изменяя мощность рамановского затравочного света, смещенного на один рамановский резонанс от зондирующего света. Таким образом, в одном варианте осуществления раскрываемого

5 технического решения возможно либо заменить все рамановские затравочные лазеры, кроме одного, либо заменить некоторые из рамановских затравочных лазеров, используя по меньшей мере одну пару FBG, расположенную на обоих концах (по одним на каждом конце) измерительного волокна (при условии, что они доступны), тем самым формируя URFL множественного порядка согласно раскрываемому

10 техническому решению. В таком варианте осуществления каждые FBG в каждой паре FBG должны иметь высокую отражательную способность на длинах волн с по меньшей мере 25%-ной эффективностью рамановского рассеяния резонансного рамановского рассеяния на порядки, при которых не генерируется рамановский затравочный свет, создаваемый рамановским затравочным лазером.

15 Как упомянуто выше, рамановское усиление более высокого порядка (то есть третьего порядка и выше) может использоваться, если зона усиления должна превышать 50 км. Например, рамановское усиление третьего порядка возможно с диодом накачки, длина волны которого такова, что резонанс рамановского рассеяния третьего порядка совпадает с длиной волны зондирующего импульса. Как уже упоминалось, в этом

20 случае можно использовать два рамановских затравочных лазера (не показано), первый из которых находится вблизи первого резонанса рамановского рассеяния диода накачки, а второй - вблизи второго резонанса рамановского рассеяния диода накачки. В другом варианте осуществления рамановского усиления более высокого порядка согласно раскрываемому техническому решению один из рамановских затравочных

25 лазеров может быть заменен парой FBG на концах оптического волокна, таким образом, используя уровни мощности рамановского лазера с накачкой третьего порядка и рамановского затравочного лазера для управления максимальной мощностью и месторасположением рамановского усиления для зондирующего импульса и/или обратно-рассеянного сигнала. Однако в этом варианте осуществления изобретения

30 требуется доступ к обоим концам оптического волокна.

Понятно, что раскрываемое техническое решение может использоваться в OTDR-системах, OFDR-системах, BOTDA-системах, BOTDR-системах, прямо-

распространяющих сенсорных системах, а также в обратно-распространяющих сенсорных системах.

Как показано на Фигуре 11, увеличение рамановского усиления второго порядка, как по предшествующему уровню техники (линия 330), так и согласно раскрываемому
5 техническому решению (линия 332), является меньше, чем увеличение рамановского усиления первого порядка (линия 328) для первых примерно 25 км оптического волокна. В соответствии с раскрываемым техническим решением усиление в этой области возможно следующим образом. Поскольку этот участок оптического волокна находится ближе всего к детектору сенсорной системы (не показано), можно добавить
10 дополнительный лазер с накачкой к оптико-волоконной сенсорной системе 200 (Фигура 7), соединенный с соединительным устройством 214 (Фигура 7), чтобы действовать как дополнительное усиление для доставки усиления на конец оптического волокна 222 (Фигура 7), ближайшего к соединительному устройству 214. В одном варианте осуществления изобретения этот дополнительный лазер с накачкой может
15 представлять собой бриллюэновский лазер с накачкой со сдвигом длины волны приблизительно 10 гигагерц (в данном документе сокращенно обозначено ГГц) по сравнению с длиной волны зондирующего лазера 204 (Фигура 7). Этот бриллюэновский лазер с накачкой образует распределенный усилитель для обратного распространения сигнала в измерительном волокне 222. Синхронизация фазы SBS
20 вызывает усиление режима сигнала, распространяющегося в направлении, противоположном направлению бриллюэновского лазера с накачкой. В этом варианте осуществления изобретения бриллюэновский лазер с накачкой может усиливать обратно-рассеянный сигнал в области вблизи конца оптического волокна ближе к детектору 210 (Фигура 7). В другом варианте осуществления раскрываемого
25 технического решения вместо использования бриллюэновского лазера с накачкой, если требуется лучшее SNR в области, ближайшей к детектору 210, например, на расстоянии около 25 км по линии оптического волокна от детектора, тогда правильная настройка параметров затравочного лазера рамановского режима первого порядка и лазера с накачкой рамановского режима второго порядка может привести к пиковому усилению
30 ближе к детектору. Как описано выше, увеличение мощности затравочного импульса и уменьшение мощности светового пучка накачки перемещает пиковое усиление назад по линии оптического волокна ближе к детектору. Эти параметры мощности могут изменяться динамически для увеличения SNR в различных областях по длине

оптического волокна. В одном варианте осуществления изобретения эти параметры мощности могут периодически изменяться, чтобы получать точное измерение измеряемой величины по всей длине оптического волокна. В еще одном варианте осуществления изобретения эти параметры мощности могут быть изменены по требованию, например, в случае возможного события или возмущения.

Как показано на Фигурах 8–11, возмущения могут быть обнаружены на расстоянии около 150 км, используя раскрываемое техническое решение, без использования внешних блоков усиления и при необходимости доступа только к одному концу оптического волокна. Размещая две оптико-волоконные сенсорные системы, как показано на Фигуре 7, вплотную друг к другу, каждая из которых направлена в разные стороны, в случаях практического применения на очень большие расстояния, центры управления или контрольные точки, которые обслуживают сенсорную систему, представленную на Фигуре 7, можно размещать только один раз каждые 300 км без необходимости усиления, обслуживания или центров обмена информацией между ними.

В одном варианте осуществления раскрываемого технического решения, как описано выше на Фигурах 7-11, поскольку используется рамановский затравочный лазер, раскрываемое техническое решение не основывается на отражениях от конца оптического волокна на длинах волн в пределах рамановского сдвига первого порядка, как предшествующий уровень техники, такой как в URFL-системах. В этом варианте осуществления изобретения доступ к обоим концам оптического волокна не требуется, и раскрываемое техническое решение можно использовать для достижения увеличения зоны усиления по линии оптического волокна с единого конца. Однако в еще одном варианте осуществления раскрываемого технического решения на любом конце оптического волокна могут быть размещены FBG. В этом варианте осуществления изобретения требуется доступ к обоим концам оптического волокна. Преимущество этого варианта осуществления изобретения состоит в том, что общая стоимость элементов оптико-волоконной сенсорной системы может быть более рентабельной, чем сенсорная система, показанная на Фигуре 7, однако требуется доступ к обоим концам оптического волокна.

Как объяснено выше, раскрываемое техническое решение обеспечивает динамическое управление месторасположением пикового усиления по линии измерительного

