



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-1-70-78>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.391.63:681.7.068

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МУЛЬТИДАТЧИКА НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

А.О. ЗЕНЕВИЧ, С.В. ЖДАНОВИЧ, Г.В. ВАСИЛЕВСКИЙ, А.А. ЛАГУТИК,
Т.Г. КОВАЛЕНКО, Т.М. ЛУКАШИК

Белорусская государственная академия связи (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 21 сентября 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. В работе представлены результаты исследований мультидатчиков на основе оптического волокна, принцип работы которых заключается в изменении условий распространения оптического излучения в оптическом волокне в местах формирования макроизгибов в точках воздействия. Наличие макроизгибов приводит к появлению дополнительного ослабления мощности оптического излучения, распространяющегося по оптическому волокну. Использовалось одномодовое оптическое волокно с параметрами, которые поддерживаются многочисленными производителями и соответствуют рекомендации МСЭ-Т G.655. Измерения проводились для четырех длин волн оптического излучения (1310, 1490, 1550, 1625 нм), соответствующих окнам прозрачности спектра оптических потерь оптоволокна. Методами оптической рефлектометрии определено, что величина ослабления оптического излучения каждого макроизгиба, формируемого в точке воздействия мультидатчика, не зависит от количества одновременно сформированных макроизгибов, а также не зависит от расположения точки воздействия по длине мультидатчика. Экспериментально определены зависимости ослабления мощности оптического излучения, вносимого макроизгибами оптического волокна, от радиуса, длины или угла макроизгибов, формируемых в точках воздействия мультидатчика. Полученные зависимости также позволяют определить оптимальные параметры формируемых макроизгибов мультидатчика для получения максимального диапазона изменения ослабления для каждого значения длины волны. Определены величины минимального расстояния между точками воздействия, максимального количества точек воздействия и оптимальных величин радиуса и угла макроизгиба оптического волокна в точках воздействия. Полученные результаты дают основания продолжить разработку мультидатчиков, которые позволяют одновременно по одному оптическому волокну получать информацию о параметрах с нескольких точек воздействия, которые размещены по этому оптоволокну.

Ключевые слова: оптическое волокно, макроизгиб, оптическое излучение, рефлектометр, мультидатчик, ослабление, датчик.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Исследования проводились при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (№ T20M-082).

Для цитирования. Зеневич А.О., Жданович С.В., Василевский Г.В., Лагуттик А.А., Коваленко Т.Г., Лукашик Т.М. Исследование характеристик мультидатчика на основе оптического волокна. Доклады БГУИР. 2021; 19(1): 70-78.

RESEARCH OF MULTISENSOR CHARACTERISTICS BASED ON OPTICAL FIBER

ANDREI O. ZENEVICH, SIARHEI V. ZHDANOVICH, HERMAN V. VASILEVSKY,
ANASTASIA A. LAGUTIK, TATIANA G. KOVALENKO, TATIANA M. LUKASHIK

Belarusian State Academy of Communications (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 21 September 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. The research results of multisensors based on optical fiber, the principle of which is to change the conditions of propagation of optical radiation in the optical fiber in the places where macro-bends are formed at the points of impact, are presented in the paper. The formation of macro-bends leads to an additional attenuation of the power of optical radiation propagating through the optical fiber. A single-mode optical fiber was used with the parameters, which are supported by numerous manufacturers and comply with the recommendations of ITU-T G.655. The measurements were carried out for four wavelengths of optical radiation (1310, 1490, 1550, 1625 nm), corresponding to the transparency windows of the optical loss spectrum of the optical fiber. Using optical reflectometry methods, it was determined that the amount of attenuation of optical radiation of each macro-bend formed at the point of action of the multisensor does not depend on the number of simultaneously formed macro-bends and also does not depend on the location of the point of action along the length of the multisensor. The dependences of the attenuation of the optical radiation power introduced by the macro-bends of the optical fiber on the radius, length, or angle of the macro-bends formed at the multisensor impact points are determined experimentally. The obtained dependences also allow one to determine the optimal parameters of the formed macro-bends of the multisensor to obtain the maximum range of attenuation change for each value of the wavelength. The values of the minimum distance between the impact points, the maximum number of impact points and the optimal values of the radius and angle of the optical fiber macro-bend at the impact points are determined. The results obtained provide opportunities to continue the development of multisensors that allow us to receive information about parameters from several impact points, that are located on a single optical fiber, simultaneously.

