

УДК 621.391.63

ОЦЕНКА КОЛИЧЕСТВА СПЕКТРАЛЬНЫХ И ПОДНЕСУЩИХ КАНАЛОВ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СЕТЯХ ДОСТУПА ПРИ ОДНОПОЛОСНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ МОДУЛЯЦИИ

В. А. Варданян

*Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
630102, г. Новосибирск, ул. Кирова, 86
E-mail: vardgesvardanyan@mail.ru*

Рассмотрена волоконно-оптическая система передачи для сетей доступа с частотным разделением каналов, сформированных в оптическом, сверхвысокочастотном и радиочастотном диапазонах. Исследованы однополосная оптическая модуляция и разные форматы модуляции поднесущих каналов. Приведены расчётные соотношения для оценки количества спектральных и поднесущих каналов с учётом влияния вынужденного комбинационного рассеяния (эффект Рамана) и шумов оптического предусилителя.

Ключевые слова: волоконно-оптическая система передачи, однополосная оптическая модуляция, спектральное уплотнение, уплотнение поднесущих.

DOI: 10.15372/AUT20160315

Введение. Хорошо зарекомендовавшие себя технологии передачи сигналов в сверхвысокочастотном (СВЧ) и радиочастотном (РЧ) диапазонах совместно с оптическими методами открывают большие возможности для транспортировки широкополосных многоканальных сигналов по волоконно-оптическому тракту. Уплотнение каналов в СВЧ- и РЧ-диапазонах принято называть уплотнением поднесущих SCM (Subcarrier Multiplexing), а уплотнение каналов по длинам волн — DWDM (Dense Wavelengths Division Multiplexing). Такими способами можно реализовывать волоконно-оптическую систему передачи (ВОСП) с частотным разделением каналов (ЧРК) как в оптическом диапазоне, так и в СВЧ- и РЧ-областях спектра. Данные системы могут использоваться в сетях доступа, где расстояния передачи небольшие (порядка нескольких десятков километров) и количество каналов, обеспечивающих растущий год за годом пользовательский спрос на широкополосные услуги и сервисы, увеличивается [1, 2]. Кроме того, эти системы могут применяться операторами беспроводных сетей или интернет-провайдерами для «доставки» сигналов (без преобразования) на базовые станции или напрямую к абоненту [3]. Необходимо отметить, что поднесущие каналы могут формироваться с помощью разных цифровых методов модуляции: фазовой манипуляции или бинарной фазовой модуляции BPSK (Binary Phase-Shift Keying), амплитудно-импульсной модуляции ASK (Amplitude-Shift Keying), квадратурно-фазовой модуляции QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying), квадратурно-амплитудной модуляции QAM (Quadrature Amplitude Modulation) разного уровня.

Для увеличения спектральной эффективности, а также улучшения характеристик ВОСП или уменьшения влияния хроматической дисперсии применяют оптическую однополосную передачу каналов DWDM, что позволяет эффективно распределять оптическую энергию между поднесущими каналами [4, 5].

Стремление к увеличению спектральной эффективности приводит к уменьшению спектрального разноса каналов и росту количества частотно-разделённых каналов. Однако при увеличении количества спектральных каналов средняя мощность в оптическом волокне возрастает и приводит к появлению нежелательных нелинейных явлений [6], среди которых можно выделить вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) (эффект Рамана). По мере распространения многоканального сигнала по волокну происходит обмен энергией между спектральными каналами, причём в наихудшем состоянии оказывается первый канал (по шкале длин волн), энергия которого истощается и распределяется между вышестоящими по длине волны каналами в спектре. На приёмной стороне, до фотодетектора (ФД), для компенсации потерь многоканального сигнала в волокне применяется оптический усилитель сигналов. В настоящее время коммерчески доступны и широко используются эрбиевые оптические усилители EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier), однако после фотодетектирования их шумовые характеристики влияют на отношение сигнал/шум (С/Ш).

Расчёт количества однополосных спектральных каналов, а также поднесущих каналов разного формата при заданных требованиях к характеристикам ВОСП является актуальной задачей. В данной работе приводится оценка количества частотно-разделённых каналов с учётом нелинейных влияний из-за ВКР между спектральными каналами и шумов предусилителя на приёмной стороне.

