

ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ ПАРАЛЛЕЛИЗМ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ ПО ОПТИЧЕСКИМ ВОЛОКНАМ

Коршунов Владимир Николаевич,
Московский технический университет связи и
информатики, г. Москва, Россия, mes@mtuci.ru

DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-1-13-17

Овчинникова Ирина Александровна,
Всероссийский научно-исследовательский институт
кабельной промышленности, г. Москва, Россия,
irovchinnikova@gmail.com

Шишова Надежда Альвиновна,
Московский технический университет связи и
информатики, г. Москва, Россия, n.a.shishova@mtuci.ru

Ключевые слова: параллелизм передачи информации,
множитель параллелизма, пространственное
мультиплексирование, спектральная эффективность,
скорость передачи данных.

Вводится и применяется параметр – множитель параллелизма P , даются выражения для расчета спектральной эффективности и скорости передачи данных, приводятся примеры реализации пространственного параллелизма. Параллелизм передачи информации в оптических волокнах осуществляется посредством применения поляризационного, спектрального, модового, сердцевинного мультиплексирования с коэффициентами мультиплексирования – множителями параллелизма P_i . Множитель пространственного параллелизма $P_{пр}$ соответствует количеству пространственных каналов, создаваемых методами и средствами модового и сердцевинного мультиплексирования. Элементарные, комплексные и интегральный множители параллелизма позволяют оценить пропускную способность оптического волокна, в том числе в программно-конфигурируемых оптических сетях с выбором маршрута, формата модуляции, ширины спектра, задействуемых волоконных сердцевин. Множитель пространственного параллелизма в оптическом волокне в составе оптического кабеля как части волоконно-оптической системы передачи используется для расчета значимый компонент спектральной эффективности и агрегированной скорости передачи данных. Компоненты спектральной эффективности образуются сопоставлением результата и ресурса операции формирования пропускной способности оптического волокна. Даются выражения для расчета спектральной эффективности и для определения скорости передачи в условиях реализации пространственного параллелизма распространения оптических сигналов. Приводятся примеры применения пространственного параллелизма, в т.ч. для трехмодовой схемы с односердцевинным оптическим волокном ($P_{пр} = 3$), имеющим стандартный диаметр оптической оболочки 125 мкм, спектрально уплотненным в оптическом диапазоне C+L, скорость 160...180 Тбит/с и для 6-модовой 19-сердцевинной схемы ($P_{пр} = 114$) с волокном, имеющим диаметр оптической оболочки 318 мкм, спектрально уплотненным в диапазоне C, скорость 2,05 Пбит/с. При 30 спектральных каналах, в трехмодовом семисердцевинном волокне ($P_{пр} = 21$) при канальной скорости 400 Тбит/с скорость передачи данных составляет 250 Тбит/с.

Информация об авторах:

Коршунов Владимир Николаевич, Московский технический университет связи и информатики, профессор кафедры Многоканальных телекоммуникационных систем, д.т.н., Москва, Россия

Овчинникова Ирина Александровна, Всероссийский научно-исследовательский институт кабельной промышленности, директор научного направления – зав. отделением Кабелей и проводов для телекоммуникаций и информатизации, Москва, Россия

Шишова Надежда Альвиновна, Московский технический университет связи и информатики, зав. кафедрой "Многоканальные телекоммуникационные системы", к.т.н., доцент, Москва, Россия

Для цитирования:

Коршунов В.Н., Овчинникова И.А., Шишова Н.А. Пространственный параллелизм высокоскоростной передачи информации по оптическим волокнам // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Том 14. №1. С. 13-17.