Keywords: optical fiber, macro-bend, optical radiation, reflectometer, multisensor, attenuation, sensor.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. This work was supported by the grant T20M-082 of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research.

For citation. Zenevich A.O., Zhdanovich S.V., Vasilevsky H.V., Lagutik A.A., Kovalenko T.G., Lukashik T.M. Research of multisensor characteristics based on optical fiber. Doklady BGUIR. 2021; 19(1): 70-78.

Введение

Принцип работы мультидатчика на основе оптического волокна представлен в [1] и заключается в изменении условий распространения оптического излучения в оптическом волокне в местах формирования макроизгибов в точках воздействия, что приводит к появлению дополнительного ослабления мощности оптического излучения, распространяющегося по оптическому волокну. Мультидатчик на основе оптического волокна – это область оптического волокна, где в точках воздействия формируется несколько макроизгибов оптического волокна, что позволяет регистрировать несколько входных величин. В работах [2, 3] показана возможность создания достаточно простых в реализации датчиков на основе одного макроизгиба оптического волокна. Мультидатчик позволяет одновременно по одному оптическому волокну получать информацию о параметрах с нескольких точек воздействия, которые размещены по этому оптоволокну. Целью исследований является определение характеристик мультидатчика на основе оптического волокна. Установлены зависимости ослабления мощности оптического излучения, вносимого макроизгибами,

от радиуса, длины или угла макроизгибов, формируемых в точках воздействия мультидатчика. Определены величины минимального расстояния между точками воздействия, максимального количества точек воздействия и оптимальных параметров макроизгиба оптического волокна в точках воздействия.

Методика измерений и применяемое оборудование

При проведении измерений использовались поверенные и калиброванные приборы: оптический рефлектометр МТР 6000, оптический рефлектометр FX 300, оптический тестер ОТ 3-1, термогигрометр ИВА-6Н-Д. Измерения проводились в соответствии с требованиями, определяемыми ГОСТ ISO/IEC 17025-2019, контролировались условия окружающей среды: температура от 20 до 25 °С, влажность до 70 %, атмосферное давление от 975 до 1025 гПа. Для создания мультидатчика использовалось одномодовое оптическое волокно с параметрами, соответствующими рекомендации МСЭ-Т G.655.

Было проведено измерение ослабления, вносимого макроизгибами в точках воздействия мультидатчика, для четырех длин волн оптического излучения (1310, 1490, 1550, 1625 нм), соответствующих окнам прозрачности спектра оптических потерь оптоволоконной G.655. Радиус исследуемых макроизгибов оптического волокна R изменялся в диапазоне от 5,2 до 12,5 мм, при меньших радиусах макроизгиба оптическое волокно может быть повреждено, а при больших радиусах ослабление мощности оптического излучения очень мало. Исследования проводились при углах макроизгиба оптического волокна Q в пределах от $\pi/2$ до 2π рад и соответственно при длинах дуги макроизгиба оптического волокна L в пределах от 8,24 до 78,5 мм. Количество точек воздействия мультидатчика – до 9, количество измерений ослабления в каждой точке воздействия – до 14 при каждом сочетании параметров эксперимента.

Для исследования величины ослабления оптического излучения, вносимого в точках воздействия каждым макроизгибом мультидатчика, использовались рефлектометры, проводились измерения с двух сторон оптического волокна (FC-коннектор со стороны А и FC-коннектор со стороны В). При проведении измерений использовалась минимально возможная длительность зондирующих импульсов оптического рефлектометра 3 нс, что позволяет наиболее точно определить параметры мультидатчика.

Для исследования величины ослабления оптического излучения во всей волоконно-оптической линии использовался оптический тестер. К FC-коннектору со стороны А подключались источники излучения оптического тестера, предназначенные для формирования стабильных регулируемых уровней оптической мощности с длинами волн: 1310, 1490, 1550 и 1625 нм. К FC-коннектору со стороны В подключался оптоэлектронный преобразователь оптического тестера, предназначенный для измерения оптической мощности.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1, а представлена типичная рефлектограмма для случая формирования в двух точках воздействия макроизгибов оптического волокна с радиусом $R = 9$ мм и углом макроизгиба $Q = \pi$ рад при длине волны оптического излучения лазера $\lambda = 1625$ нм. На рис. 1, б – увеличенный фрагмент области с макроизгибами оптоволоконной линии в точках воздействия. На рефлектограмме области макроизгибов видны как «ступеньки». Каждый макроизгиб оптоволоконной линии имеет величину ослабления оптического излучения a_s .

