

10. Mitchell M. *An Introduction to Genetic Algorithms*. Cambridge: MIT Press, 1999, 158 p.
11. Periaux J., Sefrioui M. Evolutionary computational methods for complex design in aerodynamics. AIAA-98-0222. Reno, 1998, p. 15.
12. Periaux J. et al. Combining game theory and genetic algorithms with application to DDM-nozzle optimization problems. *Finite Elem Anal Des*, 2001, vol. 37 (5), pp. 417–429.
13. Zhirkov A. Supercomputers: development, trends, applications. Eurotech HPC solutions overview. *CTA*, 2014, no. 2, pp. 16–20. (In Russ.)
14. Taihoon K., Soksoo K. Analysis of security session reusing in distribution server system. *Computational Science and Its Applications*, ICCSA 2006, Springer, 2006, p. 1045.
15. Beloglazov A., Buyya R. Optimal online deterministic algorithms and adaptive heuristics for energy and performance efficient dynamic consolidation of virtual machines in cloud data centers. *Concurrency and Computation. Practice and Experience (CCPE)*, 2012, vol. 24 (13), pp. 1397–1420.
16. Mochalov V.P., Bratchenko N.Yu., Yakovlev S.V. Analytical model of object request broker based on Corba standard. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1015 (2). DOI: 10.1088/1742-6596/1015/2/022012.
17. Mochalov V.P., Bratchenko N.Yu., Yakovlev S.V. Analytical model of integration system for program components of distributed object applications. *2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, 2018, no. 8501806. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501806.
18. Mochalov V., Bratchenko N., Linets G., Yakovlev S. Distributed management systems for information communication networks: A model based on tm forum framework. *Computers*, 2019, vol. 8 (2), pp. 45. DOI: 10.3390/computers8020045.
19. Mochalov V.P., Bratchenko N.Yu., Yakovlev S.V. Process-Oriented Management System for Information Communication Networks and Services Based on TM Forum Framework. *2019 Proceedings International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, 2019, no. 8867619. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867619.
20. Vdovin P.M., Kostenko V.A. Algorithm for Resource Allocation in Data Centers with Independent Schedulers for Different Types of Resources. *Computer and Systems Sciences International*, 2014, vol. 53, no. 6, pp. 854–866. DOI: 10.1134/S1064230714050141.

*Received 29.01.2021*

УДК 681.7.068

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОЦЕНИВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕДАЧИ ОСНОВНОЙ МОДЫ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПЕРЕКРЫТИЯ РАДИАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЕЙ В ДИСКРЕТНОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ**

*Пашин С.С.*

*Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ  
E-mail: pashinstanislav@outlook.com*

Представлено исследование потенциальных возможностей оценивания коэффициента передачи основной моды на основе анализа перекрытия радиального распределения полей в дискретном представлении, рассмотрен процесс прохождения основной (фундаментальной) моды LP01, характеризующейся наиболее простым распределением поля, через соединение пары одномодовых волоконных световодов, выполненного с некоторым радиальным рассогласованием при разбросе значений радиуса пятна моды взаимодействующих мод. Осуществлен ввод дополнительной поправки при выборе верхней границы области дискретного представления поля моды, которая обеспечивает устранение нежелательного выброса погрешности оценки в области верхней границы диапазона исследуемых значений осевого смещения. Приведены результаты экспериментальной верификации предложенного подхода, которые подтверждают возможность проведения оценки коэффициента передачи основной моды LP01 при прохождении соединения одномодовых оптических волокон.

**Ключевые слова:** волоконно-оптический коннектор, ключевые параметры передачи, загрязнение феррула, коэффициент связи мод, структурированные кабельные системы, одномодовые волокна, радиус пятна моды

## Введение

Современные инфокоммуникации являются базовым инструментом формирования и развития информационного общества РФ. Данный факт непосредственно отражен в целом ряде положений Указа Президента РФ от 07.05.2018 № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития РФ на период до 2024 г.», Программе «Цифровая экономика РФ», утвержденной распоряжением Правительства РФ от 28.07.2017 №1632-р, и Стратегии развития информационного общества в РФ на 2017–2030 гг., утвержденной Указом Президента РФ от 09.05.2017 № 203. Необходимо отметить, что и преодоление подавляющего большинства сформулированных технологических барьеров НТИ практически всех рабочих групп также не представляется возможным без применения передовых инфо- и телекоммуникационных технологий. Очевидно, что последнее требует обеспечения соответствующей инфраструктуры, в которой особое место занимают волоконно-оптические подсистемы структурированных кабельных систем (СКС) центров обработки данных, сетей хранения данных, вычислительных центров, внутрикорпоративных сетей передачи данных разного назначения и др. [1–4].

