

13. Zhang J. et al. An InP-based vortex beam emitter with monolithically integrated laser. *Nature Communications*, 2018, vol. 9, no 1, pp. 2652.
14. Li R. et al. Radially polarized orbital angular momentum beam emitter based on shallow-ridge silicon microring cavity. *IEEE Photonics Journal*, 2014, vol. 6, no. 3, pp. 1–10.
15. Jian Y.-H., Chow C.-W. Design and analysis of a compact micro-ring resonator signal emitter to reduce the uniformity-induced phase distortion and crosstalk in orbital angular momentum (OAM) division multiplexing. *Optics Express*, 2023, vol. 31, no. 2, pp. 810.
16. Chung H. et al. Generation of E-band metasurface-based vortex beam with reduced divergence angle. *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 8289.
17. Bakirova L.I. et al. Micro-ring resonator-based tunable vortex beam emitter. *Micromachines*, 2023, vol. 15, no. 1, pp. 34.
18. Acharyya N., Kozyreff G. Large Q factor with very small whispering-gallery-mode resonators. *Physical Review Applied*, 2019, vol. 12, no. 1, pp. 014060.
19. Li S. et al. Orbital angular momentum vector modes (de)multiplexer based on multimode micro-ring. *Optics Express*, 2018, vol. 26, no. 23, pp. 29895.
20. Li S. et al. Compact high-efficiency vortex beam emitter based on a silicon photonics micro-ring. *Optics Letters*, 2018, vol. 43, no. 6, pp. 1319.

*Received 29.03.2024*

УДК 535.21

## ВЫРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО СТРУКТУРЕ ВОЛН ГОРОДСКИХ СЕТЕЙ, МИНИМАЛЬНО ИСКАЖАЮЩЕЙ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ ФИМД-СИГНАЛЫ

*Виноградова И.Л.<sup>1</sup>, Головина Е.Ю.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *Уфимский университет науки и технологий, Уфа, РФ*

<sup>2</sup> *Институт нефтепереработки и нефтехимии Уфимского государственного нефтяного  
технического университета в г. Салавате, Салават, РФ*

*E-mail: egolovina82@mail.ru*

В статье исследуется задача построения абонентских разветвленных сетей xPON/MAN/RoF, на базе волоконно-оптических линиях передачи, с возможностью нереляционного управления. А именно – с передачей управляющей информации в составе абонентского сигнала. Предложено в качестве параметра, переносящего управляющую информацию, задействовать функцию изменения мгновенной длины волны оптического сигнала. Предложен способ моделирования таких сегментов, проанализирован характер функции изменения мгновенной длины волны оптического сигнала, выработаны рекомендации по включению световодов Erbium Doped Fiber Amplifier, и по методам подведения накачки к ним с точки зрения поддержания положительного chirпирования для информационно-управляющего сигнала с функцией изменения мгновенной длины волны. Предполагалось, что обеспечение положительного chirпирования позволит минимизировать искажения при передаче последнего. Сделан вывод о значительном влиянии разветвлений на функции изменения мгновенной длины волны оптического сигнала. Получены рекомендательные параметры сегментов для различной степени их разветвленности.

**Ключевые слова:** *Passive Optical Networks, Metropolitan Area Networks, Radio-over-Fiber; волоконно-оптическая линия передачи, Y-разветвители, Erbium Doped Fiber Amplifier, chirпирование*

### Введение и постановка задачи

Развитие роботизированных систем, концепций «Интернета Вещей» (Internet of Things, IoT) и «Промышленного Интернета Вещей» (Industrial Internet of Things, IIoT) привело к увеличению процессов обмена информацией в сети. При этом рост последних обусловлен в основном взаимодействием не между людьми, или человеком и устройством, а между самими устройствами (автоматизированное управление беспилотной техни-

кой, и, в том числе, беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), компьютеризация и телеметрия подвижных объектов, и т.д.), что повышает требования к скорости обработки сигналов и сообщений в системах связи. Отсюда возрастает актуальность задачи расширения возможностей управления сигналом, так как согласно [1], в настоящее время одним из весомых факторов задержки является продолжительность выполнения именно операций управления  $\tau_{упр}$ .

Необходимо заметить, что к настоящему времени уже выработан и успешно применяется один из подходов повышения скорости управления сетевыми операциями, предполагающий, в частности, понижение уровня OSI для конкретной задачи управления по отношению к уровню, на котором такая задача выполнялась традиционно. В том числе – перенос их и на физический уровень – с привлечением эффектов и процессов последнего, чему способствовало появление аналогичных телекоммуникационных задач [1; 2] в недавнем прошлом.

Среди таких подходов к настоящему моменту стандартизацию прошли не все, тем не менее, некоторые из них зарекомендовали себя положительно и сформировались в практически самостоятельные телекоммуникационные технологии. К таковым можно отнести технологию RoF (Radio-over-Fiber), основанную на получении радиочастоты (радиочастотного сигнала) при сложении (точнее – вычитании) двух оптических частот в нелинейном элементе [3], которая сочетает в себе преимущества волоконно-оптических систем с гибкостью и мобильностью, присущими радиосвязи. Эта технология позволяет передавать данные по волоконно-оптической линии передачи (ВОЛП) на значительные расстояния, а затем преобразовывать их в радиосигналы для беспроводной связи практически без использования традиционной цифровой аппаратуры для обработки сигналов, что обеспечивает миниатюризацию компонентной базы и увеличивает скорость выполнения операций.

Тем не менее, в RoF решены не все задачи: существует необходимость как дальнейшего повышения скорости управления сетевыми процессами [4], так и потребность в экономии телекоммуникационного ресурса (полосы пропускания), в том числе, ресурса управления [5; 6] – когда требуется поддержка массового количества устройств в сетях IoT, IIoT. Для решения таких задач можно применить метод передачи управляющей информации в самом сигнале [2; 7] – так называемого «нереляционного управления» [2], особенно если метод будет основан на процессах физического уровня.