Динамический диапазон области формирования точек воздействия (макроизгибов) мультидатчика D_W равен разности величины динамического диапазона рефлектометра D и ослабления, вносимого участками оптоволоконной линии a_{F1} и a_{F2} до и после области формирования макроизгибов: $D_W = D - a_{F1} - a_{F2}$. Динамический диапазон рефлектометров FX 300 и МТР 6000 при длительности зондирующих импульсов 3 нс для диапазона расстояния 5 км в зависимости от длины волны оптического излучения составляет 15–20 дБ.

Максимальное количество точек воздействия мультитатчика, ограниченное динамическим диапазоном рефлектометра N_{PDmax} , можно определить как $N_{PDmax} = D_W / \sum_{i=1}^n a_{Si}$,

где a_{Si} – ослабление на каждом макроизгибе мультитатчика. На рис. 1, *b* показано, что для макроизгиба оптического волокна на рефлектограмме отображается мертвая зона, соответствующая неотражающей неоднородности, которая имеет длину L_S . Таким образом, L_S определяет минимально разрешимое расстояние между двумя макроизгибами. Когда расстояние между макроизгибами меньше L_S , их отображения на рефлектограмме перекрываются. Величина L_S зависит от длительности зондирующих импульсов рефлектометра, разрешения по расстоянию рефлектометра, метода усреднения и обработки отраженного сигнала рефлектометром, а также величины ослабления оптического излучения, вносимого макроизгибом a_S . Установлено, что при изменении a_S пропорционально изменяется L_S , при увеличении a_S от 0,2 до 5 дБ L_S увеличивается от 4 до 9 м.

Расстояние между точками воздействия мультитатчика (макроизгибами оптического волокна) L_P можно представить как сумму длин L_S и L_R (длина участка на рефлектограмме, где нет проявления мертвой зоны макроизгиба). Минимальное расстояние между точками воздействия мультитатчика, которое позволяет их различить на рефлектограмме, $L_{Pmin} = L_S + L_{Rmin}$, где L_{Rmin} зависит от разрешения по расстоянию рефлектометра (интервал дискретизации сигнала обратного рассеяния) и допустимой абсолютной погрешности рефлектометра. Таким образом, максимальное количество точек воздействия мультитатчика с длиной L_{MD} можно определить как $N_{PLmax} = L_{MD} / L_{Pmin}$ (необходимо учитывать N_{PDmax}).

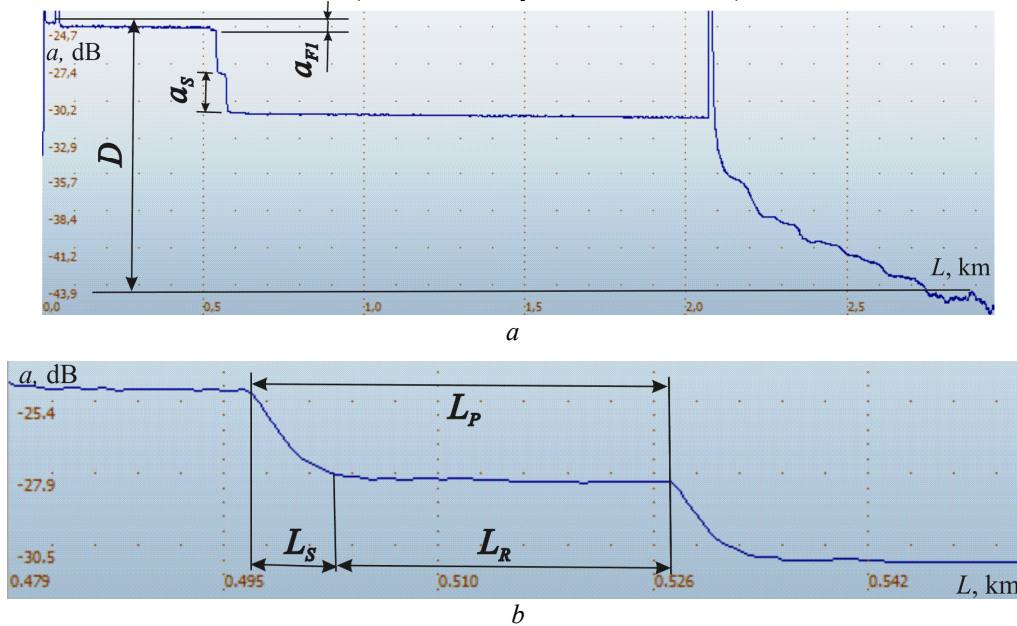


Рис. 1. Рефлектограмма мультитатчика на основе оптоволокна с двумя макроизгибами:
a – полная рефлектограмма, *b* – фрагмент рефлектограммы с областью макроизгибов оптоволокна