Для перечисленных приложений волоконно-оптические линии передачи (ВОЛП) подсистем СКС характеризуются малой протяженностью (десятки – сотни метров) и экстремально большим числом (тысячи и в отдельных случаях – десятки тысяч) волоконно-оптических соединений, число которых составляет тысячи [1–4]. Наиболее чувствительными с точки зрения деградации параметров передачи являются разъемные соединения оптических волокон (ОВ). Самая уязвимая часть коннектора – феррула, она очень хрупкая и повреждается от различных загрязнений.

В результате этого возникает необходимость в методах и средствах для оценивания ключевых параметров передачи волоконно-оптических разъемных соединений непосредственно по результатам анализа фотографии торцевой поверхности феррул коннекторов, полученных с помощью штатных полевых комплектов видеодиагностики [5–8].

## Описание предлагаемого подхода

Для оценки потенциальных возможностей применения предлагаемого подхода анализа сты-

ка одномодовых волокон (SM), в основе которого лежит дискретное представление полей взаимодействующих мод, предлагается рассмотреть процесс прохождения основной (фундаментальной) моды LP01, характеризуемой наиболее простым распределением поля, через соединение пары SM волоконных световодов, выполненного с некоторым радиальным рассогласованием при разбросе значений радиуса пятна моды (MFR) взаимодействующих мод. Рассматривается соединение двух SM ОВ с максимальным разбросом значений MFR: MFR вводимой моды составляет  $\rho_{\text{INJ}} = 4,2500$  мкм, MFR возбуждаемой моды –  $\rho_{\text{EXC}} = 4,8500$  мкм.

Предполагается, что исследуемое соединение выполнено: а) строго центрированно; б) с некоторым заданным радиальным рассогласованием. Исследуется диапазон вносимого смещения между осями срачиваемых ОВ  $d = 0 \dots 10$  мкм с шагом 0,5 мкм. Предварительно область дискретизации с учетом максимального значения введенного рассогласования была выбрана  $\pm 35$  мкм относительно центра сердцевин, возбуждающего ОВ.

На первом этапе исследовалось влияние шага дискретизации на погрешность вычисления коэффициента передачи основной моды по предложенной методике. Действительное значение данного параметра вычислялось по аналитической формуле для стыка пары ОВ (выполненного с осевым смещением), полученной в рамках приближения Гаусса [9]. В качестве сравнения на рисунке 1 приведена суперпозиция полей основной вводимой и возбуждаемых мод на стыке ОВ, выполненном с осевым смещением  $d = 4,5$  мкм при разном значении шага дискретизации. В целом хорошо видно, что уже при выборе шага дискретизации 0,5 мкм достигается воспроизведение поля моды с достаточно высокой детализацией.

На следующем этапе были проведены расчет кривых зависимостей коэффициента передачи основной моды LP01 в зависимости от осевого смещения в исследуемом интервале  $d = 0 \dots 10$  мкм с шагом 0,5 мкм для рассматриваемого соединения ОВ с указанным разбросом MFR и последующее сопоставление с действительным значением коэффициента передачи, вычисленным по аналитической формуле, записанной в рамках приближения Гаусса с представлением поля в базисе функций Лагерра – Гаусса [10; 11]. Здесь также рассматривались следующие значения шага дискретизации:  $x = 2,0, 1,5, 1,0$  и  $0,5$  мкм