Применительно к IoT, IIoT на базе RoF, нереляционное управление можно реализовать, если в оптическом импульсном сигнале, передаваемом по ВОЛП-RoF, задействовать дополнительное свойство/параметр физического уровня под передачу информации управления, которая затем будет использована, например, в радиосегменте [8]. Особый интерес будет представлять случай, когда такой параметр не относится к традиционно используемым в телекоммуникациях, что, соответственно, позволит сэкономить телекоммуникационный ресурс или вовсе не задействовать его под нужды управ-

ления. Так в [8] предложено в качестве такого параметра использовать функцию чирпа оптических импульсов [9] на ВОЛП-RoF, или, другими словами, функцию изменения мгновенной длины волны оптического сигнала (ФИМД). В [8] рассмотрен технический пример применения ФИМД в импульсном сигнале, передаваемом по оптоволоконной линии, для управления радиосегментом RoF-сети. Предполагалось, что на ВОЛП-RoF в основном применяются амплитудно-модулированные сигналы [3–6]. Также предложен вариант построения схемы оптической принципиальной управления фазированной антенной решеткой (ФАР) посредством ФИМД, содержащей специализированные оптические компоненты. Одним из которых является разработанный авторами преобразователь ФИМД→амплитуда [10]. Традиционно управление ФАР неизбежно потребует дополнительного канала управления, а в предложенном методе [8] управляющая информация передается скрыто и без задействования традиционного телекоммуникационного ресурса, так как ФИМД в волоконно-оптическом канале для передачи информации не используется и приемником не воспринимается. Метод [8] дополнительно позволяет перенести часть служебных функций из радиосегмента на оборудование, расположенное «на земле». Если радиосегмент обслуживает рой(рой) БПЛА, то упрощение аппаратуры и снижение энергетики взаимодействия на летающей сети является весомым положительным фактором, особенно с учетом значительной динамики перемещения объектов.

Здесь же, продолжая следовать концепции [8], авторы ставят задачу изучения вопроса передачи информационно-управляющего ФИМД-сигнала по волоконно-оптической части RoF, учитывая, что RoF-сегмент может быть включенным в состав сети доступа xPON (Passive Optical Networks (пассивная оптическая сеть)), либо в абонентское окончание городской сети Metropolitan Area Networks (MAN) [2], далее – сегмент MAN. В подобных случаях ВОЛП может быть протяженной (от неск. десятков км до сотни км), на которой уже будет проследиваться значительное действие дисперсии групповых скоростей (ДГС); может иметь разветвления, а также содержать волоконно-оптические усилители (ВОУ), что окажет влияние на как на ФИМД, сформированную удаленно, так и на форму импульсов. Представленное ниже моделирование направлено на получение рекомендаций по структуре и составу компонентной базы ВОЛП для xPON/MAN сегментов с RoF-окончанием, на котором используется удаленное ФИМД-управление. Предполагается, что существенной компонентой, обеспечивающей

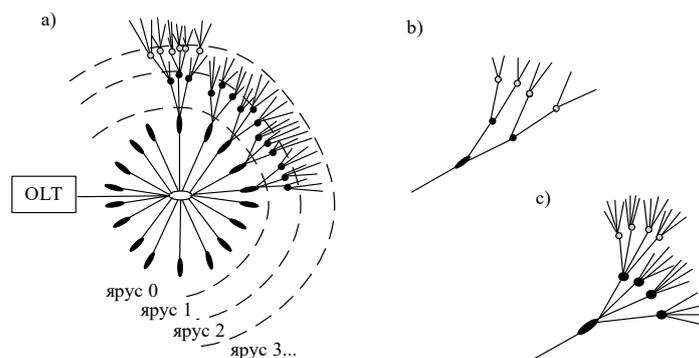


Рисунок 1. Принцип симметричного построения разветвлено-ярусных сегментов xPON/MAN с использованием пассивных разветвителей: а) иллюстрация ярусной структуры; б), с) примеры применения разветвителей 1×2 и 1×4 соответственно; OLT – активное оборудование линейного тракта

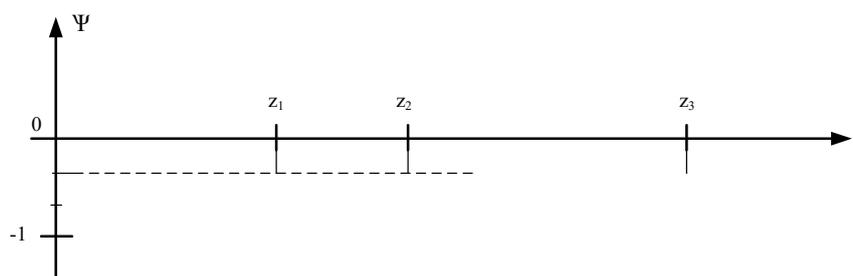


Рисунок 2. Принцип формирования коэффициента  $\psi(z)$  для сегмента по рисунку 1а); отмечено вертикальными линиями в точках  $z_1$ ,  $z_2$  и  $z_3$

минимизацию искажений ФИМД-сигнала, является не смещение ФИМД в сторону отрицательного chirпирования, а получение рекомендаций по структуре ВОЛП для рассматриваемой категории сетей, обеспечивающей положительное chirпирование, с учетом того, что последнее является естественным фактором оптоволоконных линий.

### Моделирование процесса прохождения информационно-управляющего ФИМД-сигнала через волоконно-оптическую линию передачи

Для моделирования примем, что сегмент xPON/MAN является сложно разветвленной многоярусной системой на базе Y-разветвителей с различной степенью деления, рисунок 1. Вообще говоря, для создания таких структур могут использоваться как пассивные Y-разветвители, так и переключаемые коммутаторы по аналогии с [1; 2; 11; 12], но в настоящее время при построении сегментов рассматриваемой категории сетей в России последние практически не применяются.

С точки зрения унифицированности технического решения будем считать сегмент симметричным по оборудованию, что является предпочтительным для эксплуатирующихся сетей [13]. Это означает, что применяемые разветвители должны быть одно-

го типа, т.е. если применяются разветвители 1×2, то на его базе строится весь абонентский сегмент во всех ярусах, рисунок 1б.

