



Исследование метода сборки и юстировки компонентов оптических полюсов каналов оптоволоконной связи

Е.В. Осипов¹ 

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия
 egorosipov3440@gmail.com

ЦИТИРОВАНИЕ Осипов Е.В. Исследование метода сборки и юстировки компонентов оптических полюсов каналов оптоволоконной связи // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69. № 2. С. 139–147. DOI:10.30533/GiA-2025-018.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА канал оптической связи, оптический полюс, коллиматорное устройство, оптические потери в канале связи

АННОТАЦИЯ Оптические полюсы являются основными элементами оптических соединителей, которые применяются в современных волоконно-оптических системах передачи информации. От точности юстировки и сборки оптических полюсов в значительной степени зависят эффективность и стабильность передачи оптического сигнала. Оптические полюсы являются передающими и приемными элементами оптического сигнала, обеспечивающими минимальные оптические потери, что критически важно для надежной передачи сигналов на больших расстояниях. В статье исследован метод сборки и юстировки отдельных компонентов оптических полюсов, которые применяются в каналах оптоволоконной связи. Проанализированы характеристики компонентов оптических полюсов, влияющие на оптические потери сигнала при его передаче через оптический канал. Рассчитана требуемая точность взаимного позиционирования компонентов оптических полюсов. Дано описание разработанного стенда и иных оптико-механических сборных элементов, которые были разработаны для достижения приемлемой точности взаимного позиционирования компонентов оптических полюсов исследуемым методом. Выполнена экспериментальная апробация исследованного метода. Получены результаты в виде собранной и отъюстированной конструкции оптического полюса, которая обладает рядом преимуществ по сравнению с аналогами. Показан канал оптической связи, который состоит из оптических полюсов, полученных исследуемым методом, измерены основные характеристики данного канала. Результаты исследования позволяют создать оптический полюс и исключить применение механических элементов высокой точности обработки в конструкции полюса.

1 Введение

Оптический полюс (ОП) — «место ввода оптического излучения в компонент волоконно-оптической системы передачи или его вывода»¹. Оптическая система ОП включает оптическое волокно (ОВ) и коллиматорное устройство — сферическую линзу.

Выходной ОП — «место вывода оптического излучения из компонента волоконно-оптической системы передачи»². ОП применяют в системах волоконно-оптической связи [1], волоконно-оптических лазерных системах [2], оптоволоконных системах визуализации изображения [3], измерительных оптических системах [4, 5]. Выходной ОП, оканчивающийся коллиматорным устройством, выводит из волоконно-оптической системы передачи оптический сигнал и коллимирует его.

Входной ОП — «место ввода оптического излучения в компонент волоконно-оптической системы передачи»³. Входной ОП, оканчивающийся коллиматорным устройством, собирает входящий коллимированный пучок в волоконно-оптическую систему передачи. Выходной и входной ОП с коллиматорным устройством формируют канал оптической связи, который выступает основным элементом пассивных волоконно-оптических приборов, таких как волоконно-оптические переходы [6, 7].

Основной характеристикой канала оптической связи являются потери при передаче. Потери при передаче (через оптический канал) (*англ.* transmission loss [of an optical path]) — «потери в оптическом передающем канале, связывающем два соседних оптоэлектронных устройства, на определенной длине волны»⁴.

Потери в канале оптической связи (дБ) вычисляются следующим образом⁵:

$$B = -10 \lg \left(\frac{P_0}{P_{out}} \right),$$

где P_{out} — мощность оптического пучка, вышедшая из ОВ выходного ОП, дБ;

P_0 — мощность оптического пучка, вошедшая в ОВ входного ОП, дБ.

Оптические потери возникают в результате неточности компонентов ОП, погрешности сборки [8] и сферической аберрации коллиматорного устройства⁶. В результате перечисленных факторов пучок, вышедший из выходного ОП, будет расходящимся или сходящимся, а входной ОП будет собирать входящий в него оптический пучок не в сердцевину оптического волокна.

Низкая расходимость оптического пучка достигается высокоточным позиционированием ОВ относительно коллиматорного устройства. В статье исследуется метод сборки ОП, позволяющий юстировать ОВ относительно коллиматорного устройства с точностью 1 мкм в процессе сборки ОП, что достаточно для передачи оптического излучения через канал волоконной связи с низкими потерями. В настоящий момент отсутствуют научные источники, посвященные подобным исследованиям, поэтому тема статьи представляется актуальной.

