

И.А. САИТОВ, Н.И. МЯСИН, К.И. МЯСИН  
**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИГОДНОСТИ ВОЛОКОННО-  
ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ СВЯЗИ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ  
МНОГОУРОВНЕВЫХ СИГНАЛОВ**

---

*Саитов И.А., Мясин Н.И., Мясин К.И.* **Определение пригодности волоконно-оптических систем связи для передачи многоуровневых сигналов.**

**Аннотация.** Для решения задач проектирования и оперативного управления волоконно-оптическими системами передачи информации необходимо значение вероятности ошибки в додетекторной области. Оптимизация систем передачи по этому параметру особенно актуальна для фрагментов полностью оптических сетей связи. В статье представлена оценка вероятности битовой ошибки для наихудшего случая при оптической обработке сигнала. Полученная аналитическая модель легла в основу способа оценивания возможности применения многоуровневых оптических сигналов в волоконно-оптических системах передачи. Способ позволяет определить пригодность системы передачи с требуемой достоверностью принимать сигналы с заданным размером ансамбля.

**Ключевые слова:** волоконно-оптические системы передачи, сигналы с многоуровневой модуляцией интенсивности, вероятность ошибки, отношение сигнал/помеха.

*Saitov I.A., Mjasin N.I., Mjasin K.I.* **Determining the Suitability of the Fiber-Optic Communication Systems for Transmission of Multi-Level Signals.**

**Abstract.** To solve the problems of design and operational management of fiber-optic communication systems a value of error probability in subdetector area sometimes is necessary. Optimization of transmission systems for this parameter is particularly relevant for fragments of all-optical networks. In article, the estimation of bit error probability is presented for the worst case of optical signal processing. The obtained analytical model was the basis of a method for estimating the possibility of using multi-level optical signals in fiber-optic communication systems. The method allows to determine the suitability of a transmission system with the required reliability to receive signals with a given size of the ensemble.

**Keywords:** fiber-optic communication systems, signals with multilevel intensity modulation, error probability, signal-to-disturbance ratio.

---

**1. Введение.** Внедрение волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) со спектральным разделением каналов (СР) позволяет значительно улучшить оперативные и технико-экономические характеристики транспортной сети связи, существенно расширить перечень услуг связи. Вместе с этим использование ВОСП-СР сопровождается усложнением программно-аппаратных средств и комплексов оптической связи, повышением требований к свойствам отдельных компонентов и общесистемных параметров волоконно-оптических линий связи.

Вместе с развитием систем со спектральным разделением каналов усложняются оптические сигналы. Сигналы с многоуровневой модуляцией интенсивности позволяют многократно увеличить скорость передачи информации [1] по ВОСП-СР, сохраняя длительность импульсов не достигающую порогов возникновения нелинейных эф-

фффектов и поляризационной модовой дисперсии. Исследования [1–5] продемонстрировали перспективность данного научного направления в предметной области. Применительно к ВОСП с некогерентным приемом, сигналы с многоуровневой модуляцией интенсивности (*IM-M – M-ary intensity modulation*) в отечественной и зарубежной литературе [1, 4, 5] называют многоуровневыми оптическими сигналами (МОС).

Бурное развитие телекоммуникационных технологий приводит к некоторому отставанию научно-методического инструментария от потребностей практики в отдельных направлениях отрасли. Известные модели и методики не в полной мере позволяют реализовать все преимущества многоволновых волоконно-оптических линейных трактов (ВОЛТ) с МОС, так как не достаточно адекватно отражают специфику современных мультипротокольных транспортных сетей связи. Так, первые опыты эксплуатации ВОСП нового поколения, в том числе с МОС, показали, что в гетерогенных мультипротокольных ВОЛТ существенно повышается совместное влияние дисперсии и нелинейных эффектов [4, 6]. Приближенная оценка квантового шума, присущего всем средствам математического моделирования оптических систем связи приводит к несостоятельности полученных результатов. Проектировщики вынуждены использовать грубые оценки влияния квантового шума [7], упрощающие проектные решения [8], но являющиеся причиной существенных погрешностей при решении поставленных задач. Это снижает качество управления, ограничивает эффективность использования ресурсов оптических направляющих сред.