Выполним оценку характера изменения ФИМД для входного импульса, представленного в виде супергауссовой функции [9] второго порядка, приблизительно соответствующего форме импульса амплитудно-модулированного сигнала. Для моделирования воспользуемся методикой расчета параметров импульса (мгновенных частоты и мощности), подробно изложенной в [9], в рамках которой предполагается, что электрическая напряженность поля световой волны на ВОЛП в каждый момент времени  $T$  в пределах длительности импульса может быть представлена в виде произведения комплекснозначных «продольного» и «поперечного» сомножителей. Причем ввиду отсутствия в задаче необходимости поперечного восприятия сигнала, «поперечной» составляющей можно пренебречь, задав ее значение равным 1. Для «продольной» составляющей, обозначенной через  $A_{1550}$  по аналогии с [9] с учетом наиболее распространенного значения длины волны излучения сигнала 1550 нм, изменяющейся под действием ДГС, километрического затухания и скачкообразного снижения мощности вследствие деления в разветвителях (пусть с коэффициентом  $\Psi$  из-за их однообразия), можно записать:

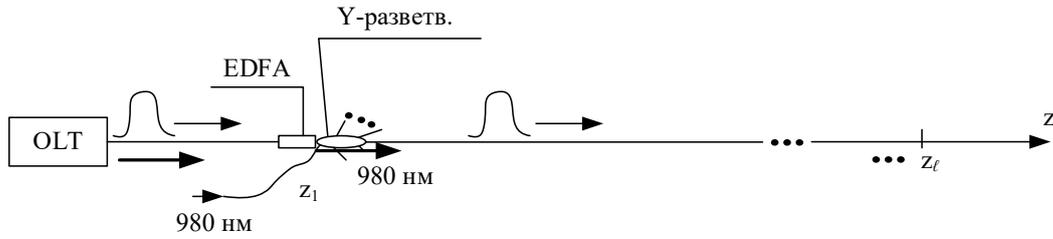


Рисунок 3. Пример расположения компонентов на сегменте xPON/MAN. В точках  $z_c$  располагаются EDFA и Y-разветвители

$$\frac{\partial A_{1550}}{\partial z} + \frac{j}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A_{1550}}{\partial T^2} = \frac{\alpha_{1550}}{2} \cdot |A_{1550}| + \Psi(z) \cdot |A_{1550}| \quad (1)$$

где  $\Psi(z)$  – характеризует размещение (удаленность) разветвителей по рисунку 1а), и может, например, определяться следующим образом, рисунок 2;  $\alpha_{1550}$  – километрическое затухание оптического кабеля,  $\alpha_{1550} < 0$ ;  $j$  – мнимая единица;  $T$  – время в системе отсчета, связанной с импульсом (изначальной длительности  $T_0$  на входе ВОЛП),  $\beta_2$  – дисперсионный параметр. В (1) и далее знак комплекснозначности (точка над  $A_{1550}$ ) опущен для упрощения записи. Параметр  $\beta_1$  явно не входит в (1), т.к. присутствует в пересчете от времени внешнего наблюдателя  $t$ , связанного, например, с ВОЛП, на время  $T$  по аналогии с [9].

Если на ВОЛП расположены усилители, например, перед разветвителями, что свойственно схемам построения xPON, то коэффициент  $\Psi$  может быть как меньше 0, так и больше 0. Соотношение (1) может использоваться также для схемы с различными параметрами разделения разветвителей, но тогда для каждого сегмента оно должно записываться индивидуально.

Первый этап моделирования ФИМД через параметр  $\omega_{мгн}(T)$  (мгновенная частота излучения) для поступающего на сегмент импульса, представляемого в виде супергауссовой функции с chirпованными фронтами [7; 9; 14] на основе уравнения (1) показал, что характер разветвлений (количество разветвителей, порядок вдоль  $z$  и тип разветвителя) не влияет на выходную ФИМД. Последний показатель зависит только от действия дисперсии. Причем выходная ФИМД не зависит даже от значения  $z_1$ , т.е. от удаления первого разветвителя от оптического линейного терминала (OLT, Optical Linear Terminal) (считаем, что на узле с OLT формируется информационно-управляющий ФИМД-сигнал). Влияние  $\Psi(z)$  оказывается существенным только для выходной пиковой мощности импульса.

Поэтому для более детального исследования рассматриваемой задачи было сделано предпо-

ложение, что перед разветвителями может быть установлен волоконно-оптический усилитель на оптическом волокне, легированном ионами эрбия (EDFA, Erbium Doped Fiber Amplifier). Причем EDFA может располагаться и на неразветвленном протяженном сегменте (с длиной свыше  $\sim 50$  км). Рассматривалось два случая подачи накачки – совместно с информационным сигналом [15] из ближайшего узла и независимо от информационного сигнала [2; 13]. Совместная подача накачки, с точки зрения влияния на ФИМД, согласно предыдущим исследованиям, смещает последнюю в область положительного chirпования ввиду влияния на ВОЛП нелинейного преломления. Этот случай описывается следующим уравнением (в правой части которого также может присутствовать слагаемое с  $\Psi(z)$ ):

$$\frac{\partial A_{1550}}{\partial z} + \frac{j}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A_{1550}}{\partial T^2} = \frac{\alpha_{1550}}{2} \cdot |A_{1550}| + j\gamma_{1550}^{HL} \left( |A_{1550}|^2 \right) A_{1550} \quad (2)$$

Нелинейный (НЛ) коэффициент в (2)  $\gamma_{1550}^{HL}$  рассчитывался по формуле:  $\gamma_{1550}^{HL} \cong \frac{n_{HL,k} \cdot \omega_{u,0}}{c \cdot s_{эфф}^{OB}}$  [9], где  $c \cdot s_{эфф}^{OB}$  – эффективная площадь модового пятна в световоде, примем  $c \cdot s_{эфф}^{OB} \approx 1,2 \cdot 10^{-11}$  для световода типа SMF-28,  $c$  – скорость света в вакууме,  $n_{HL,k}$  – нелинейный (керровский) показатель преломления,  $\omega_{u,0}$  – центральная частота в спектре сигнала [9]. Очевидно, что влияние нелинейного режима преломления тем сильнее, чем выше мощность информационного сигнала. Разветвители же снижают последнюю, что позволяет сказать, что наличие разветвлений должно приводить к увеличению отрицательного характера chirпования.