Стоит отметить, что для каналов оптоволоконной связи, включающих в свой состав рассматриваемые оптические полюсы, на момент написания статьи отсутствуют государственные и международные стандарты, определяющие уровень допустимых оптических потерь. При разработке подобных устройств следует стремиться к минимальному уровню оптических потерь.

1 ГОСТ Р 54417-2011. Компоненты волоконно-оптических систем передачи. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2012. С. 1.

2 Там же.

3 Там же.

4 ГОСТ ИЕС 66050-731-2017. Международный электротехнический словарь. Глава 731. Волоконно-оптическая связь. М.: Стандартинформ, 2020. С. 4.

5 Бусурин В.И., Казарян А.В., Неретин Е.С. Оптические и волоконно-оптические устройства и системы: учеб. пособие / под ред. В.И. Бусурина. М.: Изд-во МАИ, 2015. 112 с.

6 Nicia A.J.A. Micro-optical devices for fiber communication. Eindhoven: Technische Hogeschool Eindhoven, 1983. 85 p.

2 Материалы и методы

2.1 Анализ характеристик сборки и юстировки ОП

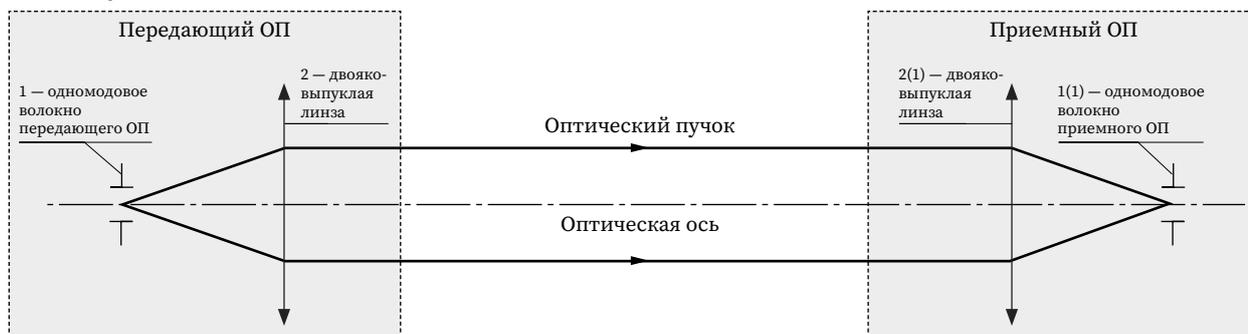
Для сведения к минимуму оптических потерь в канале связи проанализируем, с какой точностью нужно позиционировать ОВ относительно коллиматорного устройства. Для этого рассмотрим оптическую систему, показанную на рис. 1. При моделировании учитывались следующие факторы: диаметр сердцевины одномодового волокна (D_c) равен 9 мкм; максимальная числовая апертура одномодового волокна (NA) — 0,13; отражение света от линз не учитывается; мощность выходящего из ОВ оптического излучения (P_{out}) — 1 Вт. Параметры коллиматорного устройства: радиус $r_1 = 1,25$ мм, $r_2 = -1,25$ мм, $D_a = 2,5$ мм, $n_e = 1,51872$. Анализируемые ОП включают в свой состав одномодовое волокно, поэтому длины волн при моделировании соответствуют основным рабочим длинам волн этого типа волокна⁷: $\lambda_1 = 1,31$ мкм, $\lambda_2 = 1,55$ мкм.

Минимальное значение оптических потерь достигается при условии нахождения всех элементов рис. 1 на одной оси (рис. 2). Сместим оптическое волокно 1 выходного полюса по координатам x, y, z до получения оптических потерь на уровень 3 дБ = 50 % (рис. 2).