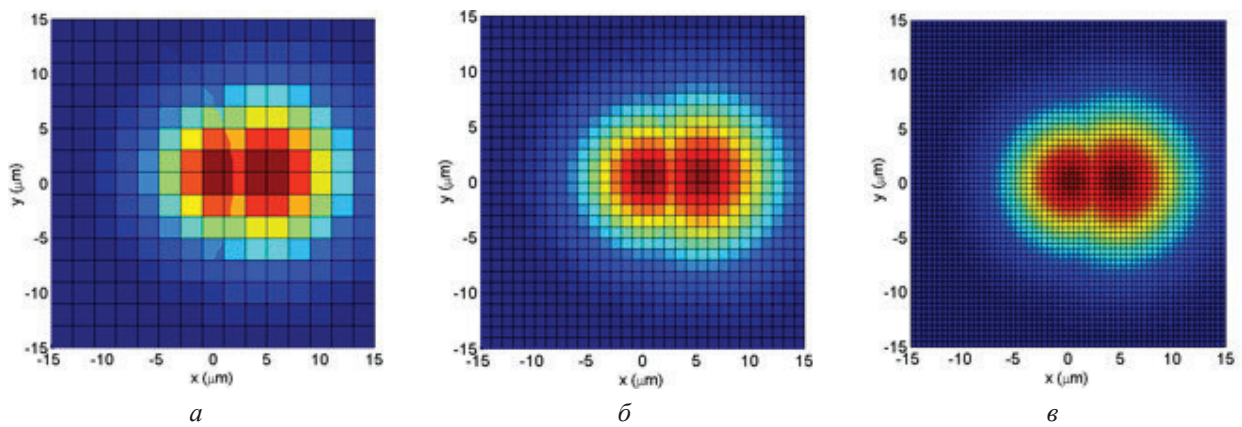


Рисунок 1. Суперпозиция полей основных мод LP01 в дискретном представлении на стыке SM OB, выполненном с радиальным рассогласованием 4,5 мкм, при шаге дискретизации:  $a$  – 2 мкм;  $b$  – 1 мкм;  $v$  – 0,5 мкм

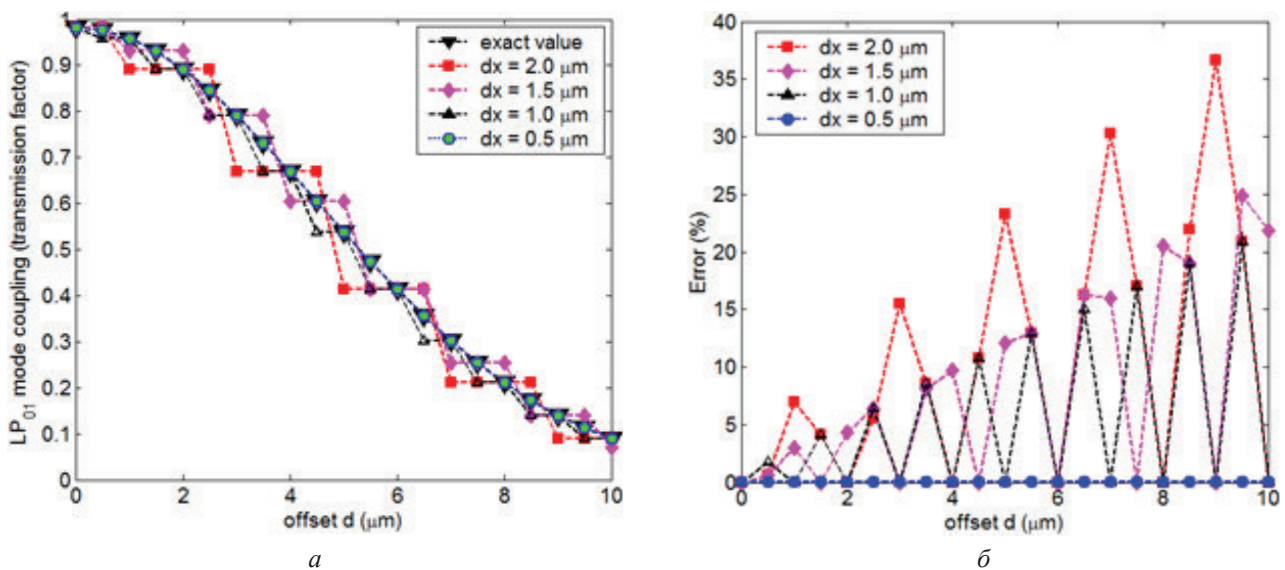


Рисунок 2. К вопросу выбора шага дискретизации для представления поля моды:  $a$  – зависимость значения коэффициента передачи основной моды LP01 для непрерывного и дискретного представления с разным шагом дискретизации;  $b$  – погрешность оценки относительного действительного значения, полученного с помощью аналитической формулы, записанной в рамках приближения Гаусса

(очевидно, что целесообразно выбирать «комфортный», с точки зрения целочисленного деления шаг для построения координатной сетки дискретного представления) [12–20].