Независимая от информационного сигнала подача накачки к EDFA непосредственно не влияет на ФИМД, но обеспечивает создание нелинейного режима только внутри EDFA. В первом случае нелинейный режим внутри EDFA также учитывался;  $s_{эфф}^{EDFA} \approx 0,4 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$ . В обоих случаях учитывалось усиление сигнала в EDFA, для чего в (2) вместо  $\alpha_{1550}$  использовался коэффициент  $\alpha_{1550}^{EDFA} > 0$ .

Если необходимо сместить ФИМД еще значительнее в область положительного chirпования,

то совместно с EDFA можно использовать также оптическое волокно (ОВ) с высокой керровской нелинейностью (НЛ ОВ) и/или оптические волокна со смещенной дисперсией (DSF), включаемые после EDFA, но до разветвителя [16; 17]. Для моделирования такого случая считалось допустимым воспользоваться «эффективным»  $\gamma_{1550}^{НЛ-эфф}$ , учитывающим дополнительный эффект от НЛ ОВ или DSF.

При наличии на ВОЛП EDFA, а также других упомянутых выше типов специальных световодов, моделирование проводилось следующим образом: для схемы расположения компонентов представленной, например, на рисунке 3, последовательно решалось уравнение (1), либо (2). Далее (в разветвителе) предполагалось, что  $A_{1550}$  скачкообразно уменьшается в коэффициент разветвления  $\xi$ , после чего импульс распространяется либо в соответствии с уравнением (2), если накачка продолжает присутствовать в линии, либо согласно соотношению:

$$\frac{\partial A_{1550}}{\partial z} + \frac{j}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A_{1550}}{\partial T^2} = -\frac{\alpha_{1550}}{2} \cdot |A_{1550}|.$$

## Результаты

В результате последовательного численного интегрирования уравнений для импульса и компонентов линии передачи, параметры которых представлены выше, установлено следующее.

Для типовых параметров EDFA с коэффициентом передачи  $\mathcal{R} \cong 1,35$  [18] и рекомендуемого среднего уровня пиковой мощности импульса в линии не более 10 мВт (по G.703) коэффициент разделения не должен быть выше  $1 \times 12$ . Иначе амплитуда импульса уже снижается настолько, что за разветвителем на ВОЛП, построенным на ОВ SMF-28 ( $\beta_2 \cong -22$  пс<sup>2</sup>/км [19] и  $n_{SMF,k} \cong 2,4 \cdot 10^{-21}$  м<sup>2</sup>/Вт<sup>2</sup> [20]), не удастся добиться положительного чирпирования даже при наличии совместно передаваемой остаточной накачки (если на входе EDFA мощность накачки составляет 70 мВт [2; 18]). Следовательно, режим положительного чирпирования отсутствует, и ФИМД импульс сразу же начинает смещаться в область отрицательного чирпирования, при этом длительность импульса монотонно увеличивается, что также является негативным фактором.

Если в такой ситуации необходимо все же использовать разветвитель с большим коэффициентом разделения, то можно за разветвителем снова поставить EDFA, а накачку для него подавать, например, через один из портов разветвителя (как и показано на рисунке 3). Для этого разветвитель лучше взять не Y-образный, а звездообразный, обладающий менее направленными свойствами для проходящего излучения, и позволяющий тем

самым любой порт использовать как на вход, так и на выход. Но это решение приведет к необходимости расположения лазера накачки на 980 нм [15] вблизи разветвителя, а значит, сегмент перестанет классифицироваться как «полностью оптический». Также, это излучение можно подавать удаленно – например, по ранее «темному» световоду, либо совместно с сигналом.

Установлено также, что для минимизации эффекта увеличения текущей длительности импульса  $T_{и}$  под воздействием дисперсии пиковую мощность импульса следует наращивать в  $\xi$  раз.

Увеличение мощности импульса на ВОЛП с EDFA можно получить как путем наращивания мощности накачки на входе  $P_{0,EDFA}$ , так и путем увеличения длины  $L_{EDFA}$  легированного световода (при меньшем значении  $P_{0,EDFA}$ ). В первом случае преимуществом является то, что мощность как входной, так и остаточной накачки также будет выше, а значит при ее совместной передаче с сигналом она более эффективно создает нелинейный режим преломления. Т.е. увеличение  $P_{0,EDFA}$  в световодах перед разветвителем позволяет пропорционально усилить положительное чирпирование (соответственно, уменьшить соотношение  $\omega_{II} / \omega_3$ , где  $\omega_{II}$  – получаемая круговая частота на переднем и  $\omega_3$  – на заднем фронте импульса).

Это, в свою очередь, позволяет уменьшить  $\gamma_{1550}^{НЛ}$ , как и длину НЛ ОВ, если специализированный световод используется совместно с EDFA (при моделировании указанные световоды рассматриваются как единый световод с  $\gamma_{1550}^{НЛ-эфф}$ ), что в конечном итоге может снизить себестоимость схемы.

Но у первого способа также имеется и недостаток (соответственно, интерпретируемый как преимущество второго способа). А именно, с ростом  $P_{EDFA}$  увеличивается и шум спонтанного усиленного излучения (ASE) [2; 11; 12; 18], представляющего собой широкополосное излучение (в диапазоне длин волн усиления EDFA, т.е. от  $\lambda_{min} \approx 1530$  нм до  $\lambda_{max} \approx 1557$  нм), уровень мощности  $P_{ASE}$  которого пропорционален  $|A_{1550}|^2$ . Так, при наличии импульса, проходящего через EDFA, шум ASE выше, чем при отсутствии импульса, что позволяет говорить о мультипликативности рассматриваемого вида шума [18]. К мультипликативной составляющей возникающих помех также можно отнести и неизбежно возникающее отражение (от разветвителя, сварных швов, в т.ч. при стыковке EDFA, НЛ ОВ, DSF ОВ и пр.), амплитуда которого тем больше, чем выше мощность подаваемого излучения. Все это говорит о наличии компромисса между  $P_{0,EDFA}$ , а точнее, между  $P_{EDFA}$ , и  $L_{EDFA}$ .