Рис. 1  Оптическая система канала оптической связи

Fig. 1 Optical system of the optical communication channel

Схема / Diagram

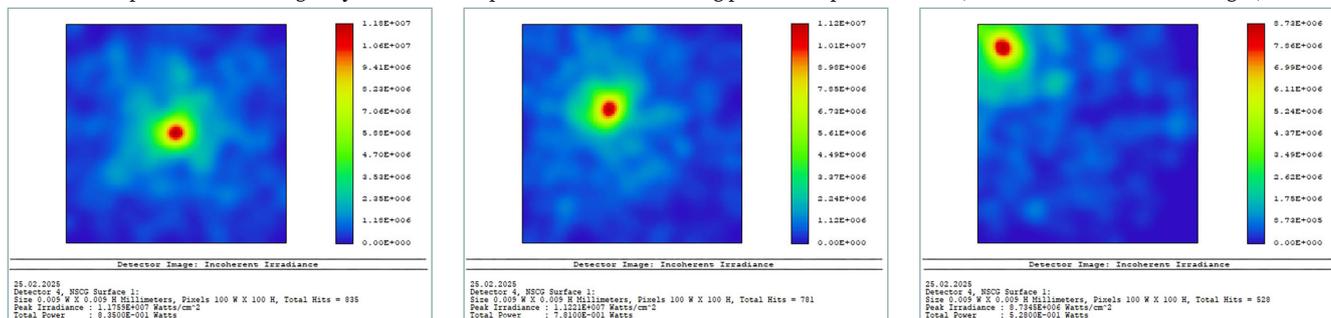


Модель в программе Zemax / Model in the Zemax program



Рис. 2  Профиль оптического излучения, сведенного линзой в ОВ в приемном полюсе оптического канала (получено из модели рис. 1)

Fig. 2 Profile of an optical beam converged by a lens into an optical fiber at the receiving pole of an optical channel (obtained from the model in Fig. 1)



ОВ передающего канала находится на оптической оси / The optical fiber of the transmitting channel is on the optical axis

ОВ передающего канала смещено по координатам $x = 1$ мкм, $y = 1$ мкм от оптической оси / The optical fiber of the transmitting channel is shifted by coordinates $x = 1$ μm, $y = 1$ μm from the optical axis

ОВ передающего канала смещено по координатам $x = 3,5$ мкм, $y = 3,5$ мкм от оптической оси / The optical fiber of the transmitting channel is shifted by coordinates $x = 3.5$ μm, $y = 3.5$ μm from the optical axis

⁷ Листвин А.В., Листвин В.Н., Швырков Д.В. Оптические волокна для линий связи. М.: ЛЕСАРпт, 2003. 106 с.

Из представленной модели видно, что смещение ОВ на 1 мкм (рис. 2) по двум координатам приводит к тому, что на волокно приемного ОП приходит $P_0 = 0,78$ Вт, при расчете по формуле (1) $B = 1,1$ дБ. Подобное смещение на 3,5 мкм (рис. 2) приводит к тому, что на волокно приемного ОП приходит $P_0 = 0,51$ Вт, при расчете по формуле (1) $B = 3$ дБ.

Представленная модель достаточно точно коррелирует с выражением, выведенным в [9]:

2 ➔

$$n_{\Delta r} = \frac{\int_0^\infty \frac{1}{r} \exp(-ikr) \exp\left(-\frac{ikr^2}{2f}\right) \exp\left(-\left(r+\frac{\Delta r}{w_0}\right)\right) J_1(\pi D_a r / \lambda f) dr}{\int_0^\infty [J_1(\pi D_a r / \lambda f)]^2 / r dr \times \int_0^\infty \exp\left[-2\left(r+\frac{\Delta r}{w_0}\right)^2\right] r dr}$$

где $n_{\Delta r}$ — эффективность связи (англ. coupling efficiency);
 $\Delta r = \sqrt{x^2 + y^2}$ — смещение волокна по координатам x и y ;
 w_0 — радиус поля моды (4,5 мм);
 J_1 — функция Бесселя первого рода;
 D_a — диаметр фокусирующей линзы (2,5 мм);
 λ — длина волны лазерного источника излучения (1,55 мкм);
 f — фокусное расстояние линзы (1,865 мм для $\lambda = 1,55$ мкм).

Значение эффективности связи $n_{\Delta r}$ является значением потерь в канале связи. Так, если подставить в выражение (2) значение параметров модели (рис. 1), значение эффективности связи будет равно 0,5 при $\Delta r = 6,9$ мкм. Следовательно, одномодовое волокно не совпадает с осью линзы по координатам x и y на 4,8 мкм. Выражение (2) не учитывает расходимость оптического пучка, которая образуется в результате сферической аберрации линзы передающего ОП, поэтому значения координат волокна в модели (рис. 1) и выражении (2) различаются на 1,3 мкм.