Математический аппарат для оценки параметров сети. Структурная схема ВОСП с ЧРК состоит из передающей части, оптического волокна, оптического усилителя (ОУ) и приёмной части (рис. 1). На передающей стороне находятся M однополосных оптических модуляторов, формирующих спектральные каналы, разнос частот между которыми обозначим $\Delta\nu_k$. На входы модуляторов подаются сигналы от N поднесущих каналов (для упрощения анализа полагаем одинаковое количество поднесущих на одной оптической частоте). На выходах каждого модулятора оптическая мощность содержит спектральные составляющие на центральной оптической частоте и верхней боковой полосе (в частотной области). Реализация однополосной оптической модуляции возможна разными способами. Например, после обыкновенного модулятора можно фильтровать одну боковую оптическую полосу [4, 7] или применять специальный модулятор, на выходе которого формируется однополосный сигнал. В данной работе рассматривается ВОСП, использующая однополосный модулятор Маха — Цендера на кристалле LiNbO_3 с двойными электродами [5, 8]. После суммирования мощностей в оптическом мультиплексоре (MUX) в точке S оконча-

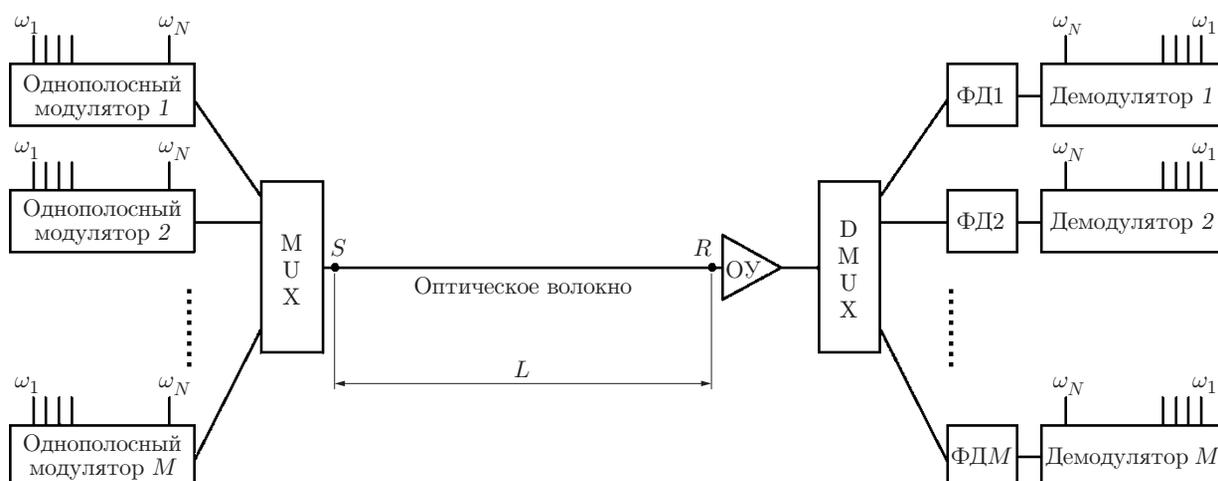


Рис. 1

тельно формируется многоканальный сигнал с ЧРК, вводится в оптическое волокно и распространяется на расстояние L , на котором находится приёмная аппаратура. В данной работе предполагается наличие предварительного оптического усилителя EDFA для компенсации потерь в оптическом тракте, включая потери в демультиплексоре (DMUX). Далее не будем учитывать линейные потери по мощности, подразумевая их скомпенсированными в ОУ. После демультиплексирования сигналы спектральных каналов поступают на определённые ФД, преобразуются в электрические сигналы. Затем с помощью демодуляторов выделяются исходные информационные сигналы. Для оценки качества приёма поднесущих каналов необходимо найти токи на выходах соответствующих демодуляторов. Фототоки содержат не только полезные сигналы, но и шумовые составляющие, возникающие после фотодетектирования и являющиеся результатом преобразования оптического шума ОУ в электрический. Кроме этого, при прохождении по волоконно-оптическому тракту оптическая мощность в каждом спектральном канале изменяется из-за ВКР. В наилучшем состоянии находится первый канал DWDM (с наименьшей длиной волны), поэтому, оценивая отношение С/Ш на выходе ФД первого спектрального канала, найдём наименьшее отношение С/Ш.