волокна, используя рамановское усиление N-го порядка. Однако следует отметить, что обнаруживаемые физические величины согласно раскрываемому техническому решению не ограничены обратно-рассеянным сигналом, обнаруженным детектором и проанализированным процессором. Например, детектор и процессор могут анализировать обнаруженный обратно-рассеянный сигнал на предмет рэлеевского рассеяния, рамановского рассеяния или бриллюэновского рассеяния, чтобы определить, произошло ли возмущение или событие по длине оптического волокна, или чтобы измерить свойство волокна или окружающей среды, такие как температура, волны сжатия, акустические волны или ультразвуковые волны. Процессор может анализировать полученную диаграмму интенсивности, фазу или частоту измеренного света или комбинацию этих атрибутов и физических величин. Анализируемый сигнал не обязательно должен быть рассеянным светом от зондирующего света, а может представлять собой саму зондирующую мощность, которая передается через измерительное волокно. Например, в бриллюэновской системе ОТДА сигналом является сам зондирующий свет. В таких применениях раскрываемого технического решения процессор анализирует пиковый отклик на вынужденное бриллюэновское рассеяние от бриллюэновского лазера с накачкой в зондирующем режиме в зависимости от частоты зондирующего лазера. В соответствии с раскрываемым техническим решением характеристики зондирующего лазера 204 (Фигура 7) должны выбираться в соответствии с характеристикой или физической величиной, подлежащей обнаружению, и типом рассеяния, который должен обнаруживаться детектором 210 (Фигура 7). Например, в случае бриллюэновского рассеяния, такого как в бриллюэновских OTDR-системах, зондирующий лазер 204 может выдавать импульсы, а детектор может обнаруживать импульсы или может сканировать частоту принятых импульсов. В рэлеевском рассеянии, например в рэлеевских OTDR-системах и OFDR-системах, для когерентного обнаружения ширина линии зондирующего лазера 204 должна быть в килогерцовом диапазоне или меньше, тогда как для некогерентного обнаружения ширина линии зондирующего лазера 204 должна быть в мегагерцовом диапазоне или меньше. В этих случаях зондирующий лазер 204 может представлять собой импульсный лазер или CW-лазер с модулятором (как показано на Фигуре 7), который способен управлять пропусканьем зондирующего лазера 204.

В соответствии с раскрываемым техническим решением рамановское усиление второго порядка может использоваться для дальнейшего смещения пикового усиления по

линии оптического волокна и для создания более равномерно распределенного усиления и обеспечивает улучшение по сравнению с современным распределенным усилением существующего уровня техники в распределенных или квази-распределенных оптико-волоконных сенсорных системах. По существу, раскрываемое

5 техническое решение может быть реализовано в широком диапазоне систем. Он применим в сенсорных системах, где обнаруженный сигнал является отраженным светом от единого датчика или в квази-распределенной системе с несколькими сенсорами, например, в матрице FBG. Оно может быть реализовано для распределенного рассеяния различного происхождения, таких как рэлеевское рассеяние

10 и бриллюэновское рассеяние. Это также может быть реализовано в конфигурациях, в которых измеряются обратно-рассеянные сигналы, отраженные сигналы или прямо-рассеянные сигналы. Поскольку раскрываемое техническое решение относится к линейному усилению в оптическом волокне, его можно использовать вместе с измерением различных свойств света, таких как амплитуда, фаза и частота.

15 Раскрываемое техническое решение не ограничивается каким-либо способом корреляции измерения с месторасположением. Как описано выше, зондирующий свет может быть импульсным, как в OTDR-системе, с качающейся частотой, как в OFDR-системе, или кодироваться другими известными способами. Раскрываемое техническое решение не зависит от используемого способа обнаружения и может работать с

20 когерентным обнаружением, некогерентным обнаружением, а также с прямым обнаружением. В некоторых вариантах осуществления раскрываемого технического решения может быть сконфигурировано для усиления зондирующего импульса путем накачки с любого конца оптического волокна, тогда как в других вариантах осуществления раскрываемого технического решения может быть сконфигурирована

25 для усиления зондирующего импульса путем накачки с обоих концов оптического волокна. В раскрываемом техническом решении скорости рамановского рассеяния регулируются мощностью рамановского лазера с накачкой и рамановского затравочного лазера. Как также описано выше, поскольку каждый рамановский режим регулируется отдельным лазером, в соответствии с раскрываемым техническим

30 решением можно изменять значения длины волны одного или обоих из перечисленного: рамановского лазера с накачкой и рамановского затравочного лазера - для увеличения или уменьшения рамановского рассеяния между режимами первого и второго порядка независимо от мощности в каждом из режимов.

Специалистам в данной области техники должно быть понятно, что раскрываемое техническое решение не ограничено тем, что было конкретно показано и описано выше. Скорее объем раскрываемого технического решения определяется только формулой изобретения, которая следует ниже.

Первоначально поданная формула изобретения

Формула изобретения

1. Способ обеспечения линейного рамановского усиления в оптико-волоконной сенсорной системе, включающий процедуры:
- 5 генерирования зондирующего света с зондирующей длиной волны;
- передачи указанного зондирующего света в оптическое волокно;
- генерирования по меньшей мере одного рамановского светового пучка накачки на соответствующей длине волны накачки и мощности накачки, при этом соответствующая длина волны накачки короче указанной зондирующей длины волны, так что
- 10 соответствующая разность частот между указанной соответствующей длиной волны накачки и указанной зондирующей длиной волны кратна сдвигу частоты, для которого коэффициент рамановского рассеяния составляет по меньшей мере 25% от коэффициента резонансного рамановского рассеяния;
- генерирования по меньшей мере одного рамановского затравочного света на
- 15 соответствующей затравочной длине волны и затравочной мощности, причем указанная соответствующая затравочная длина волны находится между указанной соответствующей длиной волны накачки и указанной зондирующей длиной волны;
- передачи по меньшей мере одного рамановского светового пучка накачки в указанное оптическое волокно;
- 20 передачи указанного по меньшей мере одного рамановского затравочного света в указанное оптическое волокно; и
- распространения указанного по меньшей мере одного рамановского светового пучка накачки, указанного рамановского затравочного света и указанного зондирующего света по линии указанного оптического волокна для достижения распределенного рамановского
- 25 усиления сигнального света, создаваемого указанным зондирующим светом, когда он распространяется по линии указанного оптического волокна.
2. Способ по п. 1, отличающийся тем, что указанный сигнальный свет выбран из списка, состоящего из перечисленного:
- отраженный свет;

усиленный свет;

обратно-рассеянный свет;

прямо-рассеянный свет;

рамановский рассеянный свет;

5 бриллюэновский рассеянный свет; и

рэлеевский рассеянный свет.

3. Способ по п. 1, отличающийся тем, что указанная соответствующая разность частот между указанной соответствующей длиной волны накачки и указанной зондирующей длиной волны является двойным частотным сдвигом, для которого коэффициент
10 рамановского рассеяния одного порядка составляет по меньшей мере 25% от указанного коэффициента резонансного рамановского рассеяния;

при этом соответствующая разность частот между указанной соответствующей затравочной длиной волны и указанной зондирующей длиной волны представляет собой частотный сдвиг, для которого указанный коэффициент рамановского рассеяния
15 составляет по меньшей мере 25% по сравнению с частотный сдвигом резонансного рамановского рассеяния; и при этом соответствующая разность частот между указанной соответствующей затравочной длиной волны и указанной соответствующей длиной волны накачки представляет собой частотный сдвиг, для которого указанный коэффициент
20 рамановского рассеяния составляет по меньшей мере 25% по сравнению с указанным частотным сдвигом резонансного рамановского рассеяния.

4. Способ по п. 1, отличающийся тем, что дополнительно содержит процедуру совместного распространения по меньшей мере одного из перечисленного: указанного по меньшей мере одного рамановского светового пучка накачки и указанного по меньшей мере одного рамановского затравочного света с указанным зондирующим светом.

25 5. Способ по п. 1, отличающийся тем, что дополнительно содержит процедуру обратного распространения по меньшей мере одного из перечисленного: указанного по меньшей мере одного рамановского светового пучка накачки и указанного по меньшей мере одного рамановского затравочного света - с указанным зондирующим светом.