На рисунке 2,  $a$  представлены результаты сопоставления построенных зависимостей коэффициента передачи от величины смещения осей соединяемых OB, а на рисунке 2,  $b$  – диаграммы относительной погрешности вычисления указанного параметра. Анализ полученных результатов показывает, что выбор шага дискретизации  $\Delta x = 0,5$  мкм обеспечивает хорошее совпадение с действительным значением при общем визуальном снижении погрешности не менее чем на порядок во всем исследуемом диапазоне  $d$ .

Очевидно, что последующее снижение шага дискретизации  $\Delta x$  позволит еще уменьшить по-

грешность оценки коэффициента передачи. Однако здесь возникает вопрос о целесообразности перехода к экстремально малым  $\Delta x$  с точки зрения повышения требований к производительности ЭВМ / вычислительным ресурсам и продолжительности времени проведения расчетов.

Поэтому далее была выполнена сравнительная оценка погрешности вычисления также коэффициента передачи основной моды LP01 для описанного выше соединения двух SM OB в указанном диапазоне значений осевого смещения  $d$  для уменьшенного шага дискретизации  $\Delta x = 0,5, 0,25, 0,125$  и  $0,1$  мкм. На рисунке 3 приведены результаты расчета. Анализ полученных данных показывает, что даже при выборе  $\Delta x = 0,500$  мкм погрешность соответствует экстремально низким – менее 10 % – значениям.