For citation:

Korshunov V.N., Ovchinnikova I.A., Shishova N.A. (2020) Spatial parallelism of high-speed transmission of information over optical fibres. T-Comm, vol. 14, no.1, pp. 13-17. (in Russian)

Введение

Оптическое волокно (ОВ) в составе оптического кабеля как части волоконно-оптической системы передачи (ВОСП) является средой распространения сигналов в современных и перспективных проводных инфокоммуникационных сетях. Нарастающими темпами увеличивается мощность инфокоммуникационного транспорта. На 30...60 % (по регионам) растет мировой трафик. Прогнозируется [1] к 2037 году достижение пропускной способности ВОСП со спектральным разделением (ВОСП-СР) 32...400 Тбит/с, при использовании пространственного мультиплексирования – 5...100 Пбит/с. Можно видеть, что параллельная передача сигналов в физическом пространстве позволит радикально повысить скорость передачи, предположительно в 150...250 раз.

Параллельная передача сигналов и, в особенности, пространственный параллелизм создают основу достижения высоких скоростей на оптических инфокоммуникационных сетях, в том числе в Единой сеги электросвязи Российской Федерации. Единая сеть электросвязи РФ образует технологический фундамент цифровой экономики в соответствии с Федеральным проектом «Информационная инфраструктура» национальной программы «Цифровая экономика» [2, 3]. Согласно программе и проекту, в частности, для подключения всех госучреждений к интернету к концу 2024 г. будет проложено на инфокоммуникационных линиях 410 тыс. км оптического кабеля. Следует отметить, что в России растет производство оптических кабелей: так, объем их производства в 2018 году сравнительно с 2017 годом составил 122% по физическим длинам и 120% по волокну [4].

Перманентный количественный рост объемов применения оптических кабелей и систем передачи наряду с повышением скорости передачи оптических сигналов требует адекватного сопровождения – повышения эффективности методов и средств передачи, что обосновывает актуальность исследования совершенствования процесса транспортирования информации, в том числе, в условиях реализации комплекса параллельных путей передачи сигналов посредством пространственного мультиплексирования. Данной тематике посвящена настоящая работа. Здесь вводится параметр – множитель параллелизма, с применением этого параметра определяется спектральная эффективность и скорость передачи информации по оптическим волокнам.

Множитель параллелизма

Параллелизм передачи информации в ОВ реализуется посредством применения поляризационного, спектрального, модового, сердцевинного мультиплексирования с коэффициентами мультиплексирования K_i . Эти коэффициенты [5]:

- $K_1 = p$, число поляризаций;
- $K_2 = m$, количество спектральных каналов ВОСП-СР;
- $K_3 = \mu$, число передаваемых пространственных мод;
- $K_4 = \psi$, число сердцевины в ОВ.

При битовой скорости в спектральном канале до поляризационного мультиплексирования $V_{вх}$ имеем в общем случае результирующую скорость в волокне

$$V_{ОВ} = V_{вх} \cdot \prod_{i=1}^4 K_i \quad | \quad K_i = p, m, \mu, \psi. \quad (1)$$

Введем понятие множитель параллелизма – кратность увеличения битовой скорости благодаря использованию па-

раллельных путей передачи информации и предложим для применения соответствующий параметр P , представляющий собой произведение коэффициентов K_i задействованных видов мультиплексирования:

$$P = \prod_{i=1}^q K_i \quad | \quad q \leq q_{\max} = 4. \quad (2)$$

На рисунке 1 представлена концептуальная схема операции создания параллелизма передачи информации по ОВ. Показан общий случай применения четырех видов параллелизма: поляризационного, спектрального, модового и сердцевинного. На входе схемы – сигнал спектрального канала ВОСП-СР до поляризационного мультиплексирования с битовой скоростью $V_{вх}$. В типовых случаях этот сигнал построен в форматах квадратурной амплитудной модуляции QPSK (QAM4), QAM16, QAM64 и т.п. После первой ступени мультиплексирования имеем обычные для высокоскоростных ВОСП форматы модуляции с двумя поляризациями: DP-QPSK, DP-QAM16, DP-QAM64 и т.д. Здесь $P = p = 2$, и скорость в спектральном канале ВОСП-СР $V_k = 2V_{вх}$. При спектральном уплотнении волокна (WDM) $P = p \cdot m$ и $V_{ВОСП-СР} = p \cdot m \cdot V_{вх}$.