Fig. 1. Reflectograms of a multisensor based on an optical fiber with two macrobends:
a – full trace, *b* – fragment of the trace with the region of macrobends of the optical fiber

Рефлектограммы, которые получены при исследовании мультитатчика для четырех длин волн оптического излучения, при различных параметрах макроизгиба, различном количестве точек воздействия, позволяют определить, что ослабление оптического излучения каждого макроизгиба не зависит от количества одновременно формируемых макроизгибов, не зависит от расположения точки воздействия по длине мультитатчика. На рис. 2 представлены участки рефлектограмм, полученных при $\lambda = 1490$ нм, $R = 9$ мм и $Q = \pi$ рад, где видны девять макроизгибов. Измерения проведены с двух сторон оптического волокна со стороны А и стороны В. Видно, что отображенные на рефлектограммах «ступеньки» макроизгибов 1–9 соответственно по величине вносимого ослабления равны на обоих рефлектограммах (рис. 2, *a, b*), например, «ступеньки» 2 и 7 меньше чем 3 и 5. Кроме того, длина оптоволоконной линии до области формирования макроизгибов 470 или 1530 м не

оказывает влияния на параметры макроизгибов. Экспериментальные исследования проводились двумя рефлектометрами различных типов (FX 300 МТР 6000) и показали одинаковые результаты (в пределах погрешности). Полученные результаты позволяют сделать вывод о независимости параметров мультидатчика в точках воздействия от положения точки воздействия, длины линии оптоволокна до и после мультидатчика, а также количества точек воздействия (в ранее определенных пределах: N_{PLmax} и N_{PDmax}).

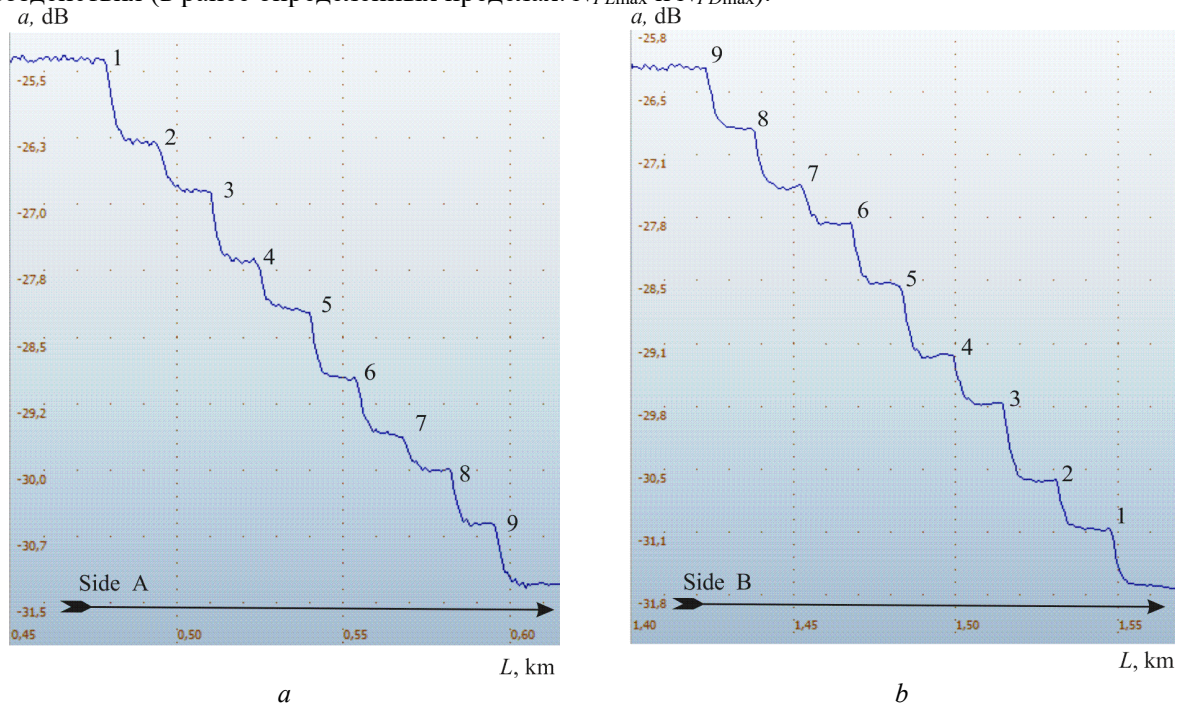


Рис. 2. Участки рефлектограмм, отображающих девять макроизгибов оптического волокна:
a – измерения проводились со стороны А; *b* – измерения проводились со стороны В
Fig. 2. Sections of reflectograms showing nine macrobends of the optical fiber:
a – measurements were taken from side A; *b* – measurements were taken from side B