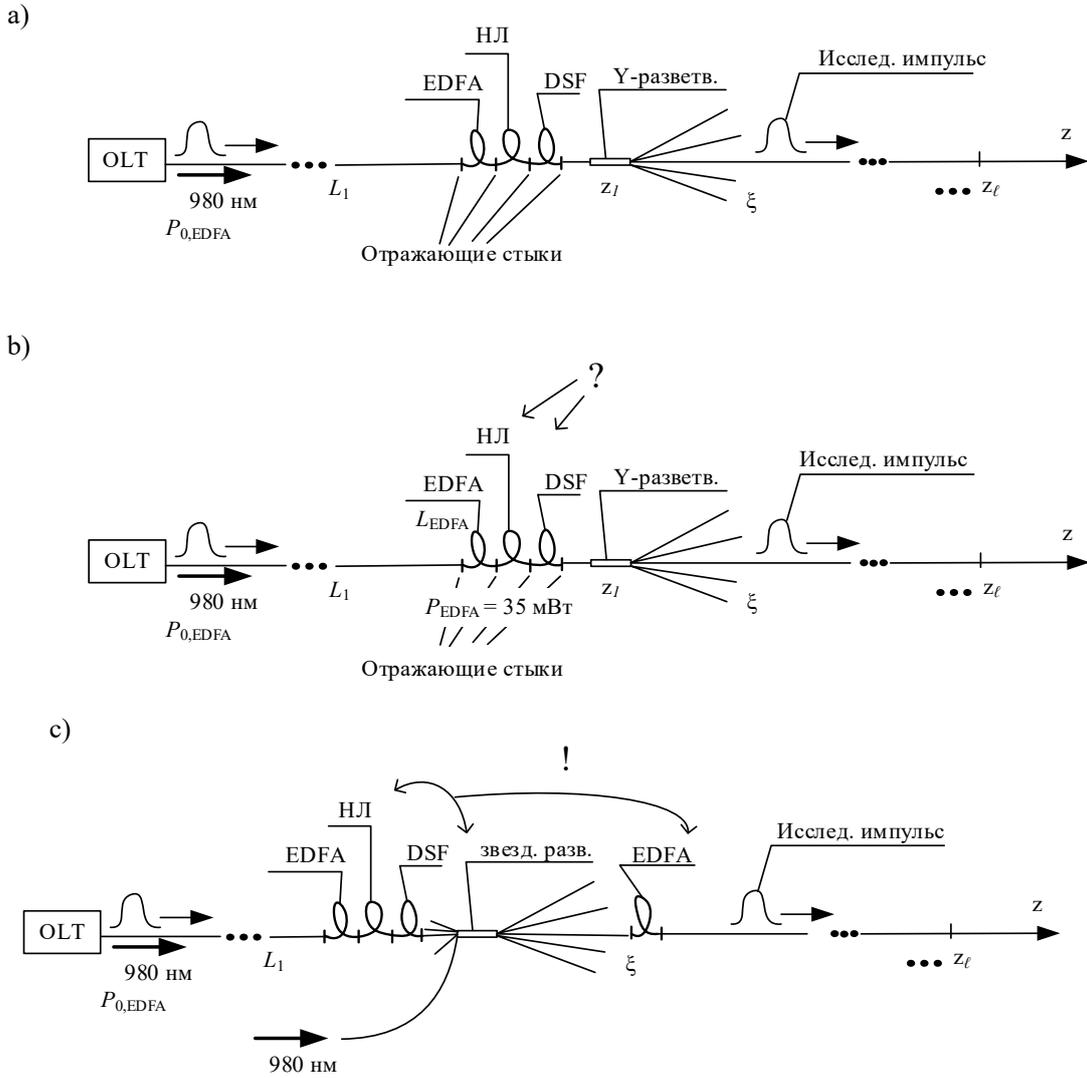


Рисунок 4. Исследуемые сегменты: а) высокая накачка EDFA (варьируемые параметры – на первом этапе  $P_{0,EDFA}$  (наибольшее значение величины – 70 мВт) и  $L_1$ , на втором этапе – добавлением нелинейного режима и/или  $\beta_{2,DSF}$ ); б) ограниченная накачка EDFA большей длины (варьируются – на первом этапе  $L_1, L_{EDFA}$ ; на втором этапе – дополнительное применение НЛ ОБ, DSF); в) многократное использование EDFA (с  $L_{EDFA} = 10$  м и  $P_{EDFA} = 35$  мВт с исследованием эффективности повторного применения и НЛ ОБ, DSF). Использование НЛ ОБ совместно с EDFA моделировалось путем увеличения от  $\gamma_{1550}^{НЛ}$  до  $\gamma_{1550}^{НЛ-эфф}$  на 10...12%

Для проведения оценки параметров сегмента, обеспечивающих средний вдоль  $z$  уровень соотношения сигнал/шум в линии  $S/N \geq 14$  дБ, примем к рассмотрению следующие эмпирические соотношения [18]:

$$P_{ASE} \approx \mu \cdot \sqrt{(P_{EDFA})^3} \text{ для входного информационного сигнала } |A_{1550}|^2 \sim 1 \text{ мВт};$$

$$\mu \approx \eta \cdot P_{0,EDFA} \left( 1 + \frac{L_{EDFA}}{L_0} \right), 10\text{м} \leq L_{EDFA} \leq 30. \quad (3)$$

Здесь  $\eta$  – размерный коэффициент (пока можно его значение принять  $\approx 1$ );  $L_0 = 10$  м. Увеличение  $P_{ASE}$  с нарастанием  $L_{EDFA}$  остается практически незаметным для  $P_{EDFA} \leq 30...35$  мВт и для  $L_{EDFA} \leq 30$  м. Уровень сигнала оценивался

как  $S \approx |A_{1550}|^2$  по длине ВОЛП от OLT до абонентского полукомплекта, в том числе, до радиоборудования RoF (сумма по всем ответвляемым сегментам).

Сравнивались три случая:

- значительная накачка EDFA, расположенного перед разветвителем, возможно, сопровождаемым НЛ ОБ и/или DSF ОБ (рисунок 4а);
- меньшая накачка EDFA перед разветвителем, обладающего значительной  $L_{EDFA}$  (рисунок 4б);
- накачка EDFA перед и после разветвителя (рисунок 4с).