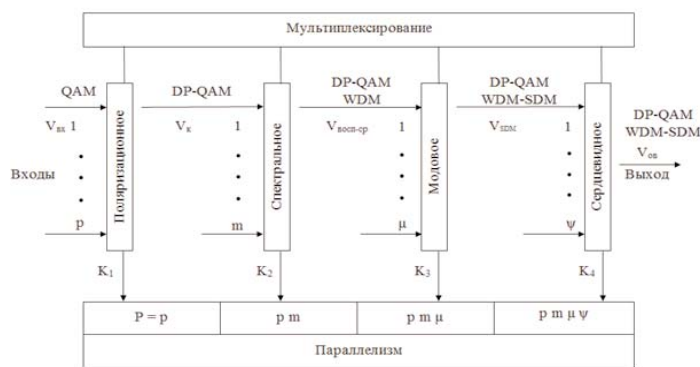


Рис. 1. Схема создания параллелизма передачи информации по ОВ

Последующие шаги мультиплексирования создают пространственный параллелизм передачи информации в оптическом волокне за счет применения пространственного мультиплексирования (SDM, space division multiplexing): модового и сердцевинного [6]. Множители пространственного параллелизма – модовый, сердцевинный и комплексный:

$$P_m = \mu; \quad P_c = \psi; \quad P_{пр} = P_m \cdot P_c = \mu \cdot \psi = M, \quad (3)$$

где M - количество пространственных каналов.

Интегральный множитель параллелизма

$$P_{инт} = p \cdot m \cdot \mu \cdot \psi. \quad (4)$$

Заметим, что выше использованы фиксированные значения параметров оптической системы. Приведенные величины множителей параллелизма (2)-(4) можно рассматривать как максимальные показатели, характеризующие максимальную скорость передачи информации – пропускную способность оптического волокна. В перспективных программно-конфигурируемых (гибких) сетях в текущие моменты времени выбираются маршрут, формат модуляции, ширина

спектра и используемые сердцевинны волокна (RMSCA, routing, modulation format, spectrum and core allocation) [7, 8], и действующие величины $P(i)$ будут находиться в пределах значений, определенных по (2)-(4).

Рассмотрим примеры реализации пространственного параллелизма.

1. Модовый параллелизм [9]. В эксперименте передавались три пространственные моды маломодового ОВ: LP_{01} , LP_{11a} , LP_{11b} , множитель пространственного параллелизма $P_m = 3$. В диапазоне $C + L$ 1528...1610 нм были переданы сигналы 348 спектральных каналов с символьной скоростью 24,5 ГБод (канальные интервалы 25 ГГц) в формате модуляции DP-16QAM по петле из составного тракта маломодовых ОВ длиной 55 км на расстояние 1045 км. Приемник имел компенсатор ММО с 751 звеньями. Для различной кодовой избыточности агрегированная скорость передачи данных составила 160...180Тбит/с. Отмечено, что эксперимент показал возможность реализации модового параллелизма на линиях средней длины со стандартной величиной внешнего диаметра стекловолокна 125 мкм.

2. Комплексный пространственный параллелизм [10]. ОВ диаметром 318 мкм по оптической оболочке имело длину 9,8 км и содержало 19 градиентных маломодовых сердцевин диаметром 17 мкм с шагом размещения 62 мкм в гексагональном расположении сердцевин: в центре волокна, в среднем контуре и во внешнем контуре. Использовались пространственные моды LP_{01} , LP_{11a} , LP_{11b} , LP_{21a} , LP_{21b} , LP_{02} . Множитель пространственного параллелизма $P_{пр} = 6 \cdot 19 = 114$. Оптические сигналы передавались по 360 спектральным каналам с шагом частотной сетки 12,5 ГГц в диапазоне C 191...196 ТГц в формате модуляции DP-QPSK. В режиме «супер-Найквист» символьная скорость составляла 15 ГБод, предполагалась величина избыточности 20%. Общая скорость передачи данных равнялась 2,05 Пбит/с, агрегированная спектральная эффективность для ОВ в целом достигла 450 бит/с/Гц. Эксперимент был проведен с целью получения рекордной скорости передачи данных по волокну с комплексным модовым и сердцевинным параллелизмом.