Экспериментальные исследования по измерению мощности оптического излучения, проведенные с помощью оптического тестера ОТ 3-1, также показали, что наблюдается пропорциональное количеству формируемых макроизгибов изменение мощности оптического излучения, проходящего через мультидатчик. На рис. 3, *a* представлен график зависимости мощности оптического излучения, прошедшего через мультидатчик, от количества одинаковых макроизгибов ($R = 5,2$ мм и $Q = \pi$ рад) при постоянной мощности оптического излучения на входе мультидатчика (1 мВт). Проведены исследования ослабления вносимого макроизгибами оптического волокна в точках воздействия мультидатчика в зависимости от радиуса макроизгиба и длины дуги макроизгиба для четырех длин волн оптического излучения. На рис. 3, *b, c* представлены зависимости средней величины ослабления от величины угла макроизгиба оптического волокна (в пределах от $\pi/2$ до 2π рад) и от длины дуги макроизгиба S для различных R . На рис. 3, *d* виден нелинейный характер уменьшения величины ослабления оптического излучения на макроизгибе при увеличении длины дуги макроизгиба и $Q = \text{const}$. При увеличении длины волны оптического излучения кривые зависимостей идут выше и хорошо аппроксимируются экспоненциальной функцией. Аналогичны зависимости ослабления от радиуса макроизгиба при различных углах макроизгиба (рис. 3, *e*). На рис. 3, *f* представлены зависимости средних значений ослабления оптического излучения на макроизгибах оптического волокна от длины волны. По горизонтальной оси приведены длины волн в линейном масштабе, однако, соединительные линии между экспериментальными точками условны, так как необходимо учитывать неравномерную зависимость спектра оптических потерь в кварцевых оптических волокнах от длины волны, а измерения проводились только на фиксированных длинах волн оптического излучения, которые находятся в окнах прозрачности спектра оптических потерь. При всех четырех длинах волн, использованных при измерениях, регистрируются только макроизгибы

оптоволокна с $R = 7$ мм и $Q = \pi$ рад. Макроизгибы с другими радиусами и углами регистрируются только на трех или двух длинах волн. Это объясняется тем, что либо ослабление оптического излучения на макроизгибах в точках воздействия мультитатчика превышает динамический диапазон рефлектометра, либо из-за весьма малой величины ослабления оптического излучения макроизгибы в точках воздействия мультитатчика не регистрируются рефлектометром.