**2. Показатель качества передачи информации.** Важным системным показателем ВОЛТ является отношение мощности оптического сигнала к мощности оптического шума, а в общем случае к мощности оптической помехи (ООСП, *OSDR – optical signal-to-disturbance ratio*). ООСП является тем параметром, который характеризует достижимую помехоустойчивость [6, 9, 10] при использовании тех или иных приемных устройств, помехоустойчивых и манипуляционных кодов. ООСП позволяет определить «чистый» выигрыш от применения конкретного ансамбля сигналов и/или линейного кода. Именно мощности сигнала и помехи определяют дальность передачи по оптическому волокну [6, 9]. В то же время ООСП позволяет рассчитать коэффициент (или вероятность) ошибок.

Дискретный МОС, вводимый в световод, за счет влияния шумов, хроматической дисперсии и нелинейных эффектов на фотодетекторе может быть представлен бесконечным числом подуровней, определяемых стохастическими процессами. Рассматриваемый оптический канал оканчивается до демодулятора и является дискретно-

непрерывным. В таких случаях в теории связи [9, 10], как правило, показателем качества передачи информации выбирают отношение сигнал-шум или сигнал/помеха.

Исходя из изложенного, далее показателем качества передачи информации выбрано отношение мощности оптического сигнала к мощности оптической помехи (ООСП).

**3. Граница вероятности ошибки многоуровневого оптического сигнала.** Для решения задач оптимизации параметров ВОЛТ требуется значение показателя качества для конкретной мощности сигнального созвездия. Так как МОС в отличие от сигналов с амплитудно-импульсной модуляцией принципиально не могут быть отрицательны, математический аппарат теории электрической связи не может быть применен к МОС без модернизации. В общем случае применения многоуровневых сигналов функциональная зависимость вероятности ошибки от ООСП не установлена.

Аналогично размышлениям, изложенным в [10] для противоположных сигналов с амплитудно-импульсной модуляцией, выведем выражение для определения граничного значения вероятности ошибки МОС с равновероятным формированием координат точек ансамбля сигналов.

В силу стохастичности процесса передачи правомочно говорить о вероятностном характере расположения точек ансамбля сигналов на выходе канала связи. Строго говоря, евклидово расстояние между математическим ожиданием координат соседних точек сигнала с многоуровневой модуляцией интенсивности на приеме не одинаково. Физическая природа данного различия заключается во влиянии нелинейных эффектов оптического волокна на распространяющийся сигнал. Минимальное евклидово расстояние на приеме – между точками с максимальной мощностью, так как степень искажения вследствие фазовой самомодуляции и вынужденного комбинационного рассеяния пропорциональна мощности сигнала:

$$dE_{\min} = P_{\text{ВЫХ}_{i,M}} - P_{\text{ВЫХ}_{i,M-1}}, \quad (1)$$

где  $P_{\text{ВЫХ}_{i,m}}$  – средняя мощность сигнала с уровнем  $m$  (принимает целочисленные значения в диапазоне от 1 до размера ансамбля сигналов  $M$ ) на выходе оптического волокна в  $i$ -м спектральном канале.

Дисперсия уровней МОС так же различна, в силу наличия квантовых шумов, коррелированных с сигналом. Вместе с тем, в силу близости закона Пуассона [7] и нормального распределения при больших значениях параметра первого, а так же учитывая центральную предельную

теорему правомочно рассматривать гауссов характер отклонения сигнальных точек на приеме. Другими словами, положим, что на приеме действует гауссов шум с мощностью равной сумме мощностей квантового и аддитивного гауссова шумов. Данное допущение позволяет вычислить вероятность символьной ошибки для наихудшего случая.

Пусть приемник функционирует по правилу минимального евклидового расстояния между принятой и опорной сигнальными точками. Учитывая выражение (1), ошибка наиболее вероятна между двумя верхними уровнями. Тогда максимальная вероятность символьной ошибки оценивается как:

$$\begin{aligned}
 P_{s_i} \leq & \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{M-1}} \int_{P_{\text{вых}_{i,M}} \frac{dE_{\min}}{2}}^{\infty} \exp\left(\frac{-(x - P_{\text{вых}_{i,M-1}})^2}{2\sigma_{M-1}^2}\right) dx + \\
 & + \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_M} \int_{-\infty}^{P_{\text{вых}_{i,M}} \frac{dE_{\min}}{2}} \exp\left(\frac{-(x - P_{\text{вых}_{i,M}})^2}{2\sigma_M^2}\right) dx
 \end{aligned} \tag{2}$$