Обеспечить необходимое положение ОВ в сборках ОП можно механическими элементами. Конструкция, включающая механические элементы, собирается по принципу насыпной сборки⁸. Подобный вид конструкции имеет ряд недостатков: применение механических элементов высокой точности обработки ввиду отсутствия возможности юстировки в процессе сборки, необходимость подбора пар из собранных ОП для стабильной работы канала связи на требуемом расстоянии.

Для того чтобы устранить недостатки сборки с механическими элементами, предлагается использовать метод, позволяющий производить юстировку в процессе сборки.

2.2 Метод сборки и юстировки по входящему оптическому пучку

Элементная база, из которых состоят ОП, юстируемые и собираемые по исследуемому методу, представлена на рис. 3.

Диаметр керамического наконечника 1,25 мм, наконечник имеет полировку по стандарту УРС. Линза имеет следующие параметры: радиус — 1,43 мм, диаметр — 1,3 мм, длина линзы по ее оптической оси — 3,06 мм. Линза выполнена из оптического стекла марки SF11.

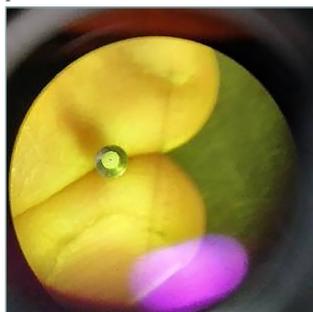
Исследуемый метод производился по входящему в линзу коллимированному пучку. Для создания коллимированного пучка использовался опорный ОП. Схема сборки и юстировки по входящему оптическому пучку показана на рис. 4.

Опорный ОП 4 подключается к источнику оптического излучения. Он имеет единую базу с линзой 3, поскольку они зажаты во втулку 5 без возможности перемещения. Линза 3 собирает коллимированный пучок от линзы 4. Задача юстировки по данному методу — расположить ОВ в наконечнике керамическом относительно линзы так, чтобы оптические потери были минимальны.

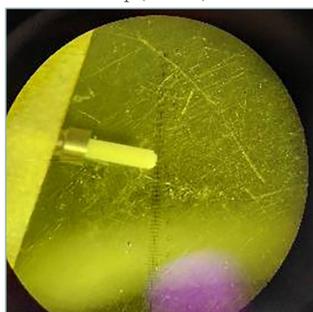
Рис. 3 Элементная база ОП

Fig. 3 Element base of the optical pole

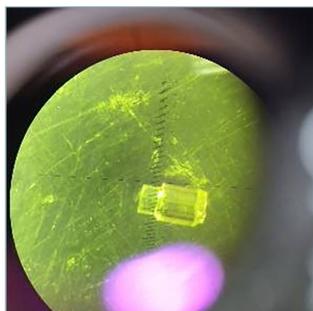
ОВ в наконечнике керамическом (феруле), вид в профиль / Optical fiber in a ceramic tip (ferrule) profile view



ОВ в наконечнике керамическом (феруле), вид сбоку / Optical fiber in a ceramic tip (ferrule) side view



Линза / Lens



8 Крынин Л.И. Проектирование конструкций объективов. СПб.: Университет ИТМО, 2018. 219 с.