Уровень шума  $N$  определяется  $P_{ASE}$  и мощностью отраженного излучения  $P_{omp}$ , который суммируется по всем включенным (состыкованным) компонентам линии. Например, для ВОЛП

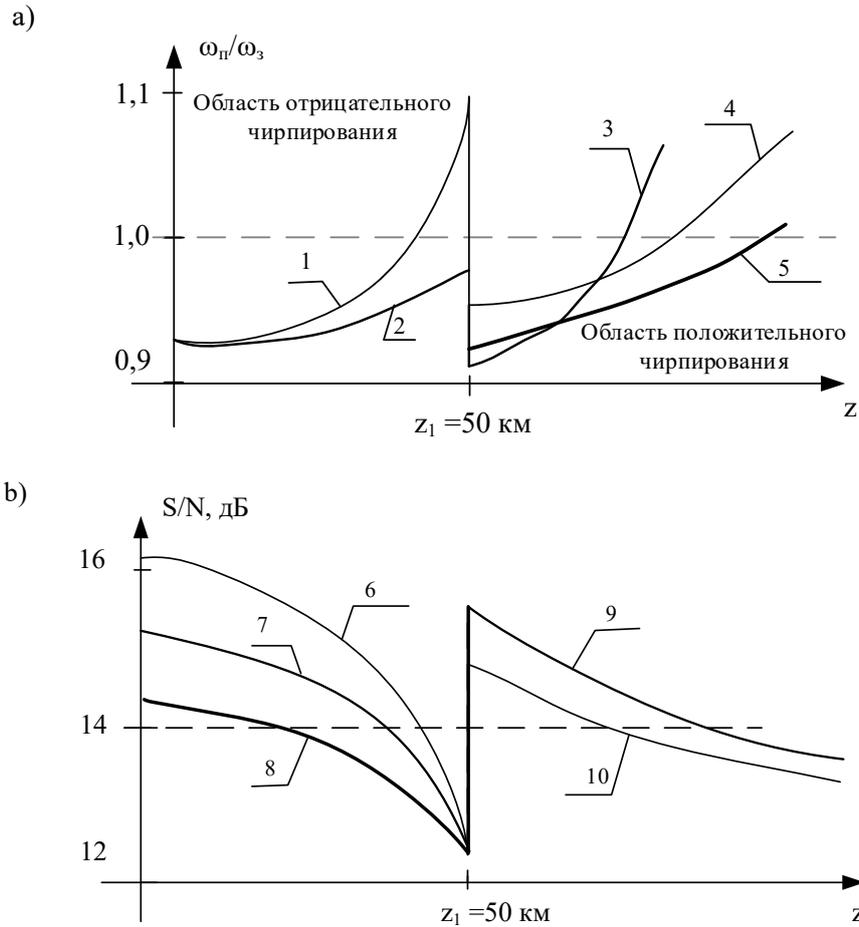


Рисунок 5. Иллюстрация характера распределения параметров сигнала, распространяющегося вдоль ВОЛП: а) отношение  $\omega_{\pi}/\omega_3$ , определяющее чирпирование; б) отношение «сигнал/шум»  $S/N$  в линии.

Таблица 1. Рекомендуемые параметры разветвленных ВОЛП для сегментов xPON/MAN с информационно-управляющими ФИМД-сигналами

Разветвитель до 1×6	1×6 ... 1×12	Свыше 1×12 (иссл. до 1×24)
Y-разветвитель	Y-разветвитель	Звездообразный разветвитель
EDFA до разветвителя		Двойной EDFA
$L_{EDFA} = 10$ м и $P_{EDFA} = 35$ мВт	$L_{EDFA} = 18...25$ м и $P_{EDFA} = 35$ мВт <sup>1</sup>	Перед разветвителем $L_{EDFA} = 25$ м; после – 18 м; $P_{EDFA} = 35$ мВт
$^2n_{НЛ,к} \cong 1...3 \times 10^{-17}$ м <sup>2</sup> /Вт <sup>2</sup>	$6...8 \times 10^{-17}$ м <sup>2</sup> /Вт <sup>2</sup>	$1...3 \times 10^{-17}$ м <sup>2</sup> /Вт <sup>2</sup>
$P_{ASE} \approx 0,11...0,15$ мВт	$P_{ASE} \approx 0,15...0,20$ мВт	$P_{ASE} \approx 0,20...0,30$ мВт

<sup>1</sup> Повышенная накачка в большей степени ухудшает ситуацию из-за нарастания ASE и отражений, чем улучшает; усиления лучше добиваться путем увеличения длины и повышением эффективности НЛ ОБ.

<sup>2</sup> Предполагалось, что согласно [16], длина НЛ ОБ составляет ~ 10 м

по рисунку 3 в первом сегменте  $z \leq z_1$  значение  $P_{omr,1550} = 0,3$  дБ +  $0,2$  дБ =  $0,5$  дБ, что соответствует отражению от сварного шва SMF-28 + EDFA и далее – EDFA + пиг-тайл разветвителя. Если добавляются НЛ ОБ и/или DSF ОБ, то количество стыков и уровень отраженного излучения, соответственно, повышается.

При определении  $P_{omr}$  предполагается, что отраженная волна не передается за разветвитель, например, из сегмента  $z_1 \leq z \leq z_2$  в предыдущий сегмент  $z \leq z_1$ . Кроме того, не учитывается отражение от сварных швов SMF-28 + SMF-28, т.к. оно присуще любому варианту построения линии и практически (в технической задаче можно принять) не

сказывается на определении искомым параметров сегмента. Отражение на длине волны 980 нм пропорционально мощности  $P_{EDFA}$  в зоне отражения:  $P_{EDFA} = P_{0,EDFA} \cdot e^{-\alpha_{980} \cdot L}$ , и нормируемого коэффициента отражения от соответствующего стыка.

Модель, представленная уравнениями (1)–(3) совместно с соотношением  $A_{1550}|_{z>z_1} = \frac{1}{\xi} \cdot [A_{1550}] - \Delta A_{1550}$ , учитывающим разветвление и отражение, не позволяла анализировать порядок размещения EDFA, НЛ и DSF, т.к. предполагается, что этими свойствами обладает единый световод.

### Обсуждение и заключение

По результатам моделирования с привлечением пакета Maple 12 для интегрирования уравнений (1), (2) с учетом (3) для определения параметров сегментов, установлено, что для получения наибольшего положительного chirpирования импульса за разветвителем (т.е. минимум соотношения  $\omega_{II} / \omega_3$ ) следует придерживаться параметров, представленных в таблице 1.