Для одноканальной ($M = 1$) ВОСП с ЧРК фототок на выходе ФД определяется по формуле [8]

$$I(t) \approx I_0 \left\{ 1 + \sum_{k=1}^N \sqrt{2} m_k u_k(t) \cos(\omega_k t) \right\}, \quad (1)$$

где $I_0 = \bar{P}_{R1} G S$ — среднее значение фототока, \bar{P}_{R1} — средняя оптическая мощность канала в точке R (см. рис. 1), G — коэффициент усиления ОУ; m_k — глубина оптической модуляции; ω_k — угловая частота поднесущего канала k ($k = 1, 2, \dots, N$); $u_k(t)$ — нормированные амплитуды информационных символов.

Из (1) видно, что фототок поднесущего канала k определяется из выражения [8]

$$I_k(\omega_k, t) = \bar{P}_{R1} G S \sqrt{2} m_k u_k(t) \cos(\omega_k t). \quad (2)$$

После демодуляции поднесущего канального сигнала остаётся только информационная огибающая сигнала [8]

$$I_k = \bar{P}_{R1} G S \sqrt{2} m_k u_k(t). \quad (3)$$

Спонтанный шум ОУ при фотодетектировании смешивается с полезным сигналом и на выходе появляется так называемый шум усиленной спонтанной (сп) эмиссии ASE (Amplified Spontaneous Emission). Среднеквадратичное отклонение фототока из-за шума ASE можно оценить по выражению [9]

$$\bar{I}_{\text{ASE}}^2 = 4S^2 \bar{P}_{R1} P_{\text{сп}} \Delta f, \quad (4)$$

где $P_{\text{сп}}$ — спектральная плотность шума ASE:

$$P_{\text{сп}} = h\nu(G - 1)F, \quad (5)$$

h — постоянная Планка, ν — оптическая частота первого канала DWDM, F — коэффициент шума ОУ; Δf — электрическая полоса ширины спектра (так как при передаче использовалась однополосная модуляция, то $\Delta f \approx \Delta\nu/2$, где $\Delta\nu$ в первом приближении — ширина двух боковых полос). В данной работе коэффициент шума ОУ равен 6 дБ.

Таким образом, отношение С/Ш с учётом (3)–(5) примет вид

$$C/\text{Ш} \approx \frac{\sqrt{\bar{P}_{R1}} m_k u_k(t)}{\sqrt{h\nu \Delta\nu F}}. \quad (6)$$

С помощью (6) можно найти Q -фактор для поднесущих каналов разных форматов модуляции [8]:

$$Q = \frac{\sqrt{\bar{P}_{R1}} m_k (\Delta u_k)_{\min}}{2\sqrt{h\nu \Delta\nu F}}, \quad (7)$$

где $(\Delta u_k)_{\min}$ — минимальное расстояние между символами информационных данных. В табл. 1 приведены форматы модуляции и соответствующие им нормированные значения $(\Delta u_k)_{\min}$.

Рассмотрим каналы DWDM ($M > 1$) и их влияние на Q -фактор для поднесущих каналов разного формата. Предположим, что первоначально спектр группового многоканального сигнала с ЧРК «плоский», т. е. мощность в каждом канале одна и та же. При распространении многоканального сигнала по оптическому волокну, если разность длин волн каналов оказывается в полосе усиления Рамана, длинноволновые каналы усиливаются за счёт коротковолновых, которые при этом истощаются. Самый коротковолновый канал (т. е. первый по шкале длин волн) истощается в большей степени, так как передаёт часть своей энергии всем остальным каналам, а сам не получает её от других. Если полагать, что в каждом канале мощность одинакова и равна \bar{P}_{s1} и каналы равномерно распределены в частотном спектре, то истощение первого канала из-за ВКР при распространении на расстояние L можно найти по формуле [10]

$$D_R = 1 - \exp \left[-\frac{1}{2} M(M-1) C_R \bar{P}_{s1} L_{\text{эфф}} \right] \frac{N \text{sh} \left(\frac{1}{2} M C_R \bar{P}_{s1} L_{\text{эфф}} \right)}{\text{sh} \left(\frac{1}{2} M^2 C_R \bar{P}_{s1} L_{\text{эфф}} \right)}, \quad (8)$$

где $C_R = S_R \Delta\nu_k / (2A_{\text{эфф}})$, S_R — наклон треугольного профиля, аппроксимирующего зависимость коэффициента рамановского усиления g_R от разности частот между каналами, $A_{\text{эфф}}$ — эффективная площадь сечения основной моды оптического волокна; $\bar{P}_{s1} = \bar{P}_{s1}(0)$ — средняя оптическая мощность в первом канале DWDM в точке S ; $L_{\text{эфф}}$ — эффективная длина оптического волокна: $L_{\text{эфф}} = (1 - e^{-\alpha L}) / \alpha$, α — коэффициент затухания оптического волокна.