6. Способ по п. 1, отличающийся тем, что дополнительно содержит процедуру двунаправленного распространения по меньшей мере одного из перечисленного: указанного по меньшей мере одного рамановского светового пучка накачки и указанного по меньшей мере одного рамановского затравочного света - с указанным зондирующим светом.
7. Способ по п. 1, отличающийся тем, что дополнительно содержит процедуру модуляции характеристики по меньшей мере одного из указанного: по меньшей мере одного рамановского затравочного света и указанного по меньшей мере одного рамановского светового пучка накачки в корреляции с изменениями мощности указанного зондирующего света.
8. Способ по п. 7, отличающийся тем, что указанную характеристику выбирают из списка, состоящего из перечисленного:
- мощность; и
- длина волны.
9. Способ по п. 7, отличающийся тем, что указанная процедура модуляции используется, чтобы избежать высокой мощности в указанном зондирующем свете, которая может вызвать возникновение по меньшей мере одного нелинейного явления по меньшей мере в одном месте указанного оптического волокна.
10. Способ по п. 1, отличающийся тем, что дополнительно содержит процедуру оптимизации характеристики указанного по меньшей мере одного рамановского затравочного света для получения усиления указанного сигнального света из определенного месторасположения по линии указанного оптического волокна.
11. Способ по п. 10, отличающийся тем, что указанную характеристику выбирают из списка, состоящего из:
- мощность; и
- длина волны.
12. Способ по п. 1, отличающийся тем, что дополнительно содержит процедуры:

обнаружения указанного сигнального света от указанного оптического волокна; и

анализа указанного обнаруженного сигнального света для получения информации, касающейся по меньшей мере одного из перечисленного: указанного оптического волокна и среды, в которой расположено указанное оптическое волокно.

- 5 13. Способ по п. 1, отличающийся тем, что дополнительно содержит процедуру распространения указанного по меньшей мере одного рамановского светового пучка накачки, указанного по меньшей мере одного рамановского затравочного света и
- 10 указанного зондирующего света по линии указанного оптического волокна через по меньшей мере одну волоконную брэгговскую решетку (FBG), соединенную с каждым
- концом указанного оптического волокна, причем каждая из указанных по меньшей мере одной FBG имеет высокую отражательную способность при значениях длины волны с по
- меньшей мере 25% эффективностью рамановского рассеяния при резонансном рамановском рассеянии, на порядках, при которых указанный по меньшей мере один рамановский затравочный свет не генерируется.
- 15 14. Способ по п. 1, отличающийся тем, что дополнительно содержит процедуру применения дополнительного усиления для доставки усиления на конец указанного оптического волокна, на который передаются указанный по меньшей мере один рамановский световой пучок накачки и указанный по меньшей мере один рамановский затравочный свет.
- 20 15. Способ по п. 14, отличающийся тем, что указанное дополнительное усиление представляет собой бриллюэновское усиление.
16. Способ по п. 1, отличающийся тем, что указанный по меньшей мере один рамановский световой пучок накачки имеет мощность в диапазоне от 50 милливатт до 10 Вт и рамановскую смещенную длину волны от 20 до 30 терагерц от указанной зондирующей
- 25 длины волны, и при этом указанный по меньшей мере один рамановский затравочный свет имеет мощность менее 10 милливатт и рамановскую смещенную длину волны от 7 до 16 терагерц от указанной зондирующей длины волны.
17. Способ по п. 1, отличающийся тем, что указанный зондирующий свет выбран из списка, состоящего из перечисленного:
- 30 свет в режиме непрерывной волны; и

импульсный свет.

18. Оптико-волоконная сенсорная система, использующая линейное рамановское усиление высокого порядка, содержащая:

5 источник зондирующего излучения, содержащий зондирующий лазер, для генерирования зондирующего света с зондирующей длиной волны;

оптическое волокно, с которым оптически связан указанный зондирующий свет; сепаратор для отделения светового сигнала, исходящего из указанного оптического волокна, от света, соединенного с указанным оптическим волокном;

10 детектор, оптически соединенный с указанным сепаратором, для обнаружения указанного сигнального света;

процессор, соединенный с указанным детектором, для анализа указанного обнаруженного сигнального света;

15 по меньшей мере один рамановский затравочный лазер для генерирования соответствующего рамановского затравочного света с соответствующей затравочной длиной волны и затравочной мощностью;

по меньшей мере, один рамановский лазер с накачкой для генерирования соответствующего рамановского светового пучка накачки с соответствующей длиной волны накачки и мощностью накачки; и

20 по меньшей мере одно соединительное устройство для соединения указанного по меньшей мере одного рамановского лазера с накачкой и по меньшей мере одного рамановского затравочного лазера с указанным оптическим волокном,

при этом указанная соответствующая затравочная длина волны находится между указанной соответствующей длиной волны накачки и указанной зондирующей длиной волны; и

25 при этом указанный соответствующий рамановский световой пучок накачки, указанный соответствующий рамановский затравочный свет и указанный зондирующий свет распространяются по линии указанного оптического волокна для достижения распределенного рамановского усиления указанного сигнального света, создаваемого

указанным зондирующим светом, когда он распространяется по линии указанного оптического волокна.

19. Оптико-волоконная сенсорная система по п. 18, отличающаяся тем, что зондирующий свет передают в указанное оптическое волокно через указанный сепаратор и указанный по меньшей мере одно соединительное устройство;
20. Оптико-волоконная сенсорная система по п. 18, отличающаяся тем, что указанный источник зондирующего излучения дополнительно содержит модулятор, соединенный с указанным зондирующим лазером, для модуляции указанного зондирующего света.
21. Оптико-волоконная сенсорная система по п. 18, отличающаяся тем, что дополнительно содержит по меньшей мере одну волоконную брэгговскую решетку (FBG), соединенную с каждым концом указанного оптического волокна, причем каждая указанная по меньшей мере одна FBG имеет высокую отражательную способность при значениях длины волны с по меньшей мере 25% эффективностью рамановского рассеяния при резонансном рамановском рассеянии, на порядках, при которых указанный соответствующий рамановский затравочный свет не генерируется.
22. Оптико-волоконная сенсорная система по п. 18, отличающаяся тем, что указанный по меньшей мере один рамановский лазер с накачкой и указанный по меньшей мере один рамановский затравочный лазер соединены с обоими концами указанного оптического волокна.
23. Оптико-волоконная сенсорная система по п. 18, отличающаяся тем, что указанный сигнальный свет, разделенный указанным сепаратором, оптически объединяется с указанным зондирующим светом для обеспечения когерентного обнаружения.
24. Оптико-волоконная сенсорная система по п. 18, отличающаяся тем, что указанный сигнальный свет коррелируется с указанным зондирующим светом.
25. Оптико-волоконная сенсорная система по п. 18, отличающаяся тем, что указанный сепаратор 20 выбран из списка, состоящего из перечисленного:
- циркулятор;
- соединительное устройство; и

фильтр мультиплексора с разделением по длине волны (WDM).

26. Оптико-волоконная сенсорная система по п. 18, отличающаяся тем, что указанный сигнальный свет выбран из списка, состоящего из перечисленного:

отраженный свет;

5 усиленный свет;

обратно-рассеянный свет;

прямо-рассеянный свет;

рамановский рассеянный свет;

бриллюэновский рассеянный свет; и

10 рэлеевский рассеянный свет.