где  $\sigma_m$  – среднеквадратическое отклонение (СКО) для  $m$ -й точки ансамбля сигналов. Учитывая пропорциональность мощности квантового шума мощности сигнала справедливо записать неравенство:  $\sigma_n > \sigma_m$  если  $n > m$ ,  $n, m \in [1; M]$ . При вычислении граничной вероятности ошибки с некоторой погрешностью можно принять  $\sigma_M \approx \sigma_{M-1}$ , тогда вероятность символьной ошибки удовлетворяет неравенству:

$$p_{s_i} < \text{erfc}\left(\frac{dE_{\min}}{\sigma_M \sqrt{8}}\right). \tag{3}$$

Допущение о равенстве СКО двух верхних уровней оптического сигнала, безусловно, несколько огрубляет результат (3). Полученное по (3) значение оказывается несколько выше реального, образуется некоторый запас по достоверности передачи. Вместе с тем, если при проектировании ВОСП есть возможность определения СКО для каждой точки ансамбля сигналов, то необходимо использовать более точное выражение (2).

Эквивалентную вероятность ошибки на бит для сигналов  $IM$ - $M$  затруднительно вычислить с учетом ее зависимости от отображения символа в соответствующее значение энергии сигнала. Если использу-

ется манипуляционный код Грея, то два символа, соответствующие сигналам с соседними энергиями, отличаются не более чем на один бит. Поскольку наиболее вероятные ошибки, обусловленные влиянием помехи, приводят к выбору сигнала с соседним значением амплитуды вместо верного, то большинство битовых блоков содержат ошибки только в одном бите. Следовательно, эквивалентная вероятность ошибки на бит для сигналов *IM-M* может быть аппроксимирована по верхней границе выражением:

$$p_{b_i} = \frac{1}{\log_2 M} P_{s_i} \quad (4)$$

В работах [6, 9] отмечается незначительное влияние нелинейных эффектов в стандартном телекоммуникационном диапазоне вводимых мощностей. Таким образом, при условии соблюдения ограничений на максимальную вводимую мощность, можно сделать допущение о равномерном расположении математических ожиданий мощностей уровней сигнала на приеме. В этом случае евклидово расстояние между точками ансамбля сигналов равно:

$$dE = \frac{P_{\text{вых}_i M}}{M-1} \quad (5)$$

При равновероятном и равномерном формировании символов учитывая (5) и потенциальную гетерогенность ВОСП:

$$p_{b_i} < \frac{1}{\log_2 M_i} \operatorname{erfc} \left( \frac{OSDR_i}{\sqrt{8M_i(M_i-1)}} \right), \quad (6)$$

где  $OSDR_i$  – отношение средней мощности оптического сигнала к средней мощности оптической помехи для  $i$ -го спектрального канала.

Зависимость вероятности ошибки от ООСП представлена на рисунке 1, а. Для фиксированного значения вероятности ошибки  $p_b = 10^{-12}$  при постоянном уровне аддитивных шумов можно вычислить требуемые значения ООСП (рисунок 1, б) для передачи конкретной мощности сигнального созвездия. График имеет ступенчатый характер в виду дискретного значения числа точек ансамбля сигналов, которыми удобно кодировать двоичные последовательности, а так же ограничением на вероятность ошибки.

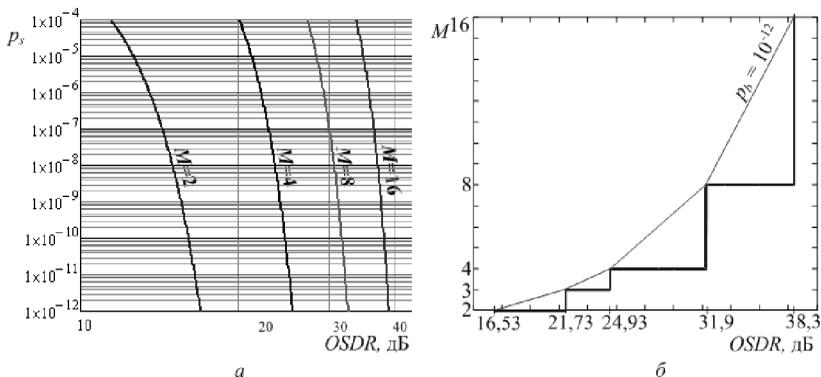


Рис. 1. Зависимости, полученные с помощью выражения (6): а) граница вероятности ошибки на символ для сигналов  $IM-M$ ; б) зависимость передаваемого числа уровней сигнала от ООСП

Полученная граничная зависимость связывает показатель достоверности передачи информации с параметрами ВОЛТ через уравнение распространения сигнала.