Таблица 1

Формат модуляции	Нормированное значение $(\Delta u_k)_{\min}$
BPSK	2
ASK	1
QPSK	$\sqrt{2}$
QAM-16	$\sqrt{2}/3$
QAM-64	$\sqrt{2}/7$
QAM-256	$\sqrt{2}/15$

Мощность истощённого первого канала DWDM на расстоянии L вдоль оптического волокна вычисляется по выражению [10]

$$\bar{P}_{R1} = \bar{P}_{s1}(L)(1 - D_R). \quad (9)$$

Здесь $\bar{P}_{s1}(L)$ — мощность первого канала DWDM при отсутствии нелинейных явлений:

$$\bar{P}_{s1}(L) = \bar{P}_{s1}(0) \exp(-\alpha L). \quad (10)$$

Для аналитических расчётов воспользуемся приближённой формулой

$$D_R \approx \frac{1}{2} M(M-1) C_R \bar{P}_{s1} L_{\text{эфф}} \quad (11)$$

при несильном воздействии ВКР на сигналы [10]:

$$M^2 C_R \bar{P}_{s1} L_{\text{эфф}} \ll 1. \quad (12)$$

Подставляя (11) в (9) и далее в (7), после ряда преобразований получим квадратное уравнение относительно \bar{P}_{s1} . Так как нелинейные явления возникают при увеличении вводимой в волокно суммарной мощности, необходимо брать наименьшее значение решения полученного квадратного уравнения:

$$\bar{P}_{s1} \approx \frac{1 - \left\{ 1 - 8 \exp(\alpha L) \frac{h\nu \Delta\nu F}{[m_k(\Delta u_k)_{\min}]^2} M(M-1) C_R L_{\text{эфф}} Q^2 \right\}^{1/2}}{M(M-1) C_R L_{\text{эфф}}}. \quad (13)$$

Возвращаясь к условию (12) и предполагая, что $m_k = 1/N$ (наихудший случай), найдём более простое, но приближённое выражение, связывающее максимальное значение \bar{P}_{s1} и Q -фактор:

$$\bar{P}_{s1} \approx 4 \exp(\alpha L) \left\{ \frac{N}{(\Delta u_k)_{\min}} \right\}^2 h\nu \Delta\nu F Q^2. \quad (14)$$

Как видно из (14), при слабых нелинейных явлениях, когда выполняется условие (12), мощность в первом канале не зависит от количества M каналов DWDM. При каких параметрах системы искажения из-за явления ВКР будут сильные, а в каких случаях ими можно пренебречь? Для ответа на этот вопрос необходимо решить систему уравнений (6)–(10). Проведённые численные расчёты дают более точный результат и показывают значительное ограничение пропускной способности системы при использовании разных форматов модуляции, особенно QAM. Спрогнозируем вероятность появления ошибки BER (Bit Error Rate) по полученным результатам численных расчётов значений Q -фактора [10]:

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \text{erfc}(Q/\sqrt{2}), \quad (15)$$

где erfc обозначает дополнительную функцию ошибок.

Результаты численных расчётов. При численных расчётах использовались параметры стандартного одномодового оптического волокна в спектральном диапазоне «С» в предположении, что суммарная скорость в одном канале DWDM составляет 10 Гбит/с, а разброс частот между каналами — 100 ГГц. Рис. 2, *a* иллюстрирует зависимость BER от мощности в первом канале при $M = 40$, $N = 10$, $L = 20$ км для разных форматов модуляции поднесущих каналов. Отметим, что значение $\text{BER} = 10^{-12}$ будет достигнуто при $Q = 7$. Предположим, что в ВОСП с ЧРК не применяется прямая или упреждающая коррекция ошибок, резко повышающая качество работы ВОСП, в частности сохраняющая требуемую величину BER при меньших величинах Q -фактора. Тогда при $N = 10$ формат QAM-256 не рекомендуется использовать в качестве формата модуляции поднесущих из-за нежелательной величины BER.