27. Оптико-волоконная сенсорная система по п. 18, отличающаяся тем, что указанная соответствующая длина волны накачки является такой, что соответствующая разность частот между указанной соответствующей длиной волны накачки и указанной зондирующей длиной волны является двойным частотным сдвигом, для которого коэффициент рамановского рассеяния составляет по меньшей мере 25% коэффициента резонансного рамановского рассеяния; и

15

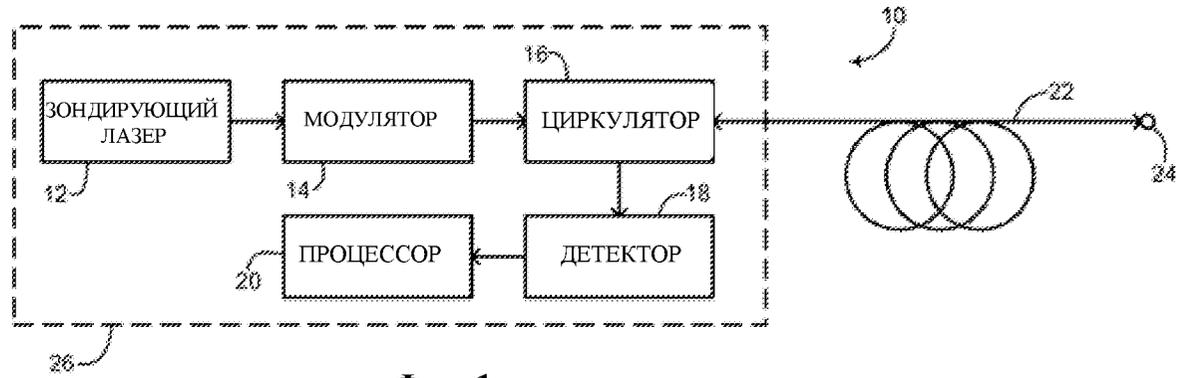
при этом указанная соответствующая затравочная длина волны такова, что соответствующая разность частот между указанной соответствующей затравочной длиной волны и указанной зондирующей длиной волны, и соответствующая разность частот между указанной соответствующей длиной волны накачки и указанной соответствующей затравочной длиной волны, обе являются частотным сдвигом, для которого указанный коэффициент рамановского рассеяния составляет по меньшей мере 25% от указанного коэффициента резонансного рамановского рассеяния.

20

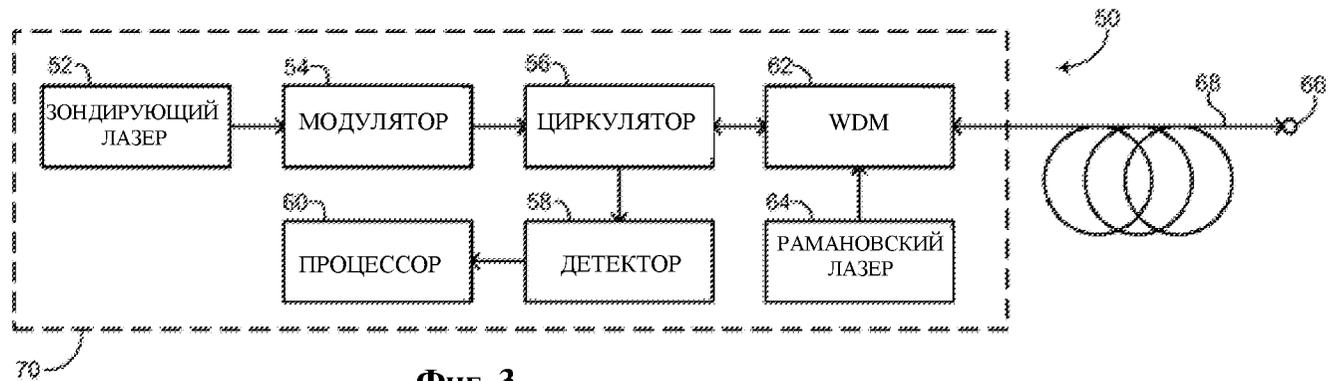
28. Оптико-волоконная сенсорная система по п. 18, отличающаяся тем, что дополнительно содержит дополнительный распределенный усилитель, соединенный с указанным по меньшей мере одним соединительным устройством, для обеспечения усиления на конце указанного оптического волокна.

25

29. Оптико-волоконная сенсорная система по п. 18, отличающаяся тем, что указанный дополнительный распределенный усилитель представляет собой бриллюэновский усилитель.
30. Оптико-волоконная сенсорная система по п. 18, отличающаяся тем, что указанный соответствующий рамановский световой пучок накачки имеет мощность в диапазоне от 50 милливатт до 10 Вт и рамановскую смещенную длину волны от 20 до 30 терагерц от указанной зондирующей длины волны, и при этом указанный соответствующий рамановский затравочный свет имеет мощность менее 10 милливатт и рамановскую смещенную длину волны от 7 до 16 терагерц от указанной зондирующей длины волны.
31. Оптико-волоконная сенсорная система по п. 18, отличающаяся тем, что дополнительно содержит лазер с накачкой, соединенный с концом указанного оптического волокна напротив конца указанного источника зондирующего излучения, соединен с указанным оптическим волокном, для генерирования светового пучка накачки с длиной волны накачки,
- при этом указанный сепаратор дополнительно предназначен для передачи указанного светового пучка накачки в указанное оптическое волокно;
- при этом указанный сигнальный свет является указанным зондирующим светом, усиленным указанным световым пучком накачки; и
- при этом по меньшей мере один из перечисленного: указанный источник зондирующего излучения и указанный лазер с накачкой - пульсирует, чтобы обладать пространственной разрешающей способностью.
32. Оптико-волоконная сенсорная система по п. 18, отличающаяся тем, что указанное по меньшей мере одно соединительное устройство представляет собой фильтр мультиплексора с разделением по длине волны (WDM).
33. Оптико-волоконная сенсорная система по п. 18, отличающаяся тем, что указанная соответствующая затравочная длина волны и затравочная мощность, а также указанная соответствующая длина волны накачки и мощность накачки выбираются таким образом, чтобы рамановское усиление указанного зондирующего света и указанного сигнального света, исходящего из указанного оптического волокна, происходило на требуемом месторасположении по линии указанного оптического волокна.