Спектральная эффективность

Спектральная эффективность передачи информации по оптическому волокну имеет ряд модификаций [11,12]. Эти модификации строятся на основе общего подхода к определению эффективности W технической системы [13], оцениваемой посредством сопоставления величины достигаемого результата G выполняемой операции с количеством H затрачиваемого ресурса. Эффективность операции формирования свойств оптических систем, кабелей и волокон определяется соотношением

$$W = G / H. \quad (5)$$

В качестве свойств рассматриваем пропускную способность и агрегированную в результате осуществления пространственного параллелизма спектральную эффективность. Результат операции

$$G = \{G_i | i = \overline{1,2}, G_1 = R, G_2 = \gamma_{agr}\}, \quad (6)$$

где R и γ_{agr} – соответственно скорость и агрегированная спектральная эффективность передачи информации.

В свою очередь, скорость передачи информации

$$R = \{R_i | i = \overline{1,2}, R_1 = V, R_2 = B\}, \quad (7)$$

где V и B – битовая и бодовая (символьная) скорости.

Ресурс выполнения операции

$$H = \{H_i | i = \overline{1,2}, H_1 = S, H_2 = A\} \quad (8)$$

Здесь S – спектральный ресурс,

$$S = \{S_i | i = \overline{1,2}, S_1 = F, S_2 = \Lambda\}, \quad (9)$$

F – ширина диапазона частот, предназначенного для передачи сигналов; Λ – ширина соответствующего диапазона длин волн. Пространственный ресурс характеризуется величиной площади поперечного сечения ОВ в границах оптической оболочки с диаметром $D_{об}$:

$$A = \pi D_{об}^2 / 4. \quad (10)$$

Таким образом, результат G и ресурс H комбинируются в пары (5) трех видов результата (6), (7) и трех видов ресурса (8) - (10) с образованием пяти модификаций эффективности.

$$W = \Gamma = \{\gamma_i | i = \overline{1,5}\} \quad (11)$$

Синтез модификаций спектральной эффективности иллюстрирует схема на рис. 2. На этой схеме представлены элементы множества Γ :

– собственно спектральная эффективность SE , в т.ч. в агрегированном виде γ_{agr}

$$\gamma_1 = \gamma = V / F; \quad (12)$$

– бодовая эффективность BE

$$\gamma_2 = \gamma_B = B / F; \quad (13)$$

– спектрально-волновая эффективность SWE , в т.ч. в агрегированном виде γ_{agr}

$$\gamma_3 = \gamma_\Lambda = V / \Lambda; \quad (14)$$

– бодово-волновая эффективность BWE

$$\gamma_4 = \gamma_{B\Lambda} = B / \Lambda; \quad (15)$$

– спектрально-пространственная эффективность SSE

$$\gamma_5 = \gamma_\zeta = \gamma_{agr} / A. \quad (16)$$

Пространственный параллелизм влияет на величины битовой скорости V и агрегированной спектральной эффективности γ_{agr} .

Собственно спектральная эффективность (12) представляет собой отношение канальной скорости V_k к ширине канального интервала $F_{ки}$:

$$\gamma = V_k / F_{ки}. \quad (17)$$

Агрегированная собственно спектральная эффективность увеличена множителем пространственного параллелизма:

$$\gamma_{\text{агр}} = \gamma \cdot P_{\text{пр}} \quad (18)$$

Аналогично выражаются спектрально-волновая эффективность и агрегированная спектрально-волновая эффективность:

$$\gamma_{\Lambda} = V_{\text{к}} / \Lambda_{\text{ки}} \quad (19)$$

$$\gamma_{\text{Лагр}} = \gamma_{\Lambda} \cdot P_{\text{пр}} \quad (20)$$

здесь $\Lambda_{\text{ки}}$ – волновой каналный интервал.