Рис. 4 ✓

Схема юстировки методом прямой юстировки

Fig. 4

Scheme of adjustment by the direct adjustment method

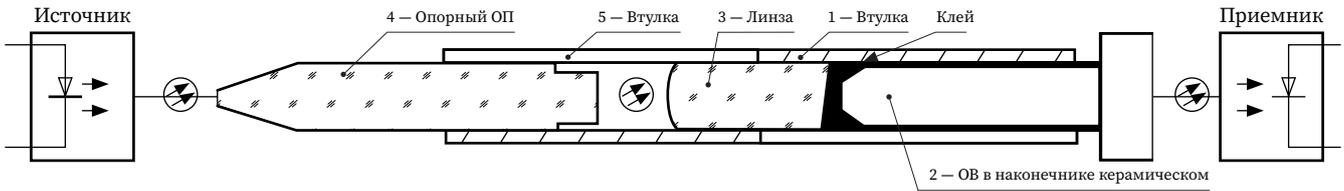


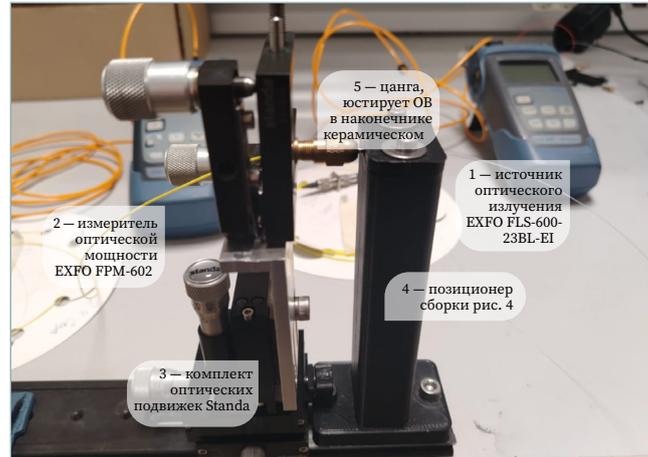
Рис. 5 ➔

Стенд для сборки методом прямой юстировки

Fig. 5

Stand for assembly using the direct alignment method

Стенд / Stand



Часть стенда, базирующая линзу относительно опорного полюса, обозначенные позиции совпадают с позициями рис. 4 / Part of the stand, basing the lens relative to the support pole the designated positions coincide with the positions of fig. 4



Условием правильной юстировки является минимум оптических потерь, зафиксированный приемником оптического излучения. Юстировка производилась в прозрачном клее УФ-Полимер «5 секунд» ТУ 20.59.59-010-78719086-2017. Стенд, собранный для метода прямой юстировки, показан на рис. 5.

При юстировке использовались линейные и угловые подвижки фирмы Standa 3 (рис. 5) с заявленным линейным отклонением шага 10 мкм и угловой чувствительностью 8". При этом во время юстировки удалось добиться уровня оптических потерь в 1 дБ, что соответствует линейному смещению от оптической оси в 1 мкм. После полимеризации клея позиции 1, 2, 3 (рис. 5) представляют собой единую сборку — оптический полюс. Клей в процессе затвердевания незначительно меняет свой показатель преломления, что сказывается на значении оптических потерь в пределах погрешности. На рис. 6 показан ОП, отъюстированный и собранный (метод сборки и юстировки по входящему оптическому пучку).

На данный момент исследуемым методом сделано 9 ОП.

На рис. 7 показан оптический канал, состоящий из ОП, созданных методом прямой юстировки по оптическому пучку. Потери при передаче в оптическом канале, состоящем из ОП, выполненных по методу прямой юстировки, равны 1–1,2 дБ на расстояниях от 5 до 100 мм.

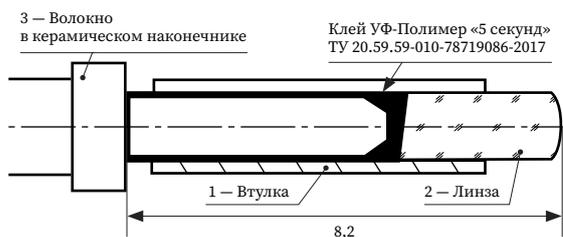
Рис. 6 ➔

ОП, сделанный методом прямой юстировки по оптическому пучку

Fig. 6

Optical pole made by direct alignment along the optical beam

Чертеж / Drawing



Сделанный ОП / Made optical pole

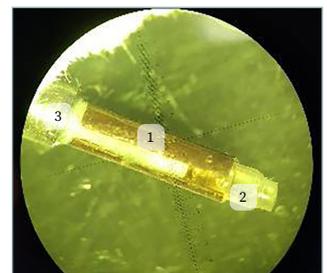


Рис. 7 ➔

ОП, сделанный методом прямой юстировки по оптическому пучку

Fig. 7

Optical pole made by direct alignment along the optical beam



3 Результаты и обсуждение

В результате исследования метода сборки и юстировки компонентов ОП каналов оптоволоконной связи создано 9 ОП, из которых можно составить канал оптической связи без подбора пар. Благодаря исследуемому методу сборки из конструкции исключены механические элементы, а юстировка компонентов ОП выполняется в процессе сборки. В среднем на изготовление одного ОП уходит 1 час 30 минут, поэтому подобный вид сборки не относится к массовому.