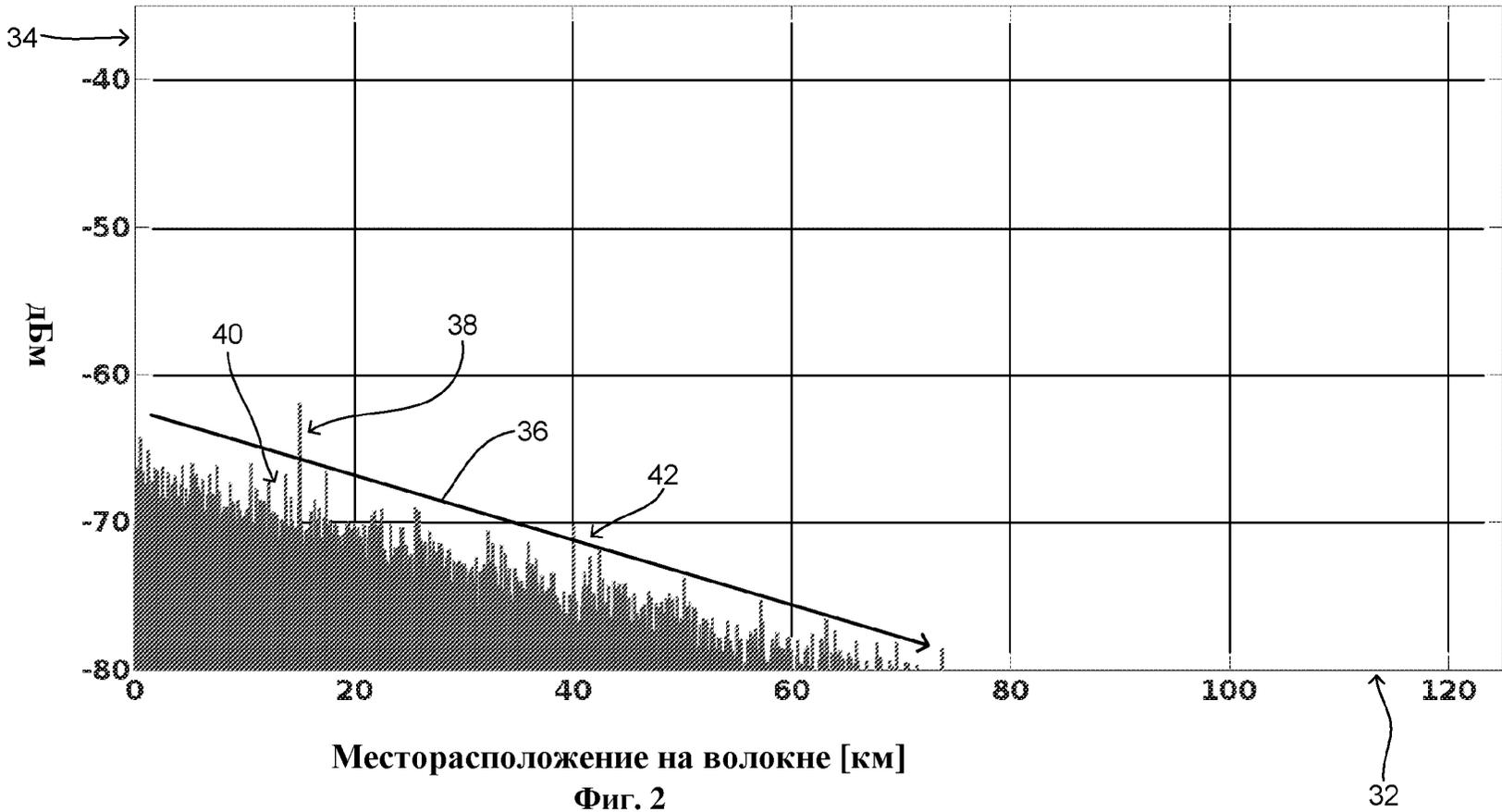
Фиг. 1
Предшествующий уровень техники



Фиг. 3
Предшествующий уровень техники

30

Разница сигналов OTDR – логарифмический масштаб



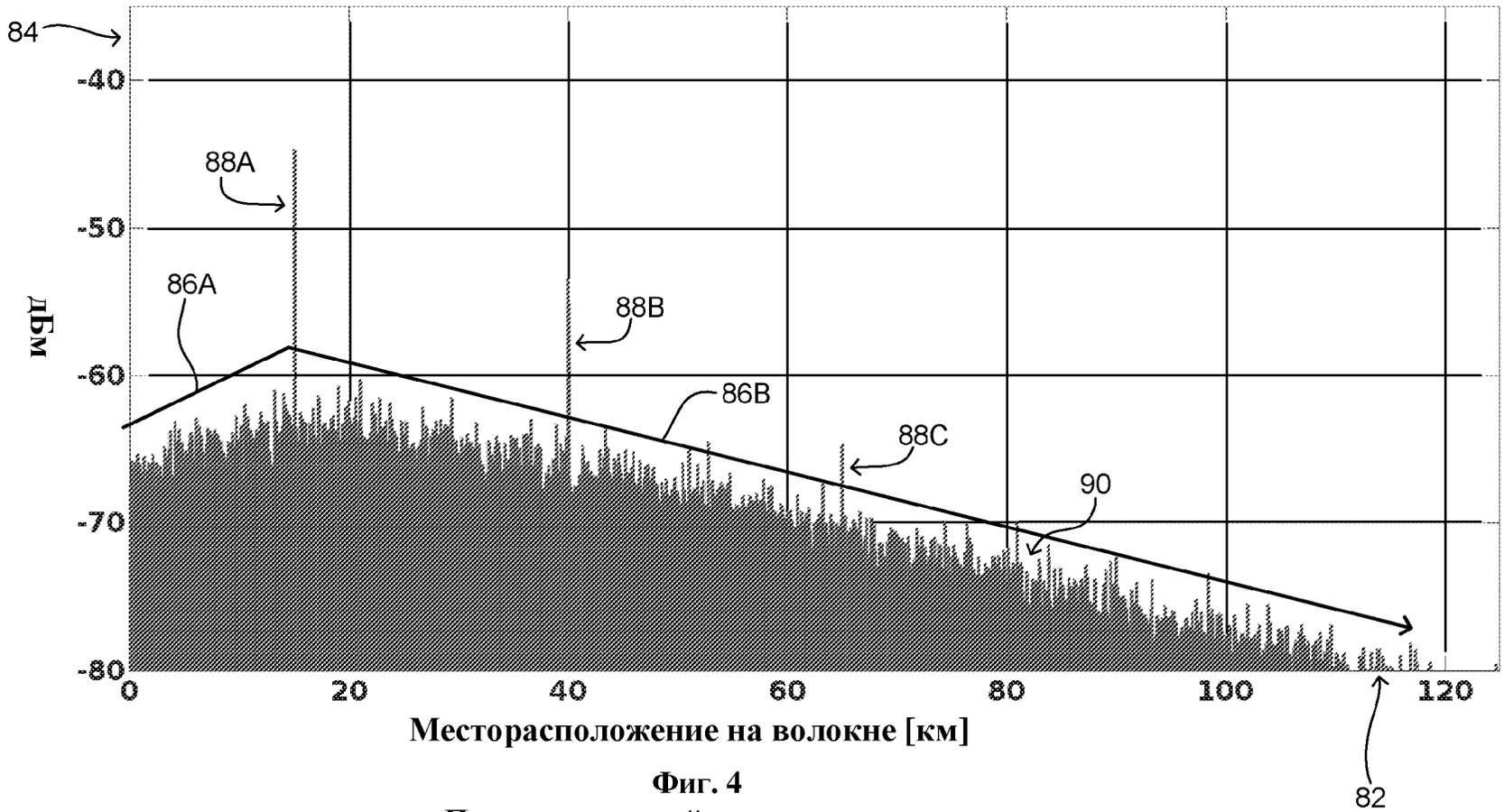
Месторасположение на волокне [км]