**4. Способ оценивания возможности применения МОС в ВОСП.** Многоуровневый амплитудно-модулированный сигнал, вследствие ограничений на мощность вводимого в оптическое волокно излучения, использует тот же бюджет мощности, что и бинарный  $IM$ -сигнал. Этот фактор существенно сокращает дальность передачи такого сигнала. Евклидово расстояние  $dE$  между нижними уровнями определяет достижимую помехоустойчивость – порог чувствительности фотоприемного устройства (ФПУ) должен быть ниже второго уровня многоуровневого сигнала (рисунок 2,а).

Учитывая обратно пропорциональную зависимость дальности передачи от количества уровней сигнала  $M$  можно сделать вывод о предпочтительности оптического сигнала с количеством уровней от четырех до восьми, сигналы с большим количеством уровней целесообразно применять в приложениях с небольшими расстояниями: локальных сетях, межблочных интерфейсах, на последней миле и др.

На рисунке 2 представлены сигнальные созвездия, соответствующие оптическому сигналу с модуляцией интенсивности. Случай равномерной плотной укладки сфер (рисунок 2,б) описан в [9] и представляет интерес с точки зрения увеличения скорости передачи.

Из рисунка 2,б, что ошибочное принятие решения относительно уровня сигнала имеет разный вес. Так ошибочное принятие решения при распознавании первого и второго уровней приводит к потере двух

бит информации притом, что вероятность ошибки в распознавании соседних уровней максимальна.

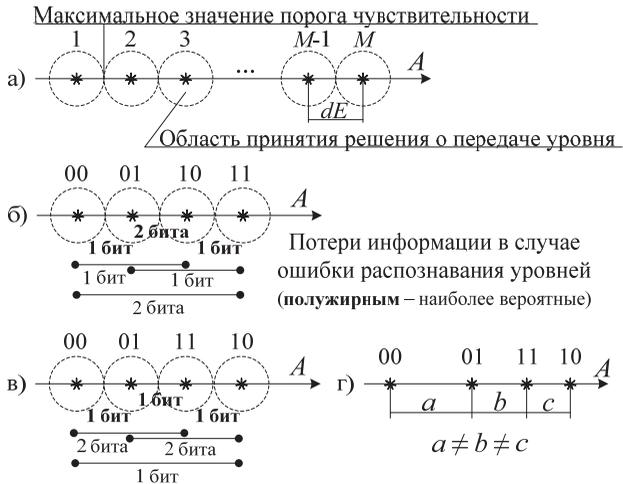


Рис. 2. Схематичное изображение укладки сигнальных сфер: а) общее представление многоуровневого кода на сигнальной плоскости; б) расположение символов 4-х уровневой кода; в) расположение символов после применения манипуляционного кодирования; г) размещение уровней через неравные интервалы

Для уравнивания функций потерь при наиболее вероятных ошибках, учитывая расположение сигнальных точек, можно применить манипуляционный код Грея (рисунок 2, в). В этом случае, Хеммингово расстояние от любой сигнальной точки до соседних минимально и равно единице, что означает потерю только одного бита при наиболее вероятных ошибках.

Расстояние между двумя нижними уровнями определяет дальность передачи с точки зрения энергетического запаса. Таким образом, для увеличения дальности передачи многоуровневого сигнала, казалось бы, можно применить неравное расположение точек сигнального созвездия (рисунок 2, г). Однако, исследования [5, 7] показывают, что вследствие влияния квантового шума сигнала различие  $M$ -го и  $(M-1)$ -го уровней затруднительно (см. рисунок 3). За счет чего расположение уровней в соответствии с рисунком 2, г влечет увеличение вероятности ошибки. Для стандартных телекоммуникационных приложений компромиссным является вариант с равномерным расположением уровней сигнала.

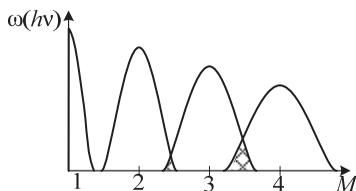


Рис. 3. Распределение вероятностей появления фотонов МОС

Таким образом, качество приема МОС определяется ООСП и возможностью различения двух нижних уровней. ООСП показывает, насколько легко сигнал может быть выделен на фоне помех, а условие превышения вторым уровнем МОС уровня чувствительности приемника характеризует энергетические соотношения параметров принимаемого сигнала и приемника.