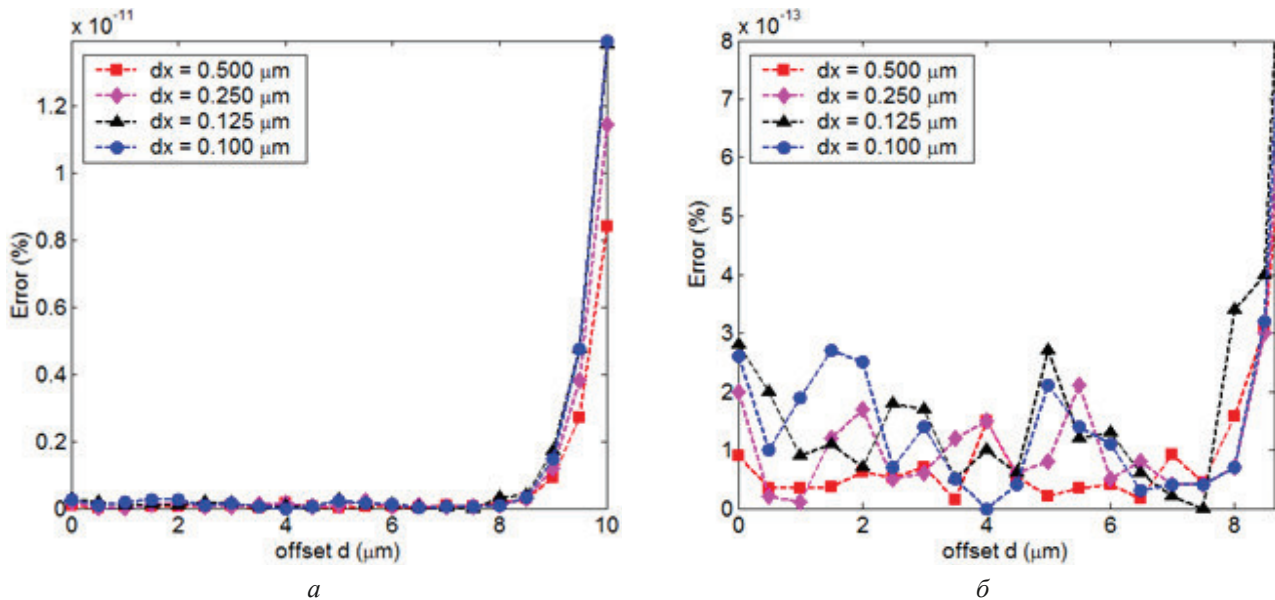


Рисунок 3. Сравнительная оценка погрешности вычисления коэффициента передачи основной моды LP01 для соединения двух SM OB с максимальным разбросом MFR в диапазоне значений осевого смещения  $d = 0 \dots 10$  мкм для уменьшенного шага дискретизации  $\Delta x$ : *a* – общий вид; *б* – увеличенный фрагмент

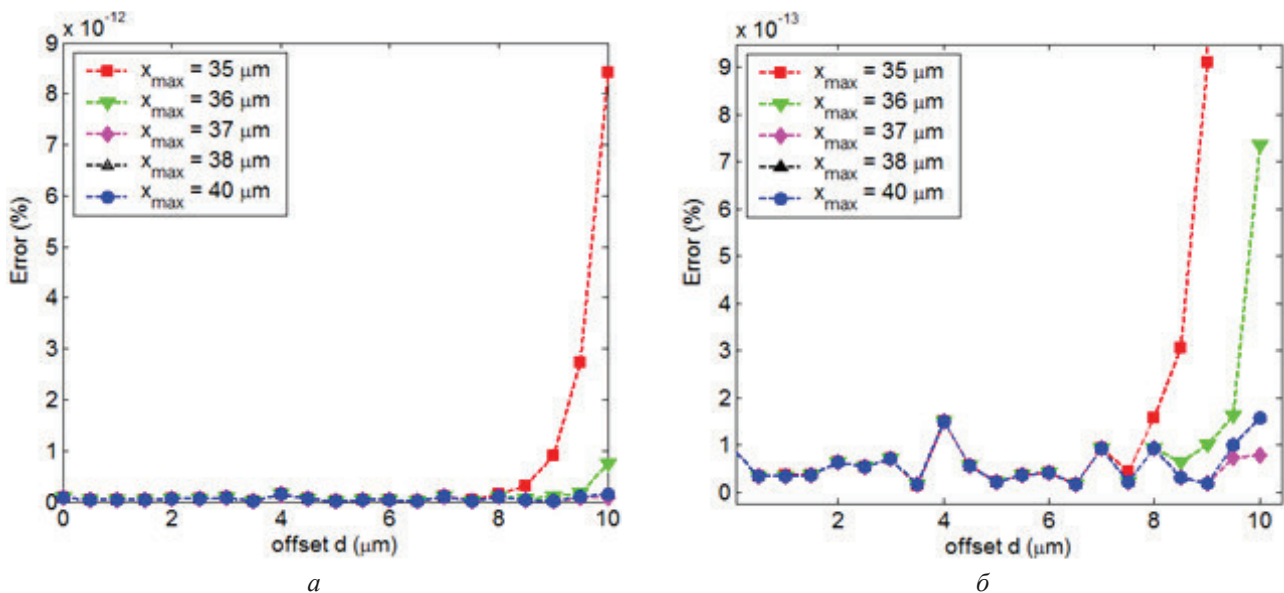


Рисунок 4. Сравнительная оценка погрешности вычисления коэффициента передачи основной моды LP01 для соединения двух SM OB с максимальным разбросом MFR в диапазоне значений осевого смещения  $d = 0 \dots 10$  мкм для шага дискретизации  $\Delta x = 0,5$  мкм при разном выборе верхней границы области дискретного представления поля моды  $x_{max}$ : *a* – общий вид; *б* – увеличенный фрагмент

В то время как последующее снижение параметра  $\Delta x$  не дает существенных преимуществ: погрешность оценки остается в этом же диапазоне малых величин до  $5 \dots 10$ – $13$  % при осевом смещении  $d = 0 \dots 8$  мкм, что позволяет обосновать выбор шага дискретизации  $\Delta x = 0,5$  мкм как оптимальное значение и очевидный компромисс между погрешностью расчетов и временем проведения вычислений, тем не менее некоторое преимущество уменьшения шага дискретизации  $\Delta x$  с точки зрения сопоставления погрешности