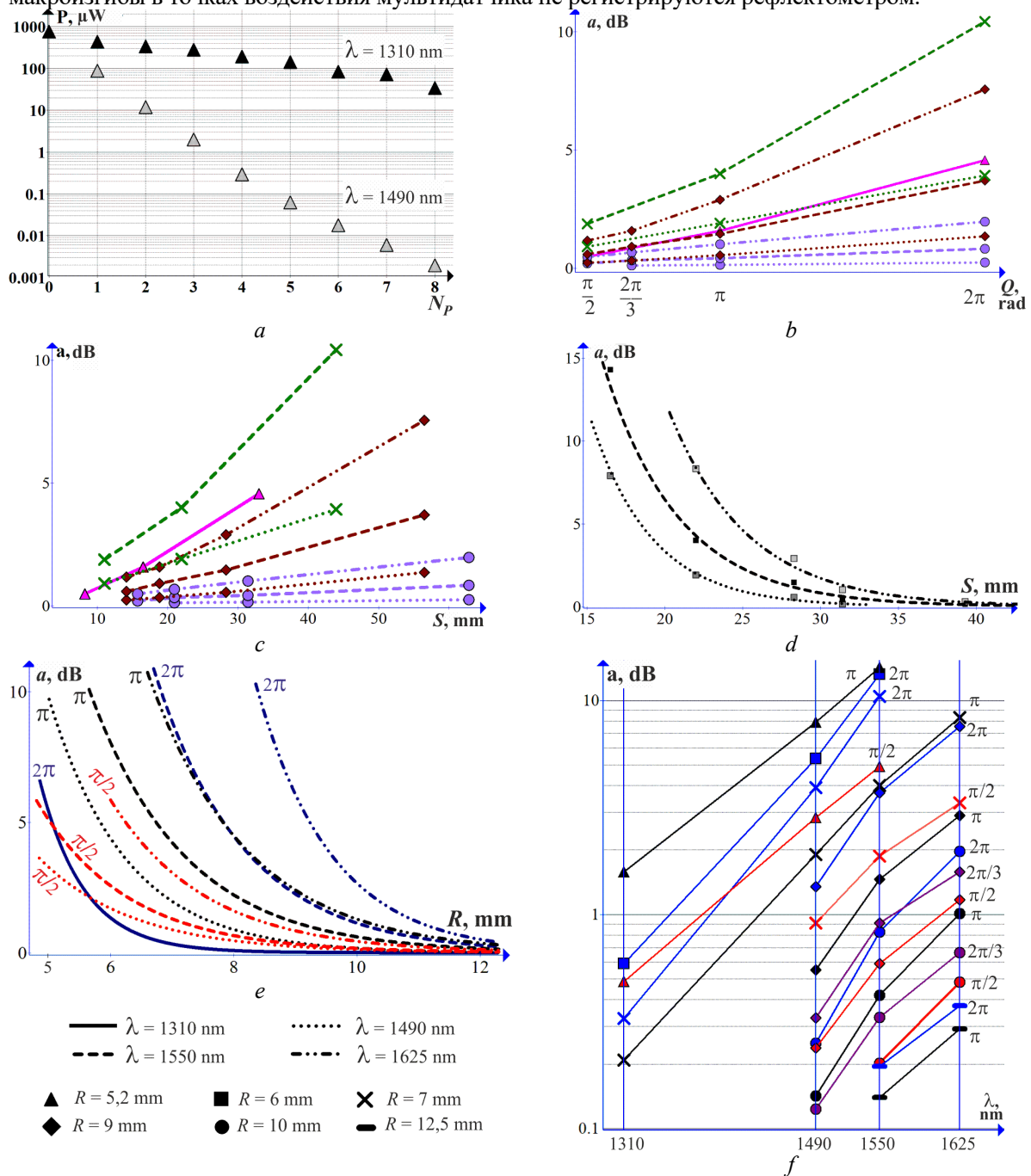




Рис. 3. Экспериментальные результаты: a – зависимость мощности от количества точек воздействия мультитатчика при $R = 5,2$ мм и $Q = \pi$ рад; b – зависимость ослабления от угла дуги макроизгиба; c – зависимость ослабления от длины дуги макроизгиба; d – зависимость ослабления от длины дуги макроизгиба при $Q = \pi$ рад; e – зависимость ослабления от радиуса макроизгиба; f – зависимость ослабления от длины волны
Fig. 3. Experimental results: a – dependence of power on the number of points of influence of the multisensor at $R = 5,2$ mm and $Q = \pi$ rad; b – dependence of the attenuation on the angle of the arc of macrobending; c – dependence of the attenuation on the length of the macrobend arc; d – the dependence of the attenuation on the length of the macrobend arc at $Q = \pi$ rad; e – the dependence of attenuation on the radius of macrobending; f – dependence of the attenuation on the wavelength

Полученные зависимости также позволяют определить оптимальные параметры формируемых макроизгибов мультидатчика для получения максимального диапазона изменения ослабления для каждого значения длины волны. Измерения на длинах волн 1490 и 1550 нм показали, что наибольший диапазон изменения ослабления (до 9,4 дБ) при изменении угла макроизгиба наблюдается при радиусах макроизгиба от 5,2 до 7 мм. Для длины волны 1625 нм наибольшее изменение ослабления при изменении угла макроизгиба наблюдается при $R = 9$ мм, но в меньшем диапазоне (7,4 дБ), на длине волны 1310 нм диапазон изменения ослабления еще меньше (до 4 дБ при $R = 5,2$ мм).

В табл. 1 представлены величины среднего ослабления оптического излучения на макроизгибах оптического волокна в точках воздействия мультидатчика, а также определенное экспериментально и рассчитанное максимальное количество точек воздействия, ограниченное динамическим диапазоном рефлектометра N_{PDmax} . Представленные результаты показывают, что для больших длин волн оптического излучения регистрируется меньшее количество точек воздействия, так как возрастает ослабление, вносимое макроизгибом оптического волокна. При меньших значениях длин волн оптического излучения количество регистрируемых точек воздействия значительно больше, но при больших радиусах макроизгиба и малых длинах макроизгиба, как было установлено экспериментально, макроизгибы оптического волокна в точках воздействия мультидатчика не регистрируются рефлектометром.