Вместе с тем, вводимую мощность нельзя увеличивать бесконечно – при увеличении мощности сигнала начинают проявляться нелинейные эффекты. В виду многообразия видов оптических волокон, а так же отраслевых стандартов значение суммарной вводимой мощности в световод может варьироваться [3, 13]. Ввиду того, что на повышение ООСП расходуется общий ресурс вводимой в главный оптический тракт мощности, необходимо обеспечение условий нормального функционирования систем передачи, работающих в спектральных каналах (СК), не подверженных оптимизации. Для этого следует наложить ограничение на вероятность ошибки в каждом СК. Вместе с тем, различные абсолютные значения мощности помехи и шума могут давать равные значения ООСП. Возможна ситуация, когда нижние уровни сигнала окажутся за порогом чувствительности приемника. В связи с данным физическим ограничением необходимо рассматривать возможность применения многоуровневого сигнала при условии превышения вторым уровнем сигнала на приеме граничного значения чувствительности.

Учитывая связь вероятности ошибки и ООСП (выражение (6)), указанные условия записываются следующим образом:

$$\begin{cases} OSDR_i \geq OSDR_{TP_i}, \\ P_{\text{вых}_{i,2}} > P_{Pq_i} \end{cases}, \quad (7)$$

где  $P_{\text{вых}_{i,2}}$  – мощность импульса для второго уровня МОС на выходе световода, Вт;  $P_{Pq_i}$  – реальная чувствительность ФПУ  $i$ -го СК, Вт;  $OSDR_{TP_i}$  – требуемое для нормального функционирования системы в  $i$ -м СК ООСП. В данном случае рассматривается реальная чувствительность как минимальный поток излучения, который может быть

обнаружен на фоне собственных шумов безотносительно требуемой вероятности ошибки.

Для проверки возможности применения МОС той или иной размерности в конкретной ВОСП необходимо и достаточно проверить условия (7).

Сущность способа оценивания возможности применения МОС в ВОСП заключается в том, что оценивают мощность второго уровня МОС на фотоприемнике, и сравнивают с чувствительностью ФПУ. Затем вычисляют ООСП на выходе световода и сравнивают с требуемым для нормального функционирования ООСП. Если хотя бы одно неравенство из выражения (7) не выполняется, то делают вывод о непригодности данной ВОСП для передачи МОС интересующей размерности.

Исходными данными для рассматриваемого способа являются параметры световода, необходимые для решения нелинейного уравнения Шредингера (уравнения распространения сигнала), используемого для получения описания сигнала на выходе световода; вектор размеров ансамблей сигналов, на пригодность к передаче которого оценивается ВОСП; чувствительность ФПУ; мощность аддитивных шумов и длительность импульса оптического сигнала при соответствующем  $M_i$ .

Предлагаемый способ может быть использован для произвольного числа спектральных каналов. Соответствующие процедуры начала и окончания цикла с постусловием представлены шагами 2 и 10.

Вычисление шага 3 – менее ресурсоемкая процедура, чем вычисление шагов 5 и 6, так как не требует реализации метода секущих. За счет такого порядка проверки условий (7) удалось достичь снижения вычислительных затрат в случае непригодности СК ВОСП к работе МОС.

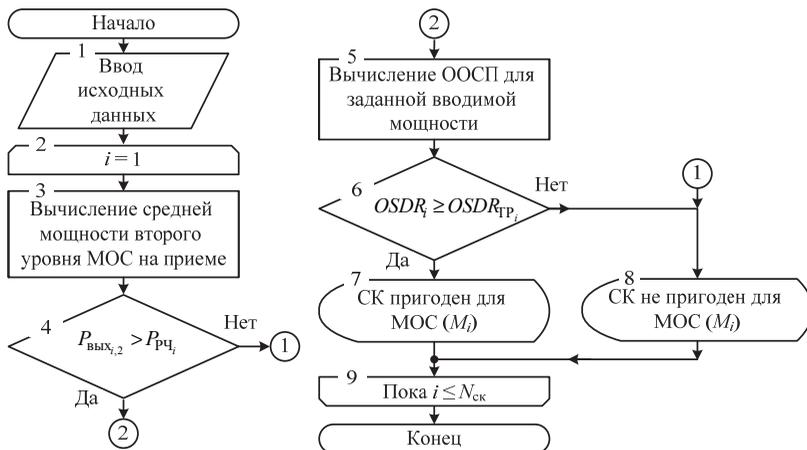


Рис. 4. Блок-схема способа оценивания возможности применения МОС в ВОСП

Решение о пригодности СК главного оптического тракта выносится индивидуально для каждого канала. Ввиду неоднородности группового спектра, как по предъявляемым требованиям, так и по ООСП не все СК могут быть переведены на работу МОС.