Фиг. 2

Предшествующий уровень техники

80 →

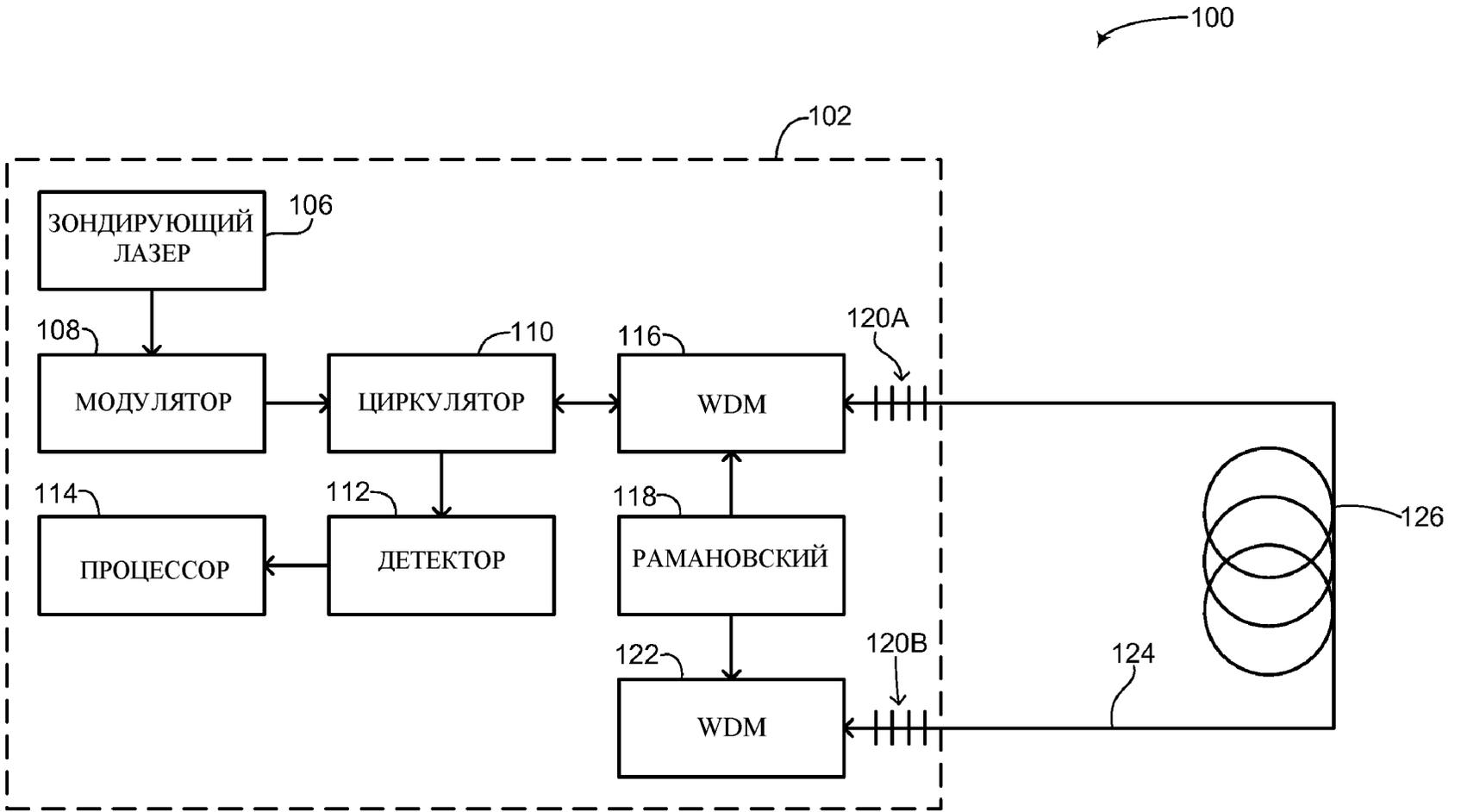
Разница сигналов OTDR – логарифмический масштаб



Месторасположение на волокне [км]