При этом  $S/N \geq 14$  дБ;  $\omega_{II} / \omega_3 \approx 0,92$ , что обеспечивает предотвращение уширения импульса при его дальнейшем распространении в соответствии с (2) на протяжении 45...48 км на ВОЛП с  $\beta_2 \cong -22$  пс<sup>2</sup>/км и  $n_{SMF,k} \cong 2,4 \cdot 10^{-21}$  м<sup>2</sup>/Вт<sup>2</sup>. В качестве пояснений к представленным в таблице 1 данным на рисунке 5 приведены графики зависимостей  $\omega_{II} / \omega_3$  и S/N вдоль  $z$ . Нелинейный характер графиков, близкий к экспоненциальному, по-видимому, связан, в основном, с характером потерь излучения 980 нм в линии, сопровождающего информационный сигнал.

На рисунке 5 обозначено:

- 1 и 6 – соответствует накачке  $P_{0,EDFA}=70$  мВт;
- 2 и 8 –  $P_{0,EDFA}=35$  мВт; 3 и 10 – соответствует «короткому» EDFA с  $L_{EDFA}=10$  м со значительной накачкой  $P_{0,EDFA}=70$  мВт;
- 4 – «длинному» EDFA с  $L_{EDFA}=25$  м и небольшой накачкой  $P_{0,EDFA}=35$  мВт;
- 5 и 9 – включение дополнительного EDFA с  $L_{EDFA}=10$  м и  $P_{0,EDFA}=35$  мВт после разветвителя;
- 7 –  $L_{EDFA}=10$  м и  $P_{0,EDFA}=45$  мВт.

Везде, кроме случая с дополнительно включенным EDFA, предпочтительной оказалась дистанционная подача накачки от OLT. Использование специализированных световодов может представлять интерес при разветвлении 1×12 и выше. При меньшем разветвлении в их применении нет необходимости ввиду того, что, с одной стороны, действие EDFA оказывается достаточным, а с другой

стороны – дополнительные световоды – это лишние стыки, приводящие к увеличению отражений на ВОЛП.

Полученные условия для положительного chirpирования призваны обеспечить минимизацию искажения информационно-управляющего ФИМД-сигнала посредством действия дисперсии на разветвленных ВОЛП при его передаче по сегментам xPON/MAN.

### Литература

1. Гольдштейн А.Б., Гольдштейн Б.С. Технологии и протоколы MPLS. СПб: БХВ-Петербург, 2005. 304 с.
2. Mukherjee B. Optical Communication Networks. New York: McGraw-Hill, 2005. 576 p.
3. Karthikeyan R., Prakasam S. A survey on Radio over Fiber (RoF) for wireless broadband access technologies // International Journal of Computer Applications. 2013. Vol. 64, no. 12. P. 14–19.
4. THz systems exploiting photonics and communications technologies / J.C. Balzer [et al.] // IEEE Journal of Microwaves. 2023. Vol. 3, no. 1. P. 268–288.
5. Insua I.G., Plettemeier D., Schaeffer C.G. Simple remote heterodyne radio-over-fiber system for gigabit per second wireless access // Journal of Lightwave Technology. 2010. Vol. 28, no.16. P. 2289–2295.
6. Abraha S.T. Impulse radio ultra wideband over fiber techniques for broadband in-building network application. URL: <https://pure.tue.nl/ws/files/3666550/735363.pdf> (дата обращения: 31.03.2024).
7. Применение chirpированного сигнала для построения адаптивных волоконно-оптических сетей связи / И.Л. Виноградова [и др.] // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2013. № 2 (55). С. 20–28.
8. Метод управления сегментом RoF-сети с применением chirpированных оптических импульсов / И.Л. Виноградова [и др.] // Научные технологии. 2023. Т. 24, № 5. С. 37–52.
9. Agrawal G.P. Nonlinear Fiber Optics. Boston: Academic Press, 2009. 466 p.
10. Преобразователь chirp→амплитуда на базе эрбиевого волоконно-оптического усилителя для управления радиофотонными системами / И.Л. Виноградова [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2019. Т. 22, № 4-2. С. 129–137.
11. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. М.: Компания Сайрус-Системс, 1999. 670 с.

12. Жирард А. Компоненты системы DWDM: оптические усилители EDFA. EXFO, 2001. 381 с.
13. Гордиенко В.Н., Тверецкий М.С. Многоканальные телекоммуникационные системы. М.: Горячая линия – Телеком, 2009. 416 с.
14. Расчет параметров сегмента волоконно-оптической высокоскоростной системы передачи / И.Л. Виноградова [и др.] // Инфокоммуникационные технологии. 2013. Т. 11, № 1. С. 22–29.
15. Султанов А.Х., Усманов Р.Г., Виноградова И.Л. Сегмент системы передачи с усилителем EDFA // Датчики и системы. 2002. № 4. С. 21–33.
16. Волков К.А. Методы моделирования распространения оптических импульсов в линии с управлением дисперсией // Фотон-Экспресс. 2015. № 6 (126). С. 255.
17. Бурдин В.А., Дашков М.В., Волков К.А. Влияние параметров схемы компенсации хроматической дисперсии на работу волоконно-оптической линии передачи // Оптический журнал. 2011. № 2. С. 80–81.
18. Analyzing gain spectrum and ASE (Amplified Spontaneous Emission) of EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) by using Matlab / A. Padavala [et al.] // International Journal of Engineering Research & Technology. 2018. Vol. 7, no. 2. P. 279–281. DOI: 10.17577/IJERTV7IS020151
19. Рекомендации МСЭТ G.650.1. Определения и методы тестирования для линейных детерминированных свойств одномодовых оптических волокон и кабелей. Женева, 2019. 82 с.
20. Рекомендации МСЭТ G.650.2. Определения и методы тестирования для статистических и нелинейных свойств одномодовых оптических волокон и кабелей. Женева, 2017. 74 с.