Таблица 1. Характеристики мультидатчика в зависимости от параметров макроизгиба
Table 1. Characteristics of a multisensor depending on macrobending parameters

Параметры макроизгиба Macro-bend parameters			Среднее значение ослабления, дБ Average attenuation value, dB				N_{PDmax}				
Угол, рад Angle, rad	Радиус, мм Radius, mm	Длина, мм Length, mm	Длина волны оптического излучения, нм Optical radiation wavelength, nm								
			1310	1490	1550	1625	1310	1490	1550	1625	
2π	5,2	32,97	4,56					4			
2π	6	37,58	0,59	5,35	13,3			34	3	1	
2π	7	43,96	0,33	3,92	10,4			61	4	1	
2π	9	56,52		1,35	3,7	7,56			14	5	2
2π	10	62,83		0,25	0,83	1,97			72	14	5
2π	12,5	78,5			0,2	0,37				62	27
π	5,2	16,5	1,58	7,9	14,3			13	2	1	
π	7	22	0,21	1,91	4	8,32		96	10	3	2
π	9	28,3		0,55	1,46	2,9			33	8	5
π	10	31,42		0,14	0,42	1,01			127	29	10
π	12,5	39,3			0,14	0,29				86	34
2π/3	9	18,84		0,33	0,91	1,58			55	13	6
2π/3	10	20,95		0,12	0,33	0,66			146	36	15
π/2	5,2	8,24	0,49	2,83	4,9			41	7	5	
π/2	7	11		0,91	1,87	3,33			20	7	5
π/2	9	14,15		0,24	0,59	1,17			76	20	10
π/2	10	15,71			0,2	0,48				59	25
π/2	12,5	39,3									

-  Ослабление в точке воздействия превышает динамический диапазон рефлектометра
The attenuation at the impact point exceeds the dynamic range of the reflectometer
-  Макроизгибы в точках воздействия мультидатчика не регистрируются рефлектометром
Macro-bends at the multisensor impact points are not registered by the reflectometer

Таким образом, оптимальным для получения наибольшего количества регистрируемых точек воздействия мультидатчика является выбор радиуса макроизгиба оптического волокна в пределах от 5 до 9 мм при угле макроизгиба от π до 2π рад для $\lambda=1310$ нм. Для $\lambda=1490$ нм оптимальные величины радиуса макроизгиба оптического волокна находятся в пределах от 9 до 10 мм при угле макроизгиба от $\pi/2$ до 2π рад. Оптимальные величины параметров

для длин волн 1550 и 1625 нм – $R = 12,5$ мм при угле макроизгиба от π до 2π рад или $R = 10$ мм при угле макроизгиба $\pi/2$ рад.

Для реализации оптимальной регистрации рефлектометром точек воздействия мультитатчика при увеличении радиуса макроизгиба оптического волокна необходимо использовать большую длину волны оптического излучения, а при увеличении угла макроизгиба оптического волокна – меньшую длину волны оптического излучения.

Выводы

Показана возможность функционирования мультитатчика на основе оптического волокна, исследованы основные характеристики, установлены зависимости параметров от радиуса, длины и угла формируемых макроизгибов в точках воздействия мультитатчика. Предложена методика определения минимального расстояния между точками воздействия мультитатчика и количества точек воздействия мультитатчика. Определены оптимальные параметры макроизгиба оптического волокна в точках воздействия для получения наибольшего количества регистрируемых точек воздействия мультитатчика для четырех длин волн оптического излучения. Полученные результаты могут быть использованы для расчета конструкции мультитатчиков для применения в распределенных волоконно-оптических системах, в частности, для применения в системах безопасности. Для выбора оптимальной величины ослабления оптического излучения на макроизгибах оптического волокна в точках воздействия мультитатчика требуется проведение дальнейших исследований.

Список литературы

1. Василевский Г.В., Жданович С.В., Мансуров Т.М., Лагутик А.А., Лукашик Т.М. Волоконно-оптический мультитатчик. *Ученые записки Азербайджанского технического университета. Телекоммуникация*. 2019;2:265-270.
2. Зеневич А.О., Лукашик Т.М., Новиков Е.В., Жданович С.В., Василевский Г.В., Лагутик А.А., Датчик обнаружения проникновения на основе макроизгиба одномодового оптического волокна. *Веснік сувязі*. 2020;1(159):56-59.
3. Василевский Г.В., Зеневич А.О., Лагутик А.А., Лукашик Т.М., Новиков Е.В. Исследование характеристик отраженного излучения в оптическом волокне как основы для создания волоконно-оптических датчиков. *Зв'язок*. 2019;1:40-44.