наблюдается ближе к верхней границе диапазона  $d = 8,5 \dots 10$  мкм. Здесь можно предположить, что определенное влияние оказывает выбор границы зоны дискретного представления поля моды  $x_{max}$ . Как было отмечено выше, на первом этапе указанное значение составляет  $x_{max} = 35$  мкм – оно определялось, исходя из величины MFR и вводимой поправки непосредственно самого осевого смещения  $d$ . Для проверки данной гипотезы был проведен дополнительно расчет распределения погрешности вычисления коэффициента пере-

дачи основной моды на рассматриваемом стыке пары SM OB в указанном диапазоне  $d$  при шаге дискретизации  $\Delta x = 0,5$  мкм и выборе верхней границы зоны дискретизации  $x_{max} = 35; 36; 37; 38$  и  $40$  мкм. Полученные в результате проведенного расчета диаграммы погрешности вычисления представлены на рисунке 4.

### Заключение

Анализ полученных данных подтверждает целесообразность ввода дополнительной поправки при выборе верхней границы области дискретного представления поля моды: сопоставление построенных диаграмм показывает, что указанный параметр  $2$  мкм (в этом случае  $x_{max} = 25 + 10 + 2 = 37$  мкм) обеспечивает устранение нежелательного выброса погрешности оценки в области верхней границы диапазона исследуемых значений осевого смещения  $d$ .

Таким образом, на основании проведенных исследований потенциальных возможностей оценивания коэффициента передачи основной моды LP01 на базе анализа перекрытия радиального распределения полей в дискретном представлении можно сделать следующие выводы:

- подтверждена возможность проведения оценки коэффициента передачи основной моды LP01 при прохождении соединения SM OB с помощью предложенного подхода, базирующегося на дискретном представлении полей взаимодействующих мод, учетом разброса их MFR, а также рассогласования на стыке: при соответствующем выборе шага дискретизации  $\Delta x$  и верхней границы области дискретного представления  $x_{max}$  погрешность оценки достигает экстремально малых значений – менее  $10\%$ ;

- рекомендуемое значение шага дискретизации  $\Delta x = 0,5$  мкм: в этом случае достигается компромисс с точки зрения обеспечения искомой экстремально малой погрешности расчета (менее  $10\%$ ) при одновременно низких требованиях к вычислительным ресурсам;

- при определении верхней границы области дискретного представления поля основной моды LP01, составляемой из базовых  $25$  мкм относительно характера радиального распределения поля при максимальном значении MFR и введенного осевого (радиального) смещения  $d$ , рекомендуется также учитывать поправку  $2$  мкм.

*Работа подготовлена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-37-90150 «Аспиранты».*

### Литература

1. РД 45.156–2000. Руководящий документ отрасли. Состав исполнительной документации на законченные строительством линейные сооружения магистральных и внутризоновых ВОЛП. ЦНТИ «Информсвязь», 2000. 53 с.
2. ГОСТ Р 53245-2008. Информационные технологии. Системы кабельные структурированные. Монтаж основных узлов системы. Методы испытания. М.: Стандартсвязьинформ, 2018. 40 с.
3. ISO/IEC 11801:2002(E). Information technologies – Generic cabling for customer premises. International Standard. Second Edition 2002-09. 136 p.
4. TIA/EIA-568-B.1. Commercial Building Telecommunications Cabling Standard (Revision of EIA/TIA-568-A). Part 1: General Requirements. 2001. May. 79 p.
5. Нормы приемо-сдаточных измерений элементарных кабельных участков магистральных и внутризоновых подземных волоконно-оптических линий передачи сети общего пользования. М.: Госкомсвязи России, 1997.
6. ITU-T Recommendation G.671. Transmission characteristics of passive optical components.
7. Westover FBP P-5000 FiberCheck2™. Руководство пользователя: пер. с англ., 2008. 58 с.
8. Standard 61300-3-35. Fibre optic interconnecting devices and passive components – Basic test and measurement procedures – Part 3-35: Examinations and measurements – Visual inspection of fibre optic connectors and fibre-stub transceivers: Issue 1.0, 2009. 42 с.
9. Бурдин А.В., Пашин С.С. Оценка коэффициента отражения на разъемном соединении одномодовых оптических волокон по результатам анализа изображений торцевых поверхностей феррул коннекторов // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6, № 4. С. 16–27. DOI: 10.31854/1813-324X-2020-6-4-16-27.
10. Срапионов В.А. Связь мод в стыках оптических волокон с разбросом параметров // Электросвязь. 1985. № 10. С. 10–12.
11. Гурджи С.П., Каток В.Б. Расчет потерь в соединениях одномодовых световодов со сложным профилем показателя преломления // Электросвязь. 1990. № 10. С. 25–27.
12. Fast and simple method for estimation of the insertion loss at the connection of single-mode optical fibers with contaminated fer-