Следует отметить, что исследования по юстировке ОП проводились в [9, 10], однако в работе [9] авторы добились потерь уровня 3 дБ в оптическом канале, что значительно ниже, чем это удалось сделать по методу, исследованному в данной работе (1,2 дБ). В работе [10] авторы не измеряли оптические потери при юстировке, критерием выступала коллимированность профиля пучка (*англ. well-collimated beam profile*), по этой причине нельзя установить, насколько точность юстировки компонентов ОП в указанном исследовании соответствует точности юстировки, произведенной методом, рассмотренным в данной статье. Следует также отметить, что в работе [9] не подразумевалась конечная сборка такого изделия, как ОП, а проводилась только юстировка волокна относительно коллиматорного устройства.

4 Выводы

В данной статье исследован метод сборки ОП, применяемых в каналах оптической связи. Исследуемый метод позволяет производить юстировку элементов ОП в процессе его сборки. В результате из состава собираемых ОП исключаются точные механические элементы, а каналы оптической связи имеют стабильные оптические потери при передаче от 1 до 1,2 дБ на длинах от 5 до 100 мм без подбора пар.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Cen J., Ma Y., Chang H., et al. Research on fiber transceiver collimator based on optical fiber bundles // AOPC 2019: Advanced Laser Materials and Laser Technology (December 18, 2019). Beijing, China, 2019. Vol. 11333. P. 1–6. DOI:10.1117/12.2547707.
2. Denisov V.I., Ivanenko A.V., Nyushkov B.N., et al. Femtosecond fibre laser with a hybrid linear-ring cavity // Quantum Electron. 2008. Vol. 38. No. 9. P. 801–802. DOI:10.1070/QE2008v038n09ABEH013924.
3. Jiang J., Zhou X., Liu J., et al. Optical Fiber Bundle-Based High-Speed and Precise Micro-Scanning for Image High-Resolution Reconstruction // Sensors. 2022. Vol. 22. No. 1. 127. DOI:10.3390/s22010127.

4. Вострикова Е.В., Литвинова Е.В., Волковский С.А. и др. Применение радиофотоники в волоконно-оптических измерительных приборах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 20. № 1. С. 1–23. DOI:10.17586/2226-1494-2020-20-1-1-23.
5. Zhang W., Chen F., Ma W., et al. Ultrasonic imaging of seismic physical models using a fringe visibility enhanced fiber-optic Fabry-Perot interferometric sensor // Optics Express. 2018. Vol. 26. No. 6. P. 11025–11033. DOI:10.1364/OE.26.011025.
6. Chou C., Chen R., Tsai H., et al. Optimization of Coupling Efficiency of Fiber Optic Rotary Joint by Ray Tracing // Proceedings of the 8th International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology PHOTOPTICS. Valletta, Malta, 2020. Vol. 1. P. 71–75. DOI:10.5220/0008895200710075.
7. Park H., Mavadia-Shukla J., Yuan W., et al. Broadband rotary joint for high-speed ultrahigh-resolution endoscopic OCT imaging at 800 nm // Optics Letters. 2017. Vol. 42. No. 23. P. 4978–4981. DOI:10.1364/OL.42.004978.
8. Xiong Z., Ai Y., Xin S., et al. Coupling efficiency and compensation analysis of optical fiber for space optical communication // Infrared and Laser Engineering. 2013. Vol. 42. No. 9. P. 2510–2514.
9. Ke X., Yin B. Experimental Research on Automatic Alignment and Control Algorithm of Spatial Light-Fiber Coupling // International Journal of Optics. 2021. Vol. 9. P. 1–9. DOI:10.1155/2021/8481146.
10. Carter J.J., Böhme S., Weber K., et al. Quasi Monolithic Fiber Collimators // arXiv:2408.06090v1 [physics.optics]. 2024. P. 1–10. DOI:10.48550/arXiv.2408.06090.

АВТОР Осипов Егор Васильевич

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»
(МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра прикладной оптики, факультет оптического приборостроения

Поступила 18.11.2024. Принята к публикации 23.04.2025. Опубликовано 30.04.2025.



Study of the assembly and alignment method of optical pole components of fiber optic communication channels

Egor V. Osipov¹

¹ Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
 egorosipov3440@gmail.com

CITATION Osipov EV. Study of the assembly and alignment method of optical pole components of fiber optic communication channels. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(2): 139–147. DOI:10.30533/GiA-2025-018.