На рис. 2, *b* показана зависимость BER от мощности в первом канале DWDM при $M = 120$, $N = 10$, $L = 20$ км. Рост количества каналов DWDM приводит к увеличению BER, а также невозможности использования почти всех разновидностей QAM-модуляции в ВОСП с ЧРК. Отметим, что на рисунке отчётливо видны величины оптических мощностей, при превышении которых возникают нелинейные явления ВКР и, как следствие, происходит увеличение BER. Для 40-канальной системы ($M = 40$) порог \bar{P}_{s1} находится в пределах +10 дБм, а для 120-канальной системы ($M = 120$) — порядка +3 дБм. В качестве примера оценки максимально возможных параметров ВОСП с ЧРК зададим максимальные величины $\bar{P}_{s1} = 10$ дБм, $N = 10$, $L = 20$ км и $Q = 7$. Расчёты показывают, что в этом случае количество каналов DWDM для форматов BPSK, ASK, QPSK, QAM-16, QAM-64 не должно превышать значений 132, 124, 116, 91, 47 соответственно. Вычисление для формата модуляции поднесущих каналов QAM-256 приводит к $Q < 7$, значит, такой формат нельзя применять к заданным условиям системы, например при количестве поднесущих $N = 10$. Очевидно, что в ВОСП с ЧРК с одновременным использованием разных форматов поднесущих каналов количество каналов DWDM необходимо выбирать по наи-