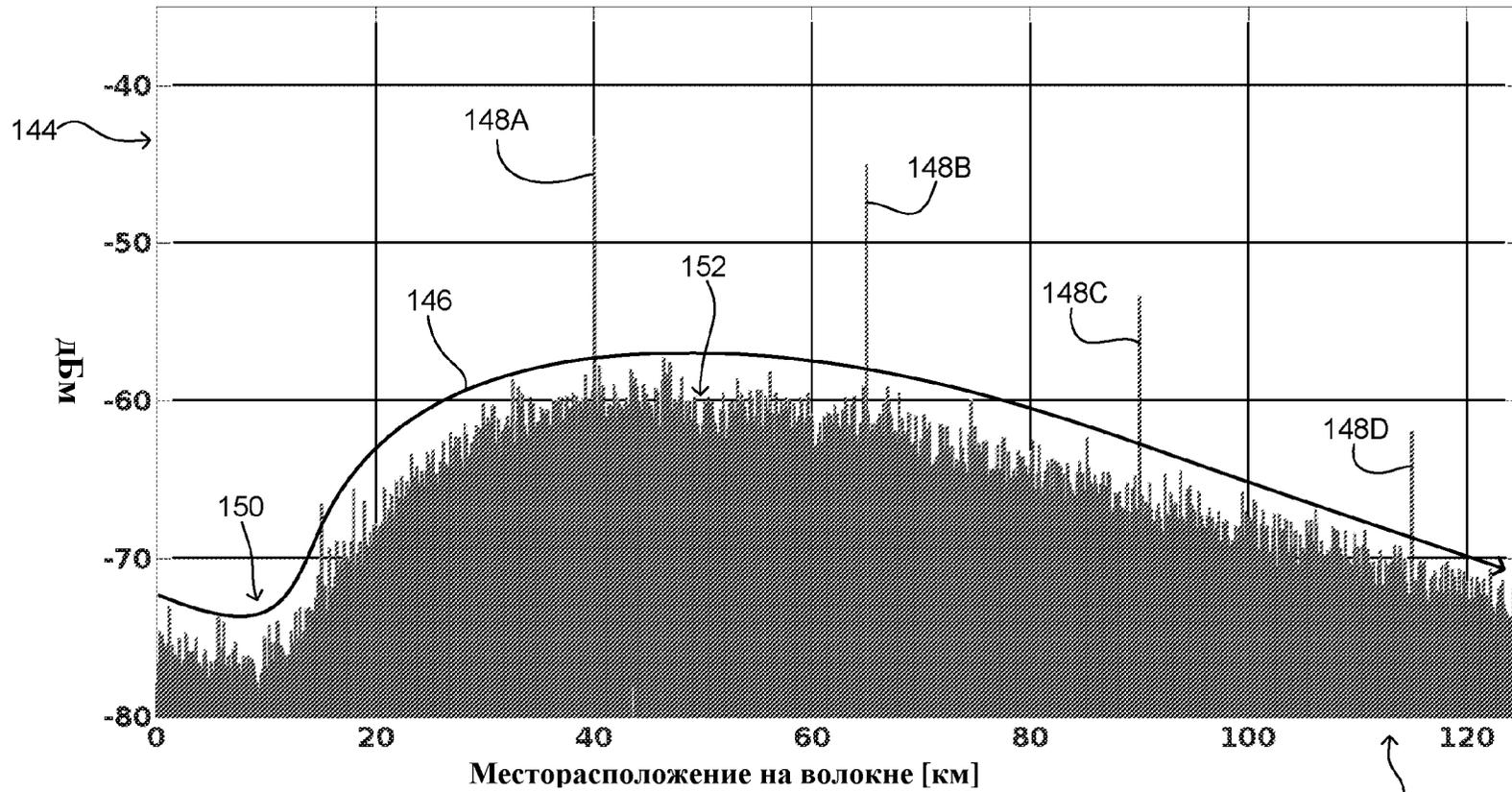
Фиг. 4

Предшествующий уровень техники

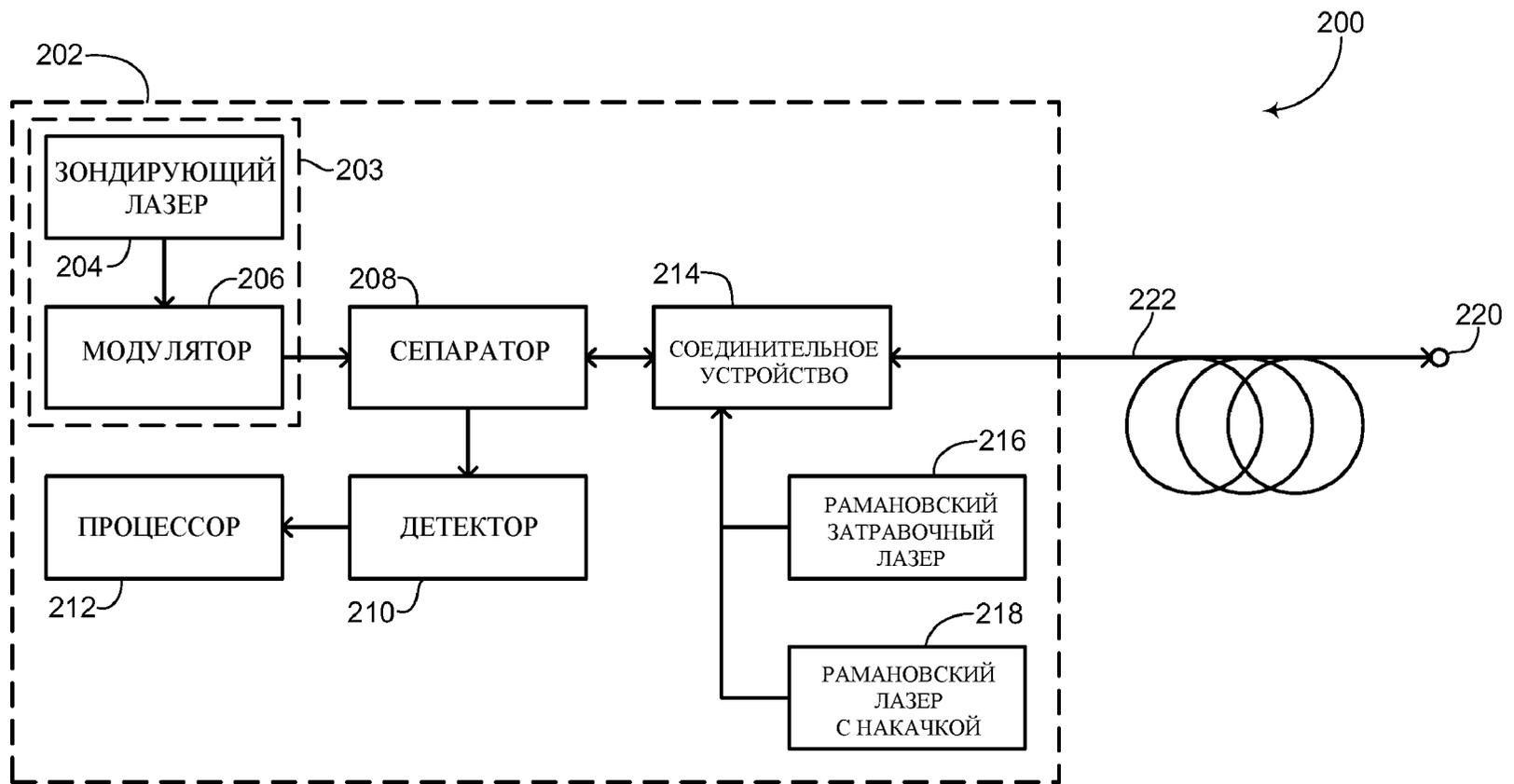


Фиг. 5
Предшествующий уровень техники

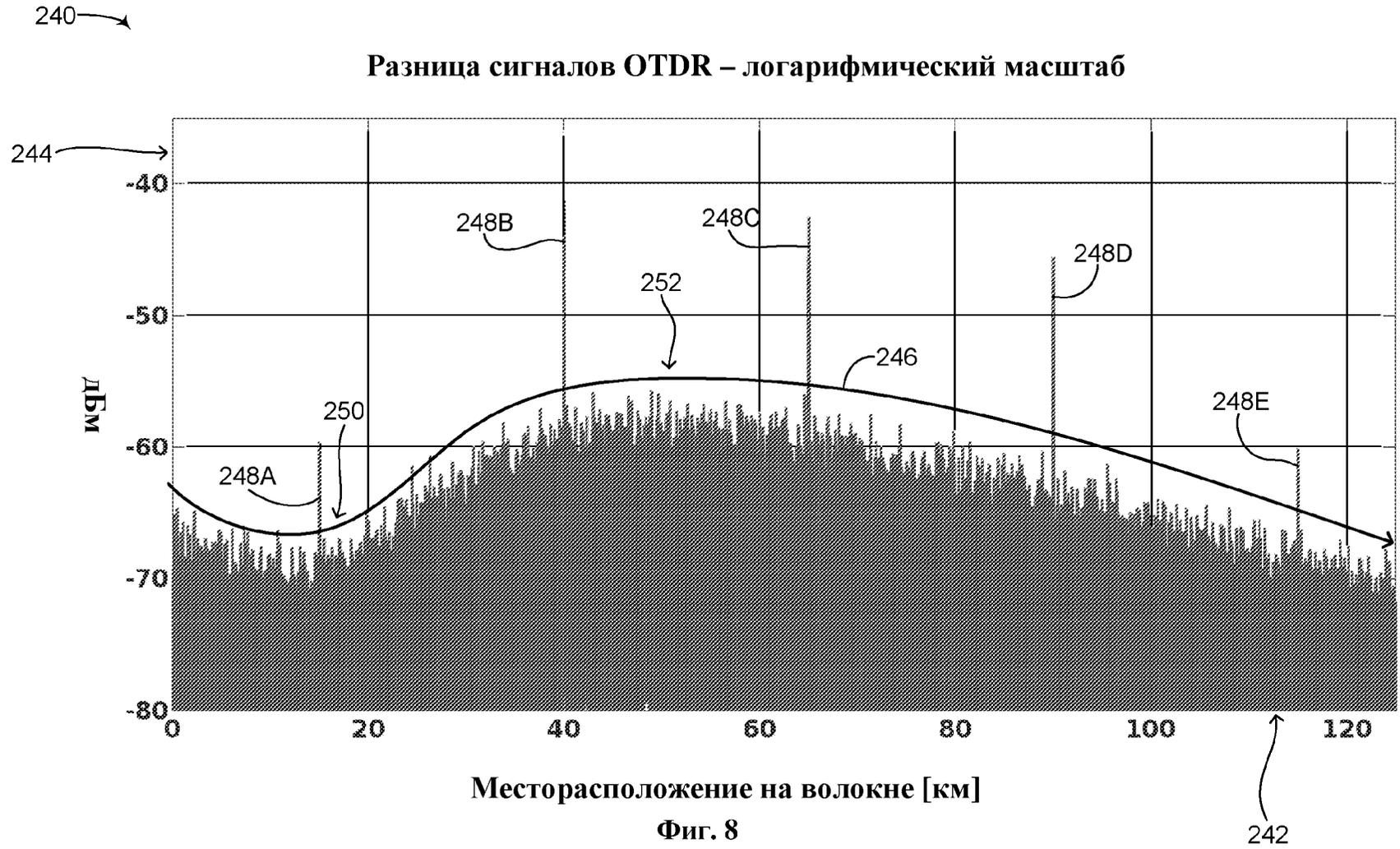
Разница сигналов OTDR – логарифмический масштаб