Из соотношений (12), (14), (16), (18), (20) можно видеть, что от реализации пространственного параллелизма зависят модификации эффективностей $\gamma_{\text{агр}}$, $\gamma_{\text{Лагр}}$, γ_{ζ} , соответствующие агрегированной битовой скорости передачи данных.

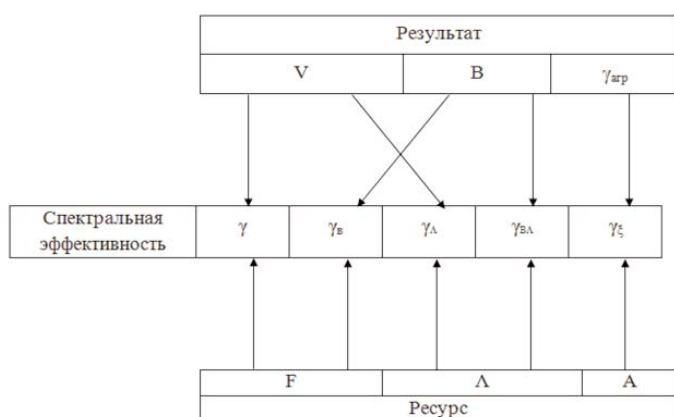


Рис. 2. Схема образования модификаций спектральной эффективности

Скорость передачи

Агрегированная скорость передачи данных по оптическому волокну

$$V_{\text{ОВ}} = \begin{cases} F_{\text{ки}} \cdot \gamma \cdot m \cdot \mu \cdot \psi, \\ \Lambda_{\text{ки}} \cdot \gamma_{\Lambda} \cdot m \cdot \mu \cdot \psi. \end{cases} \quad (21)$$

Обозначив

$$V_{\text{ВОСП-СР}} = F_{\text{ки}} \cdot \gamma \cdot m = \Lambda_{\text{ки}} \cdot \gamma_{\Lambda} \cdot m \quad (22)$$

и применив параметр – множитель пространственного параллелизма (3), получаем битовую агрегированную скорость в волокне

$$V_{\text{ОВ}} = V_{\text{ВОСП-СР}} \cdot P_{\text{пр}} \quad (23)$$

При известной канальной скорости имеем

$$V_{\text{ОВ}} = V_{\text{к}} \cdot m \cdot P_{\text{пр}} \quad (24)$$

Например, для значений $V_{\text{к}} = 400$ Гбит/с [14], $m = 30$, $\mu = 3$, $\psi = 7$, величина $V_{\text{ОВ}} = 250$ Тбит/с.

Заключение

Передача сигналов параллельными путями является ключевым фактором реализации высокой пропускной способности оптических линий на современных и перспективных инфокоммуникационных сетях. Радикальное повышение скорости передачи информации по оптическим волокнам обеспечивается методами и средствами пространственного параллелизма. Параметр множитель параллелизма позволяет осуществлять количественную оценку вклада пространственного мультиплексирования в формирование скорости в оптическом волокне в составе оптического кабеля как части системы передачи. Множитель параллелизма соответствует числу пространственных каналов в ОВ, создаваемых посредством модового и сердцевинного мультиплексирования. С помощью этого параметра могут быть рассчитаны величины модификаций спектральной эффективности и агрегированной скорости передачи данных по оптическим волокнам в условиях реализации комплексного, в т.ч. пространственного параллелизма.