**5. Заключение.** Ввиду высокой актуальности вопросов повышения пропускной способности имеющихся ВОСП, а следовательно, удешевления затрат на передачу единицы информации активно исследуются МОС.

Граничное значение эквивалентной вероятности ошибки на бит для МОС (6) является верхней вероятностью ошибки для оптической обработки сигнала с многоуровневой модуляцией интенсивности. В то же время, оценка (6) асимптотически наилучшая для вероятности ошибки в постдетекторной области: за счет квантового выхода и шум-фактора ФПУ вероятность ошибки может только увеличиваться.

Сформулированные необходимое и достаточное условия применимости МОС в СК ВОСП-СР легли в основу способа оценивания возможности применения МОС в ВОСП.

Полученные решения обобщены на случай МОС и многоволновых ВОЛТ, но могут быть применены и к традиционным бинарным сигналам (для случая  $M = 2$ ), в том числе в одноволновых ВОСП.

### Литература

1. *Avlonitis N.S., Nikolas N.S., Yeatman E.M.* Performance of 4-ary ASK in Nonlinear, Multi-Channel Environments. URL: <http://www.ee.ucl.ac.uk/lcs/previous/LCS2004/46.pdf> (дата обращения 01.02.2015).
2. *Qian D., Huang M-F., Ip E., Huang Y-K., Shao Y., Hu J., Wang T.* 101,7 Tb/s (370x294-Gb/s) PDM-128QAM-OFDM transmission over 3x55 km SSMF using pilot-based phase noise mitigation // Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC). 2011. PDPB5. pp. 1345–1351.
3. *Новиков А.Г., Трециков В.Н., Плаксин С.О., Плуцкий А.Ю., Наний О.Е.* Перспективные DWDM системы связи со скоростью 20 Тбит/с на соединение // Фотон-экспресс. 2012. №3. С. 34–37.
4. *Величко М.А., Наний О.Е., Сусьян А.А.* Новые форматы модуляции в оптических системах связи // Lightwave Russian edition. 2005. №4. С. 21–30.
5. *Мясин К.И.* Модель М-го симметричного канала с квантовым шумом // Наукo-ведение: интернет-журнал. 2014 №1 (20). URL: <http://www.naukovedenie.ru/pdf/11tvn114.pdf> (дата обращения 01.02.2015).
6. *Саитов И.А., Щекотихин В.М.* Теоретические основы построения средств связи оптического диапазона // Орел: Академия ФСО России. 2008. 491 с.
7. *Wei H., Plant D.V.* Quantum noise in optical communication systems // Optical modeling and performance predictions // Proceedings of SPIE. 2003. vol. 5178. pp. 139–147.
8. *Drummond P.D., Corney J.F.* Quantum noise in optical fibers I: stochastic equations // Journal of the Optical Society of America B. 2001. vol. 18(2). pp. 139–152.
9. *Слепов Н.Н.* Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи // М.: Радио и Связь. 2005. 468 с.

10. Прокис Дж. Цифровая связь: перевод с англ. / под общ. ред. Д.Д. Кловского // М.: Радио и связь. 2000. 800 с.
11. Перина Я. Квантовая статистика линейных и не линейных оптических явлений // М.: Мир, 1987. 368с.
12. Агравал Г.П. Применение нелинейной волоконной оптики: учебное пособие // СПб.: Лань. 2011. 591 с.
13. Листвин В.Н., Трещиков В.Н. DWDM системы: научное издание // М.: Наука. 2013. 300 с.