- rule end faces / A.V. Bourdine [et al.] // Proc. SPIE. 2019. № 11516. P. 1151610. DOI: 10.1117/12.2566456.
13. Meunier J.P., Wang Z.H., Hosain S.I. Evaluation of splice loss between two nonidentical single-mode graded-index fibers // IEEE Photonics Technology Letters. 1994. Vol. 6 (8). P. 998–1000.
  14. Yu Q., Zongo P.H., Facq P. Refractive index profile influences on mode coupling effects at optical fiber splices and connectors // IEEE Journal of Lightwave Technology. 1993. Vol. 11 (8). P. 1270–1273.
  15. Chandra R., Thyagarajan K., Ghatak A.K. Mode excitation by tilted and offset Gaussian beams in W-type fibers // Applied Optics. 1978. Vol. 17 (17). P. 2842–2847.
  16. Авруцкий И.А., Сычугов В.А., Тищенко А.В. Исследование процессов возбуждения, излучения и отражения света в гофрированных волноводах // Труды ИОФАН. 1991. Т. 34. С. 3–98.
  17. Meunier J.P., Wang Z.H. Evaluation of tilt or offset loss between two single-mode graded-index optical waveguides // International China Fibercom: proc. Shanghai, China, 1994. P. 356–362.
  18. Hosain S.I., Meunier J.P., Wang Z.H. Coupling efficiency of butt-joined planar waveguides with simultaneous tilt and transverse offset // IEEE Journal of Lightwave Technology. 1996. Vol. 14 (5). P. 901–907.
  19. Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов: пер. с англ. М.: Мир, 1984. 512 с.
  20. Bourdine A.V. Modeling and simulation of piecewise regular multimode fiber links operating in a few-mode regime // Advances in Optical Technologies. 2013. Vol. 2013. P. 469389-1–469389-18.

*Получено 17.03.2021*

**Пашин Станислав Сергеевич**, заместитель директора Центра стратегических инициатив, аспирант кафедры линий связи и измерений в технике связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 987 817-37-82. E-mail: pashinstanislav@outlook.com

### RESEARCH POTENTIAL POSSIBILITIES OF ESTIMATING THE BASIC MODE TRANSMISSION COEFFICIENT BASED ON ANALYSIS OVERLAPPING OF THE RADIAL DISTRIBUTION FIELDS IN DISCRETE REPRESENTATION

*Pashin S.S.*

*Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation  
E-mail: pashinstanislav@outlook.com*

In the article research potential possibilities of estimating the basic mode transmission coefficient based on analysis overlapping of the radial distribution fields in discrete representation. Considered the process of passage the fundamental LP<sub>01</sub> mode, characterized by the simplest distribution field, through the connection of a pair of single-mode optical fibers, made with a certain radial mismatch with a scatter in the values a spot radius mode interacting modes. The results of experimental verification of the proposed method are presented, which have demonstrated the potential of its use.

**Keywords:** *fiber optic connector, key transmission parameters, ferrule contamination, coefficient mode coupling, structured cabling system, single mode fiber, mode field radius*

**DOI:** 10.18469/ikt.2021.19.2.05

**Pashin Stanislav Sergeevich**, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; PhD student of Communication Lines and Measurements in Communication Technology Department, Deputy Director of the Center for Strategic Initiatives. Tel. +7 987 817-37-82. E-mail: pashinstanislav@outlook.com

#### References

1. RD 45.156-2000. Industry Guidance Document. The composition of the executive documentation for the completed construction of line structures of trunk and intra-zone fiber-optic lines. TsNTI «Informsvjaz'», 2000. 53 p. (In Russ.)