Литература

1. Winzer P.J., Neilson D.T., Chraplyvy A.R. Fiber-optic transmission and networking: the previous 20 and the next 20 years // Optics express, 2018, vol.26, no. 18. P.24190-24239.
2. Ефимушкин В.А., Козаченко Ю.М., Ледовских Т.В., Щербакова Е.Н. Будущий облик Единой сети электросвязи Российской Федерации // Электросвязь. 2018. № 10, С.18-27.
3. Парфенов Б.А. Как внедряем цифру // Вестник связи. 2019. № 9. С. 29-35.
4. Пешиков И.Б. Кабельная промышленность в условиях становления национальной цифровой экономики // Кабели и провода. 2019. № 2. С.20-24.
5. Кориунов В.Н., Шаврин С.С., Шишова Н.А. Скорость ВОСП при комплексном мультиплексировании // Вестник связи. 2017. № 10. С. 22-24.
6. Кориунов В.Н., Овчинникова И.А. Применение пространственного мультиплексирования при передаче информации по оптическим кабелям // Кабели и провода. 2018. № 1. С. 12-18.
7. Abedifar V., Eshghi M. Routing, modulation format, spectrum and core allocation in space-division-multiplexed programmable fetherless networks // Optical fiber technology, 2019, no. 49, pp. 37-49.
8. Bosco G. Advanced modulation techniques for flexible optical transceivers: the rate/reach tradeoff // Journal of Lightwave Technology, 2019, v.37, no 1. pp. 36-49.
9. Rademacher G. et al. High capacity transmission with few-mode fibers // J. lightw. technol, 2019, v.37, no. 2. pp. 425-432.
10. Igarashi K. Ultra-dense spatial-division-multiplexed optical fiber transmission over 6-mode 19-core fibers // Opt. express, 2016, v.24, no. 10, pp. 10213-10231.
11. Кориунов В.Н., Овчинникова И.А. Спектральная и пространственная эффективность высокоскоростной передачи информации по оптическим волокнам // Электросвязь. 2018. № 5. С. 61-65.
12. Korshunov V.N., Ovchinnikova I.A., Shavrin S.S., Shishova N.A., Tsym A.Y. Spectral efficiency of fiber – optic systems modifying conception advance // Systems of signals generating and processing in the field of on board communications, 2019, march 20-21. Moscow. Russia.
13. Надежность и эффективность в технике. Справочник в 10 т. Т.3. Эффективность технических систем. М.: Машиностроение, 1988.
14. Коньшиев В., Наний О., Трециков В. Развитие волоконно-оптических информационных сетей DWDM DCI // Первая мила. 2019. № 4. С. 46-50.

SPATIAL PARALLELISM OF HIGH-SPEED TRANSMISSION OF INFORMATION OVER OPTICAL FIBRES

Vladimir N. Korshunov, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, mes@mtuci.ru

Irina A. Ovchinnikova, All-Russian Research Institute of Cable Industry, Moscow, Russia, irovchinnikova@gmail.com

Nadezhda A. Shishova, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, n.a.shishova@mtuci.ru

Abstract

The article introduces and applies the parameter P – factor of parallelism, gives expressions for calculating the spectral efficiency and data transfer rate, provides examples of the implementation of spatial parallelism. Parallelism of information transmission in optical fibers is carried out through the use of polarization, spectral, mode, core multiplexing with multiplexing coefficients – parallelism multipliers P_i . The multiplier of spatial parallelism of Psp corresponds to the number of spatial channels created by methods and means of mode and core multiplexing. Elementary, complex and integral parallelism multipliers allow estimating the bandwidth of optical fiber, including software-configurable optical networks with a choice of route, modulation format, spectrum width, fiber cores involved. The spatial parallelism multiplier in optical fiber as part of an optical cable which is integrated in a fiber-optic transmission system is used to calculate the values of the spectral efficiency components and the aggregated data rate. The spectral efficiency components are formed by comparing the result and resource of the optical fiber bandwidth shaping operation. Expressions are given to calculate the spectral efficiency and to determine the transmission rate in the conditions of optical signals propagation spatial parallelism realization.

Keywords: the parallelism of information transfer, concurrency multiplier, spatial multiplexing, spectral efficiency, data rate.