## References

1. Avlonitis N.S., Nikolas N.S., Yeatman E.M. Performance of 4-ary ASK in Nonlinear, Multi-Channel Environments. Available at: <http://www.ee.ucl.ac.uk/lcs/previous/LCS2004/46.pdf> (accessed 01.02.2015).
2. Qian D., Huang M-F., Ip E., Huang Y-K., Shao Y., Hu J., Wang T. 101,7 Tb/s (370x294-Gb/s) PDM-128QAM-OFDM transmission over 3x55 km SSMF using pilot-based phase noise mitigation. Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC). 2011 PDPB5. pp. 1345–1351.
3. Novikov A.G., Treshnikov V.N., Plaksin S.O., Plockij A.Ju., Naniy O.E. [Future DWDM communication systems with a speed 20 Tbit/with on connection]. *Foton-jekspress – Photon-express Journal*. 2012. vol. 3. pp. 34–37. (In Russ.).
4. Velichko M.A., Naniy O.E., Sus'jan A.A. [New formats of modulation in optical communication systems]. *Lightwave Russian edition*. 2005. vol. 4. pp. 21–30. (In Russ.).
5. Mjasin K.I. [Model of M-ary symmetric channel with quantum noise]. *Naukovedenie : Internet-zhurnal – On-line Journal "Naukovedenie"*. 2014. vol. 1(20). Available at: <http://naukovedenie.ru/pdf/11tvn114.pdf> (accessed 01.02.2015). (In Russ.).
6. Saitov I.A., Shhekotihin V.M. *Teoreticheskie osnovy postroenija sredstv svyazi opticheskogo diapazona* [Theoretical bases of construction of a communication facility of an optical range]. Orel: Akademiya FSO Rossii. 2008. 491 p. (In Russ.).
7. Wei H., Plant D.V. Quantum noise in optical communication systems. Optical modeling and performance predictions. *Proceedings of SPIE*. 2003. vol. 5178. pp. 139-147.
8. Drummond P.D., Corney J.F. Quantum noise in optical fibers I: stochastic equations. *Journal of the Optical Society of America B*. 2001. vol. 18(2). pp. 139-152.
9. Slepov N.N. *Sovremennye tehnologii cifrovyyh optovoloknykh setej svyazi* [Modern technologies of digital fibre-optical communication networks]. M.: Radio i Svyaz'. 2005. 468 p. (In Russ.).
10. Proakis J.G. *Digital communications. 4th edition*. McGraw Hill Higher Education. 2000. 1024 p. (Russ. ed.: Prokis J. *Cifrovaya svyaz'*. M.: Radio i Svyaz'. 2000. 800 p.).
11. Perina Ja. *Kvantovaya statistika linejnyh i ne linejnyh opticheskikh javlenij* [The quantum statistics linear and nonlinear optical phenomena]. M.: Mir. 1987. 368 p. (In Russ.).
12. Agrawal G.P. *Primenenie nelinejnoj volokonnoj optiki: uchebnoe posobie* [Application of nonlinear fiber optics: tutorial]. SPb. : Lan'. 2011. 591 p. (In Russ.).
13. Listvin V.N., Treshnikov V.N. DWDM sistemy [DWDM systems]. M.: Nauka. 2013. 300 p. (In Russ.).

**Сантов Игорь Акрамович** — д-р техн. наук, профессор, начальник факультета, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации. Область научных интересов: оптическая связь, транспортные сети связи. Число научных публикаций — 160. [Akramovich@mail.ru](mailto:Akramovich@mail.ru); ул. Приборостроительная, 35, Орел, 302034, РФ; п.т.:+7(4862)549801.

**Saitov Igor' Akramovich** — Ph.D., Dr. Sci., professor, chief of faculty, The Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation. Research interests: optical communication, transport communication networks. The number of publications — 160. Akramovish@mail.ru; 35, Priborostroitel'naya Street, Orel, 302034, Russia; office phone: +7(4862)549801.

**Мясин Николай Игоревич** — к-т техн. наук, доцент, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации. Область научных интересов: волоконно-оптические системы передачи с усилителями, нелинейные эффекты в оптических волокнах, технические средства охраны и контроля доступа. Число научных публикаций — 50. staryi\_nik@mail.ru; Приборостроительная, 35, Оре́л, 302034; р.т.: +7(486)2549913.

**Mjasin Nikolaj Igorevich** — Ph.D., associate professor, The Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation. Research interests: fiber-optical communication systems with amplifiers, nonlinear effects in optical fibers, means of protection and the access control. The number of publications — 50. staryi\_nik@mail.ru; 35, Priborostroitel'naya Street, Orel, 302034, Russia; office phone: +7(486)2549913.