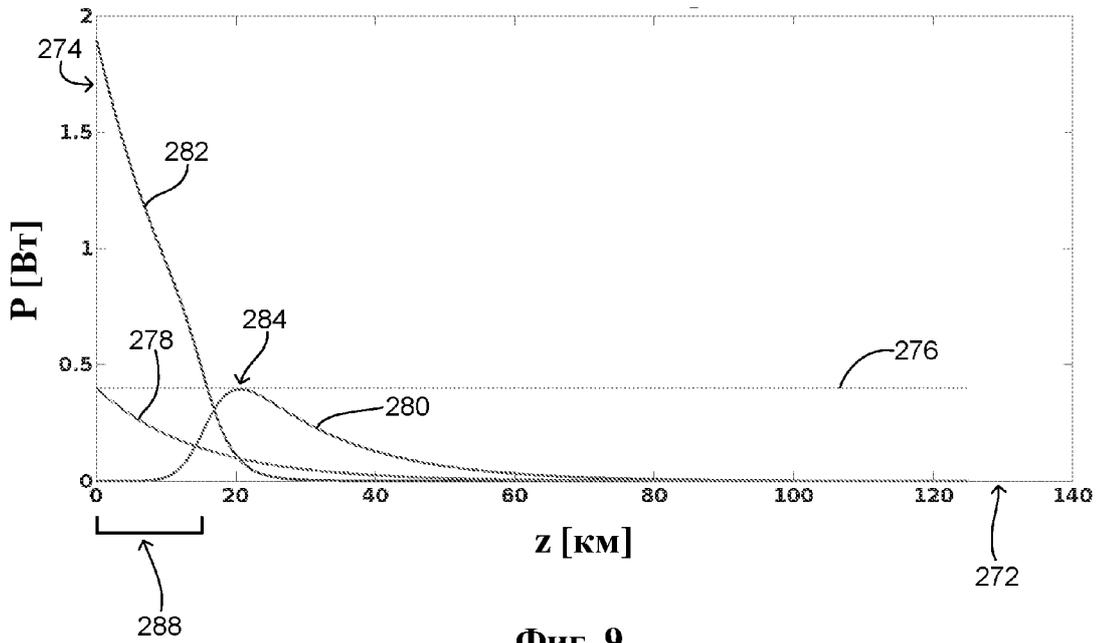
Фиг. 6
Предшествующий уровень техники



Фиг. 7

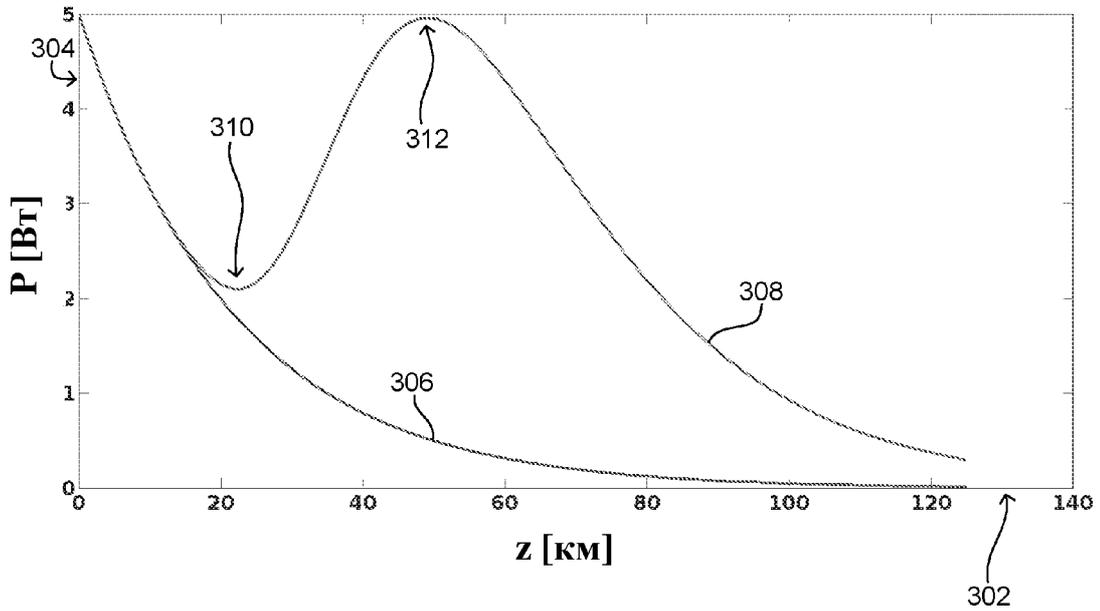


Распределение мощности по линии волокна



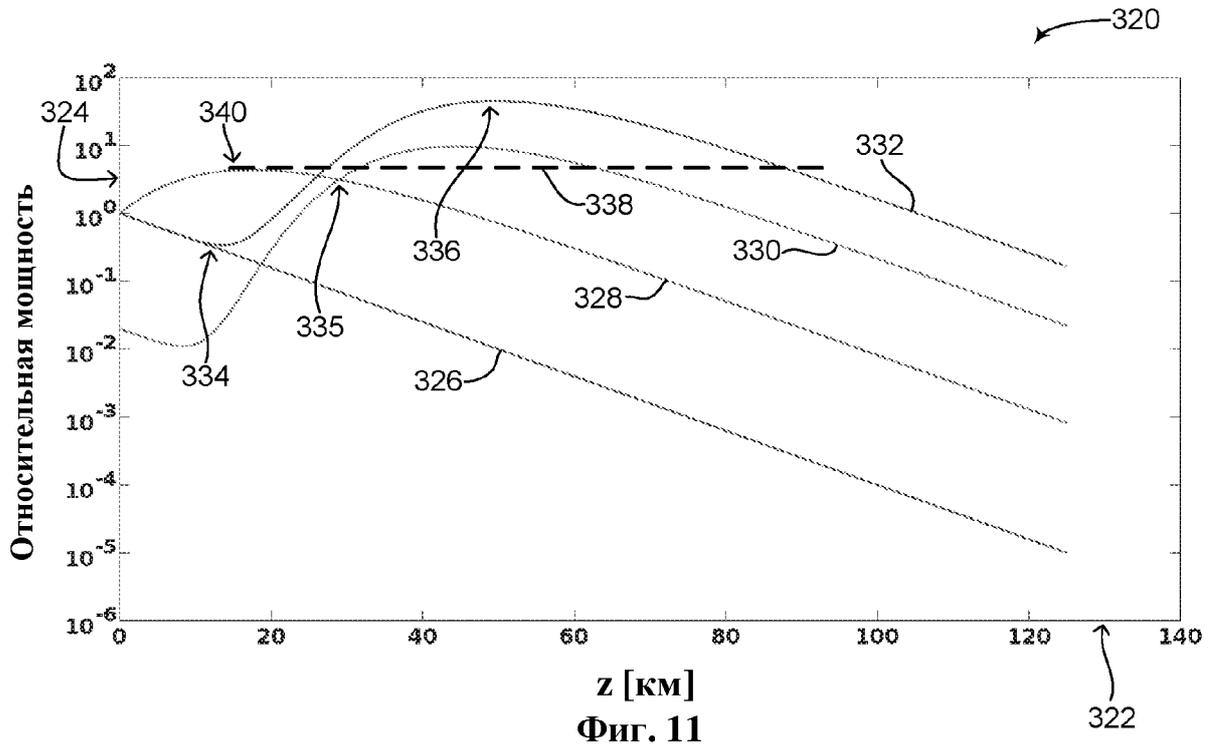
Фиг. 9

Зондирующая мощность в волокне



Фиг. 10

Относительная мощность vs. Месторасположение рассеяния



Фиг. 11