References

1. Winzer P.J., Neilson D.T., Chraplyvy A.R. (2018). Fiber-optic transmission and networking: the previous 20 and the next 20 years. *Optics express*, vol.26, no. 18, pp. 24190-24239.
2. Efimushkin V.A., Kozachenko Y.M., Ledovskikh T.V., Shcherbakova E. N. (2018). Budushij oblik Edinoj seti elektrosvyazi Rossijskoj Federacii [Future appearance of the Unified Telecommunication Network of the Russian Federation], *Electrosvyaz*, no. 10, pp. 18-27.
3. Parfenov B.A. (2019). Kak vnedryaem zyfru [As we introduce figure], *Vestnik Sviazy*, no. 9, pp. 29-35.
4. Peshkov I.B. (2019). Kabel'naya promyshlennost' v usloviyah stanovleniya nacional'noj cyfrovoy ekonomiki [The cable industry as the national digital economy grows], *Kabely i Provoda*, no. 2, pp. 20-24.
5. Korshunov V.N., Shavrin S.C., Shishova N.A. (2017). Skorost' VOSP pri kompleksnom mul'tipleksirovanii [Speed of FLOT in complex multiplexing], *Vestnik Sviazy*, no. 10, pp. 22-24.
6. Korshunov V.N., Ovchinnikova I.A. (2018). Primenenie prostranstvennogo mul'tipleksirovaniya pri peredache informacii po opticheskim kabelyam [Application of spatial multiplexing when transmitting information over optical cables], *Kabely i Provoda*, no. 1, pp. 12-18.
7. Abedifar V., Eshghi M. (2019). Routing, modulation format, spectrum and core allocation in space-division-multiplexed programmable fetherless networks. *Optical fiber technology*, no. 49, pp. 37-49.
8. Bosco G. (2019). Advanced modulation techniques for flexible optical transceivers: the rate/reach tradeoff. *Journal of Lightwave Technology*, v.37, no 1, pp. 36-49.
9. Rademacher G. et al. (2019). High capacity transmission with few-mode fibers. *J. lightw. technol.*, v.37, no. 2, pp. 425-432.
10. Igarashi K. (2016). Ultra-dense spatial-division-multiplexed optical fiber transmission over 6-mode 19-core fibers. *Opt. express*, v.24, no. 10, pp. 10213-10231.
11. Korshunov V.N., Ovchinnikova I.A. (2018). Spektral'naya i prostranstvennaya effektivnost' vysokoskorostnoj peredachi informacii po opticheskim voloknam [Spectral and spatial efficiency of high-speed transmission of information over optical fibers], *Electrosvyaz*, no. 5, pp. 61-65.
12. Korshunov V.N., Ovchinnikova I.A., Shavrin S.S., Shishova N.A., Tsym A.Y. (2019). Spectral efficiency of fiber – optic systems modifying conception advance, *Systems of signals generating and processing in the field of on board communications*, march 20-21. Moscow, Russia.
13. *Nadezhnost' i jeffektivnost' v tehnikе [Reliability and efficiency in engineering]*, Spravochnik v 10 t. [Handbook in 10 volumes], T.3 Effektivnost' tehnikeskikh sistem [Efficiency of technical systems]. Moscow: Mashinostroenie, (1988).
14. Konyshov V., Naniy O., Treshchikov V. (2019). Razvitie volokonno-opticheskikh informacionnyh setej DWDM DCI [Development of DWDM DCI fiber optic information networks]. *Pervaya milya*, no. 4, pp. 46-50.

Information about authors:

Vladimir N. Korshunov, Moscow Technical University of Communications and Informatics, full doctor of technical science, professor of the "Telecommunication Systems" chair, Moscow, Russia

Irina A. Ovchinnikova, All-Russian Research Institute of Cable Industry, Director of Scientific Direction – Head of the Department of Cables and Wires for Telecommunications and Informatization, candidate of sciences in technology, Moscow, Russia

Nadezhda A. Shishova, Moscow Technical University of Communications and Informatics, PhD, associate professor, head of the "Telecommunication Systems" chair, Moscow, Russia