*Получено 11.03.2024*

**Виноградова Ирина Леонидовна**, д.т.н., профессор кафедры телекоммуникационных систем Уфимского университета науки и технологий. 450076, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32. Тел. +7 917 458-01-78. E-mail: vil-4@mail.ru

**Головина Евгения Юрьевна**, ст. преподаватель кафедры информационных технологий Института нефтепереработки и нефтехимии Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Салавате. 453250, Республика Башкортостан, г. Салават, ул. Губкина, 22 Б. Тел. +7 917 474-87-99. E-mail: egolovina82@mail.ru

### RECOMMENDATIONS ON THE URBAN NETWORK FOTL STRUCTURE WITH THE LOWEST POSSIBLE LEVEL OF DISTORTION OF INFORMATION AND CONTROL ILCF-SIGNALS

*Vinogradova I.L.<sup>1</sup>, Golovina E.Yu.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation*

<sup>2</sup> *Institute of Oil Refining and Petrochemistry of Ufa State Petroleum Technological University in Salavat, Salavat, Russian Federation*  
E-mail: egolovina82@mail.ru

The article studies the problem of construction of subscriber branched networks xPON/MAN/RoF, on the base of fiber-optic transmission lines, with the possibility of non-relational control. Namely, enabling transmission of control information as a part of subscriber signal. It is proposed to use instantaneous wavelength change function of the optical signal (ILCF) as the control information with parametric characteristics. A method of modeling such segments was offered, nature of ILCF was analyzed, and recommendations on inclusion of EDFA light guides and methods of pumping to them from the point of view of maintaining positive chirp for the information-control ILCF signal were made. It was assumed that ensuring positive chirp will minimize distortion of the latter during its transmission. It is concluded that branching has significant effect on ILCF. Recommended parameters of segments for different degrees of their branching are also obtained as well.

**Keywords:** *Passive Optical Networks, Metropolitan Area Networks, Radio-over-Fiber; fiber optic transmission line, Y-branch, Erbium Doped Fiber Amplifier, chirping*

**DOI:** 10.18469/ikt.2023.21.4.06

**Vinogradova Irina Leonidovna**, Ufa University of Science and Technology, 32, Zaki Validi Street, Ufa, 450076, Republic of Bashkortostan, Russian Federation; Professor of Telecommunication Systems De-

partment, Doctor of Technical Sciences. Tel. +7 917 458-01-78. E-mail: vil-4@mail.ru

**Golovina Evgenia Yurievna**, Institute of Oil Refining and Petrochemistry of Ufa State Petroleum Technological University in Salavat, 22 B, Gubkina Street, Salavat, Republic of Bashkortostan, 453250, Russian Federation; Senior Lecturer of Information Technologies Department. Tel. +7 917 474-87-99. E-mail: egolovina82@mail.ru

### References

1. Goldstein A.B., Goldstein B.S. *MPLS Technology and Protocols*. Saint Petersburg: BHV-Peterburg, 2005, 304 p. (In Russ.)
2. Mukherjee B. *Optical Communication Networks*. New York: McGraw-Hill, 2005, 576 p.
3. Karthikeyan R., Prakasam S. A survey on Radio over Fiber (RoF) for wireless broadband access technologies. *International Journal of Computer Applications*, 2013, vol. 64, no. 12, pp. 14–19.
4. Balzer J.C. et al. THz systems exploiting photonics and communications technologies. *IEEE Journal of Microwaves*, 2023, vol. 3, no. 1, pp. 268–288.
5. Insua I.G., Plettemeier D., Schaeffer C.G. Simple remote heterodyne radio-over-fiber system for gigabit per second wireless access. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, vol. 28, no.16, pp. 2289–2295.
6. Abraha S.T. Impulse radio ultra wideband over fiber techniques for broadband in-building network application. URL: <https://pure.tue.nl/ws/files/3666550/735363.pdf> (accessed: 31.03.2024).
7. Vinogradova I.L. et al. Application of a chirped signal for construction of adaptive fiber-optical networks. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviacionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, no. 2 (55), pp. 20–28. (In Russ.)
8. Vinogradova I.L. et al. ROF network segment control method using chirped optical pulses. *Naukoemkie tekhnologii*, 2023, vol. 24, no. 5, pp. 37–52. (In Russ.)
9. Agrawal G.P. *Nonlinear Fiber Optics*. Boston: Academic Press, 2009, 466 p.
10. Vinogradova I.L. et al. CHIRP-to-amplitude converter based on an erbium fiber optic amplifier for radio-photon systems control. *Physics of wave processes and radio engineering systems*, 2019, vol. 22, no 4-2, pp. 129–137. (In Russ.)
11. Ivanov A.B. *Fiber Optics: Components, Transmission Systems, Measurements*. Moscow: Kompaniya Sajrus-Sistems, 1999, 670 p. (In Russ.)
12. Girard A. *DWDM system components: EDFA optical amplifiers*. EXFO, 2001, 381 p.
13. Gordienko V.N., Tveretsky M.S. *Multichannel telecommunication systems*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2009, 416 p. (In Russ.)
14. Vinogradova I.L. et al. The task of fiber-optical segment for high bit rate networking. *Infocommunicationnye tekhnologii*, 2013, vol. 11, no. 1, pp. 22–29. (In Russ.)
15. Sultanov A.H., Usmanov R.G., Vinogradova I.L. Transmission system segment with an EDFA amplifier. *Datchiki i sistemy*, 2002, no. 4, pp. 21–33. (In Russ.)
16. Volkov K.A. Modeling methods of optical pulse propagation in the line with dispersion control. *Photon-Express*, 2015, no. 6 (126), pp. 255. (In Russ.)
17. Burdin V.A., Dashkov M.V., Volkov K.A. How the parameters of a system for compensating chromatic dispersion affect the operation of a fiber-optic transmission line. *Opticheskij zhurnal*, 2011, no. 2, pp. 80–81. (In Russ.)
18. Padavala A. et al. Analyzing gain spectrum and ASE (Amplified Spontaneous Emission) of EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) by using Matlab. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2018, vol. 7, no. 2, pp. 279–281. DOI:10.17577/IJERTV7IS020151
19. ITU Recommendation G.650.1. Definitions and test methods for linear deterministic properties of single-mode optical fibers and cables. Geneva, 2019. 82 p.
20. ITU Recommendation G.650.2. Definitions and test methods for statistical and nonlinear properties of single-mode optical fibers and cables. Geneva, 2017. 46 p

Received 11.03.2024