**Мясин Константин Игоревич** — преподаватель, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации. Область научных интересов: волоконно-оптические системы передачи с многоуровневыми сигналами, квантовый шум, искажения оптического сигнала. Число научных публикаций — 30. fmmc@mail.ru; Приборостроительная, 35, Оре́л, 302034; р.т.: +7(486)2549912.

**Mjasin Konstantin Igorevich** — lecturer, The Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation. Research interests: fiber-optical communication systems with multi-level modulation, quantum noise, distortion optic signal. The number of publications — 30. fmmc@mail.ru; 35, Priborostroitel'naya Street, Orel, 302034, Russia; office phone: +7(486)2549912.

## РЕФЕРАТ

### **Саитов И.А., Мясин Н.И., Мясин К.И. Определение пригодности волоконно-оптических систем связи для передачи многоуровневых оптических сигналов.**

Статья посвящена оцениванию пригодности волоконно-оптической линии связи к работе многоуровневыми оптическими сигналами с целью увеличения скорости передачи информации.

Во введении представлено обоснование актуальности исследования. Целесообразность изложенного материала заключается в повышении точности решения задач проектирования и управления за счет учета свойств оптических многоуровневых сигналов и особенностей их распространения.

Далее, авторы обосновывают выбор показателя «отношение средней мощности оптического сигнала к средней мощности оптической помехи» в дотекторной области с учетом специфики модели волоконно-оптического канала связи. Такой показатель позволяет наиболее адекватно сравнивать волоконно-оптические системы передачи и формулировать оптимизационные задачи в дотекторной области.

В третьем параграфе работы представлено оригинальное авторское видение проблемы вычисления вероятности ошибки оптического сигнала. По известной методике, описанной Дж. Прокисом, получено граничное значение для вероятности ошибки при оптической обработке сигнала. Данная оценка может быть использована для полностью оптических линий связи или для сравнения систем дотекторной обработки сигнала.

Четвертый параграф непосредственно посвящен разработке способа определения пригодности системы передачи для работы многоуровневыми оптическими сигналами. Для решения задачи оценивания возможности применения многоуровневых оптических сигналов в волоконно-оптической системе передачи авторы выдвигают необходимые и достаточные условия. Эти условия положены в основу способа проверки пригодности системы передачи к приему с заданной достоверностью сигналов с многоуровневой модуляцией интенсивности. Итеративное применение представленного способа с размером ансамбля сигналов в качестве параметра позволяет находить максимально допустимое число уровней модуляции интенсивности.

В заключении обобщены результаты и представлены основные положения работы.

Представленный материал адресован аспирантам, ученым и инженерам, работающим в области разработки и модернизации волоконно-оптических систем связи.

## SUMMARY

### *Saitov I.A., Mjasin N.I., Mjasin K.I.* **Determining the Suitability of the Fiber-Optic Communication Systems for Transmission of Multi-Level Signals.**

The article is devoted to assessing the suitability of a fiber-optic link to work of the multi-level optical signals, for the purpose of increase in information transmission rate.

In the introduction substantiation of relevance of the research is presented. The expediency of the material is to increase the accuracy of the design and operational management problems solution by taking into consideration properties of multi-level optical signals and their distribution characteristics.

Further, the authors justified the choice of parameter «optical signal-to-disturbance ratio» in subdetection area, taking into account the specifics of the model fiber optic link. This parameter allows the most adequate to compare the fiber-optic communication systems and to formulate optimization tasks in subdetection area.

In the third paragraph of the paper an original author's vision of the bit error probability calculation problem for the optical signal is presented. By the known technique described by J. Proakis the boundary value for the error probability in optical signal processing is obtained. This estimate can be used for all-optical communication lines or comparison subdetektor signal processing systems.

The fourth paragraph is directly devoted to development of determining suitability method of a transmission system for multi-level optical signals. To solve the problem of estimating the possibility of using multi-level optical signals in a fiber optic communication system, the authors formulate the necessary and sufficient conditions. These conditions are the basis for a method for checking the suitability of the transmission system to the reception given to the reliability of signals with multilevel modulation intensity. Iterative application of the present method with the signals ensemble size of as a parameter allows finding the maximum number of levels of intensity modulation.

In conclusion the results are summarized and the main theses of work are re-sented.

The material is addressed to graduate students, scientists and engineers working in the development of the fiber-optic communication systems.