References

1. Vasilevski H.V., Zhdanovich S.V., Mansurov T.M., Lagutik A.A., Lukashik T.M. [The fiber-optical multisensor]. *Azerbaijan Technical University. Scientific works. Telecommunication*. 2019;2:265-270. (In Russ.)
2. Zenevich A.O., Lukashik T.M., Novikov E.V., Zhdanovich S.V., Vasilevsky G.V., Lagutik A.A. [Intrusion detection sensor based on macrobending of a single-mode optical fiber]. *Vesnik suvyazi*. 2020;1(159):56-59. (In Russ.)
3. Vasilevsky H.V., Zenevich A.O., Lagutik A.A., Lukashik T.M., Novikov E.V. Investigation of the characteristics of reflected radiation in optical fiber as a basis for creating fiber-optic sensors. *Connectivity = Zv'azok*. 2019;1:40-44. (In Russ.)

Вклад авторов

Зеневич А.О. определил задачи, которые необходимо было решить в ходе проведения исследований, а также принимал участие в интерпретации их результатов.

Жданович С.В. разработал методику проведения исследования параметров мультитатчика, принял участие в интерпретации результатов исследования, подготовил статью к опубликованию.

Василевский Г.В. принял участие в проведении измерений с использованием оптической рефлектометрии и обработке результатов измерений параметров макроизгибов.

Лагутик А.А. выполнила анализ и интерпретацию результатов исследования.

Коваленко Т.Г. проводила исследование параметров мультидатчика.
Лукашик Т.М. принимала участие в проведении измерений и обработке данных.

Authors' contribution

Zenevich A.O. has identified the tasks that needed to be solved during the research, and also participated in the interpretation of the research results.

Zhdanovich S.V. developed a method for conducting research on multisensor parameters, took part in the analysis and interpretation of the research results and prepared the article for publication.

Vasilevski G.V. took part in conducting measurements using optical reflectometry and processing the results of measurements of macro-bend parameters.

Lagutik A.A. has analyzed and interpreted the research results.

Kovalenko T.G. conducted research on multi-sensor parameters.

Lukashik T.M. participated in the measurement and data processing.

Сведения об авторах

Зеневич А.О., д.т.н., профессор, ректор
Белорусской государственной академии связи.

Жданович С.В., к.т.н., доцент, заведующий
отраслевой лабораторией перспективных инфор-
мационно-коммуникационных технологий
Белорусской государственной академии связи.

Василевский Г.В., научный сотрудник
отраслевой лаборатории перспективных
информационно-коммуникационных технологий
Белорусской государственной академии связи.

Лагутик А.А., научный сотрудник отраслевой
лаборатории перспективных информационно-
коммуникационных технологий Белорусской
государственной академии связи.

Коваленко Т.Г., старший преподаватель Белорусской
государственной академии связи.

Лукашик Т.М., преподаватель первой категории
Белорусской государственной академии связи.

Information about the authors

Zenevich A.O., D.Sci., Professor, Rector of the
Belarusian State Academy of Communications.

Zhdanovich S.V., PhD, Associate Professor, Head
of the Industry Laboratory of Perspective
Information and Communication Technologies of
the Belarusian State Academy of Communications.

Vasilevski H.V., Researcher at the Industry
Laboratory of Perspective Information and
Communication Technologies of the Belarusian
State Academy of Communications.

Lagutik A.A., Researcher at the Industry Laboratory
of Perspective Information and Communication
Technologies of the Belarusian State Academy
of Communications.

Kovalenko T.G., Senior Lecturer of the Belarusian
State Academy of Communications.

Lukashik T.M., Lecturer of the First Category
of the Belarusian State Academy of Communications.

Адрес для корреспонденции

220076, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Франциска Скорины, 8/2,
Белорусская государственная академия связи
тел. +375 29 3512345;
Жданович Сергей Вячеславович

Address for correspondence

220076, Republic of Belarus,
Minsk, Francisk Skorina str., 8/2,
Belarusian State Academy of Communications
tel. +375 29 3512345;
Zhdanovich Siarhei Viacheslavovich