KEYWORDS optical fiber channel, optical pole, collimating device, optical losses in the communication channel

ABSTRACT Assembly of optical fiber pigtail with collimated lens assembly are the main elements of optical connections used in modern fiber-optic transmission devices. The efficiency and stability signal transmission depend on the adjustment accuracy of its parts. It is transmitting or receiving elements of the optical signal, providing minimal optical losses, which is important for reliable signal transmission over long distances. The article investigates the method of assembling and adjusting individual components of assembly optical fiber pigtail with collimated lens used in fiber-optic communication. The characteristics of the assembly fiber pigtail with collimated lens components that affect the optical loss of the signal during its transmission through the optical channel are analyzed. The required accuracy of the mutual connection of the assembly fiber pigtail with collimated lens components is calculated. A description of the developed stand and optical-mechanical prefabricated elements is given, which were developed to achieve acceptable accuracy of the mutual component of the assembly fiber pigtail with collimated lens components by the limiting method. Experimental testing of the research method is carried out. The results are obtained in the form of an assembled and adjusted optical optical fiber pigtail with collimated lens, which has a number of advantages over analogues. The optical channel connection is shown, which constitutes from two fiber pigtails assemblies, recorded by the method. The main characteristics of the shown optical channel are measured. The results of the study allow to create an assembly optical fiber pigtails with collimated and to apply mechanical elements with high processing accuracy in the pole structures.

REFERENCES 1. Cen J, Ma Y, Chang H, et al. Research on fiber transceiver collimator based on optical fiber bundles. *AOPC 2019: Advanced Laser Materials and Laser Technology (December 18, 2019)*. Beijing, China, 2019;11333: 1–6. DOI:10.1117/12.2547707.

2. Denisov VI, Ivanenko AV, Nyushkov BN, et al. Femtosecond fibre laser with a hybrid linear-ring cavity. *Quantum Electron.* 2008;38(9): 801–802. DOI:10.1070/QE2008v038n09ABEH013924.
3. Jiang J, Zhou X, Liu J, et al. Optical Fiber Bundle-Based High-Speed and Precise Micro-Scanning for Image High-Resolution Reconstruction. *Sensors.* 2022;22(1): 127. DOI:10.3390/s22010127.
4. Vostrikova EV, Litvinova EV, Volkovskij SA, et al. Primenenie radiofotoniki v volokonno-opticheskikh izmeritel'nyh priborah [Application of microwave photonics in fiber optical sensors]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics.* 2019;20(1): 1–23. DOI:10.17586/2226-1494-2020-20-1-1-23.
5. Zhang W, Chen F, Ma W, et al. Ultrasonic imaging of seismic physical models using a fringe visibility enhanced fiber-optic Fabry-Perot interferometric sensor. *Optics Express.* 2018;26(6): 11025–11033. DOI:10.1364/OE.26.011025.
6. Chou C, Chen R, Tsai H, et al. Optimization of Coupling Efficiency of Fiber Optic Rotary Joint by Ray Tracing. *Proceedings of the 8th International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology PHOTOPTICS.* Vailletta, Malta, 2020;1: 71–75. DOI:10.5220/0008895200710075.
7. Park H, Mavadia-Shukla J, Yuan W, et al. Broadband rotary joint for high-speed ultrahigh-resolution endoscopic OCT imaging at 800 nm. *Optics Letters.* 2017;42(23): 4978–4981. DOI:10.1364/OL.42.004978.
8. Xiong Z, Ai Y, Xin S, et al. Coupling efficiency and compensation analysis of optical fiber for space optical communication. *Infrared and Laser Engineering.* 2013;42(9): 2510–2514.
9. Ke X, Yin B. Experimental Research on Automatic Alignment and Control Algorithm of Spatial Light-Fiber Coupling. *International Journal of Optics.* 2021;9: 1–9. DOI:10.1155/2021/8481146.
10. Carter JJ, Böhme S, Weber K, et al. Quasi Monolithic Fiber Collimators. *arXiv:2408.06090v1 [physics.optics].* 2024: 1–10. DOI:10.48550/arXiv.2408.06090.

AUTHOR Egor V. Osipov

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
Department of Applied Optics, Faculty of Optical Instrumentation

Submitted: November 18, 2024. Accepted: April 23, 2025. Published: April 30, 2025.