2. Gost R 53245-2008. Information Technology. Structured Cable Systems. Installation of the Main Components of the System. Test Methods. Moscow: Standartsvjaz'inform, 2018, 40 p. (In Russ.)
3. ISO / IEC 11801: 2002 (E). Information technologies – Generic cabling for customer premises. International Standard. Second Edition 2002-09. 136 p.
4. TIA/EIA-568-B.1. Commercial Building Telecommunications Cabling Standard (Revision of EIA/TIA-568-A). Part 1: General Requirements. 2001. May. 79 p.
5. Norms of acceptance measurements of elementary cable sections of trunk and intra-zone underground fiber-optic transmission lines of a public network. Moscow: Goskomsvyazi Rossii, 1997.
6. ITU-T Recommendation G.671. Transmission characteristics of passive optical components.
7. Westover Fbp P-5000 Fibercheck2™. Guidance Document: English Trans., 2008, 58 p. (In Russ.)
8. Standard 61300-3-35. Fiber optic interconnecting devices and passive components – Basic test and measurement procedures – Part 3-35: Examinations and measurements – Visual inspection of fiber optic connectors and fiber-stub transceivers: Issue 1.0, 2009, 42 p.
9. Burdin A.V., Pashin S.S. Evaluation of the reflection coefficient at a detachable connection of single-mode optical fibers based on the results of image analysis of the end surfaces of ferrule connectors. *Trudy uchebnyh zavedenij svyazi*, 2020, vol. 6, no. 4, pp. 16–27. DOI: 10.31854/1813-324X-2020-6-4-16-27. (In Russ.)
10. Srapionov V.A. Mode coupling at optical fiber junctions with parameter scatter. *Elektrosvjaz'*, 1985, no. 10, pp. 10–12. (In Russ.)
11. Gurdzhi S.P., Katok V.B. Calculation of losses in connections of single-mode fibers with a complex refractive index profile. *Elektrosvjaz'*, 1990, no. 10, pp. 25–27. (In Russ.)
12. Bourdine A.V. et al. Fast and simple method for estimation of the insertion loss at the connection of singlemode optical fibers with contaminated ferrule end faces. *Proc. SPIE*, 2019, no. 11516, pp. 115161O. DOI: 10.1117/12.2566456.
13. Meunier J.P., Wang Z.H., Hosain S.I. Evaluation of splice loss between two nonidentical single-mode graded-index fibers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1994, vol. 6 (8), pp. 998–1000.
14. Yu Q., Zongo P.H., Facq P. Refractive index profile influences on mode coupling effects at optical fiber splices and connectors. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1993, vol. 11 (8), pp. 1270–1273.
15. Chandra R., Thyagarajan K., Ghatak A.K. Mode excitation by tilted and offset Gaussian beams in W-type fibers. *Applied Optics*, 1978, vol. 17 (17), pp. 2842–2847.
16. Avrutskij I.A., Sychugov V.A., Tischenko A.V. Investigation of the processes of excitation, emission and reflection of light in corrugated waveguides. *Trudy IOFAN*, 1991, vol. 34, pp. 3–98. (In Russ.)
17. Meunier J.P., Wang Z.H. Evaluation of tilt or offset loss between two single-mode graded-index optical waveguides. *International China Fibercom: proc. Shanghai, China*, 1994, pp. 356–362.
18. Hosain S.I., Meunier J.P., Wang Z.H. Coupling efficiency of butt-joined planar waveguides with simultaneous tilt and transverse offset. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1996, vol. 14 (5), pp. 901–907.
19. Adams M. *Introduction to the Theory of Optical Waveguides*. English Trans. Moscow: Mir, 1984, 512 p. (In Russ.)
20. Bourdine A.V. Modeling and simulation of piecewise regular multimode fiber links operating in a few-mode regime. *Advances in Optical Technologies*. 2013. Vol. 2013, pp. 469389-1–469389-18.

*Received 17.03.2021*