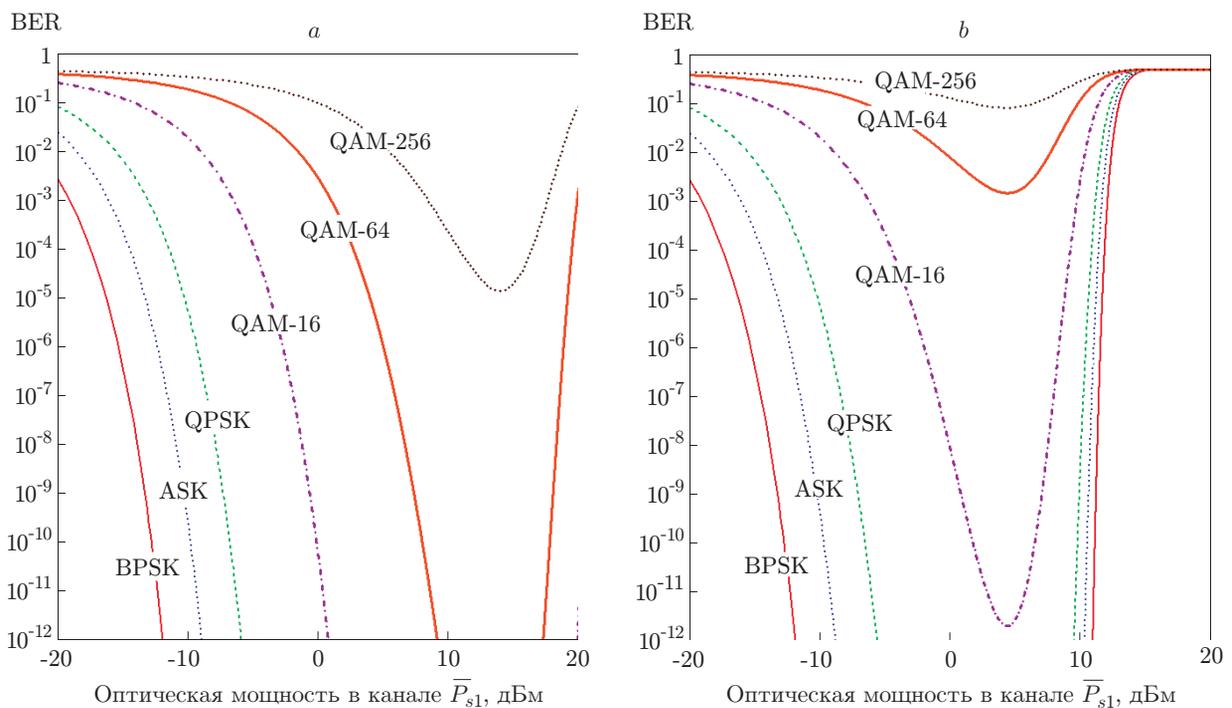


Рис. 2

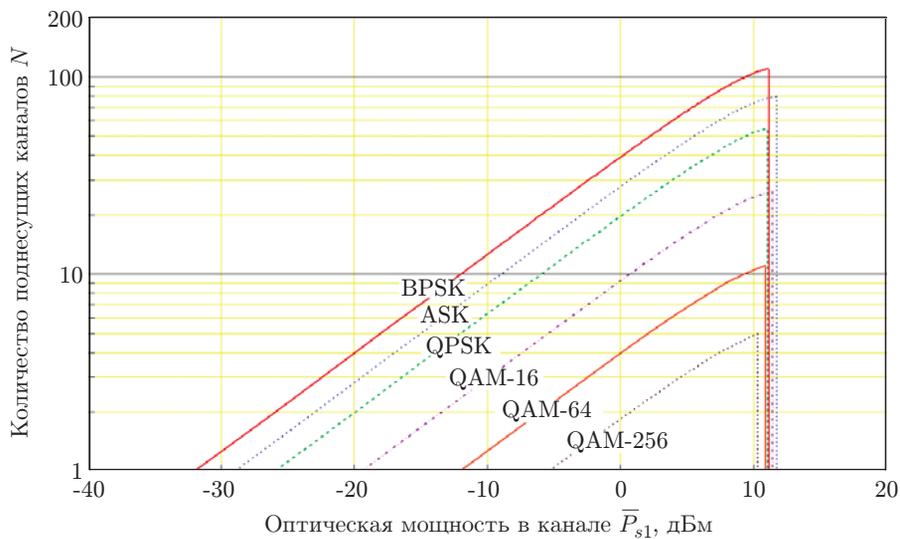


Рис. 3

меньшей величине M ($M \sim 40$). Тем не менее одинаковые форматы поднесущих, например BPSK, приводят приблизительно к 3-кратному увеличению количества каналов DWDM (до $M = 132$).

Для оценки количества поднесущих каналов можно воспользоваться как уравнениями (7)–(10), так и приближённым выражением (14). На рис. 3 представлена зависимость количества поднесущих каналов N от мощности в канале \bar{P}_{s1} для $M = 40$, $Q = 7$, $L = 20$ км. Анализ показывает, что результаты численных расчётов по (7)–(10) и (14) дают отклонения примерно в один поднесущий канал на пике функциональной зависимости $N(\bar{P}_{s1})$. Количество поднесущих ограничивается сверху значением $N = 110$ для формата BPSK и $N = 5$ для формата QAM-256. Таким образом, передача всех рассмотренных форматов модуляции поднесущих каналов возможна при условии соответствующего выбора параметров ВОСП (количества поднесущих каналов, количества и мощности каналов DWDM).

В табл. 2 приведены расчётные значения максимального количества поднесущих каналов N разных форматов модуляции для трёх значений количества каналов DWDM ($M = 40, 80, 160$) с указанием максимальной мощности в одном канале DWDM, при которой возможно сочетание данных M и N , если расстояния на сети доступа не превышают

Таблица 2

BPSK			ASK			QPSK		
M	N	\bar{P}_{s1} , дБм	M	N	\bar{P}_{s1} , дБм	M	N	\bar{P}_{s1} , дБм
40	110	+11,1	40	79	+11,7	40	55	+11,1
80	55	+5,2	80	39	+5,3	80	27	+4,7
160	27	-1,2	160	19	-1,4	160	12	-2,2
QAM-16			QAM-64			QAM-256		
M	N	\bar{P}_{s1} , дБм	M	N	\bar{P}_{s1} , дБм	M	N	\bar{P}_{s1} , дБм
40	26	+11,2	40	11	+10,9	40	5	+10,3
80	13	+5,4	80	5	+3,2	80	2	+1,4
160	6	-5,4	160	2	-7,8	160	—	—

20 км. Из таблицы следует, что передача поднесущих каналов формата QAM-256 невозможна при $M = 160$ и двукратное увеличение количества каналов DWDM приводит к уменьшению количества поднесущих каналов почти в 2 раза. Для снижения влияния ВКР при увеличении количества каналов DWDM необходимо уменьшить мощность в одном канале.

Заключение. В предлагаемой работе рассмотрена волоконно-оптическая система передачи с частотным разделением каналов, которое происходит в оптическом, СВЧ- и РЧ-диапазонах. Оптические каналы сформированы с помощью однополосной модуляции, что привлекательно с точки зрения концентрации энергии в поднесущих каналах, устранения дисперсионных явлений в волокне, а также уменьшения эффективной оптической полосы одного канала DWDM. Продемонстрировано, что нелинейное явление ВКР и шум оптического усилителя ухудшают характеристики системы и приводят к уменьшению количества как спектральных, так и поднесущих каналов. Применительно к волоконно-оптическим сетям доступа, где расстояния передачи не превышают нескольких десятков километров, наименее подвержены этим шумам BPSK-, ASK-, QPSK-форматы модуляции поднесущих каналов. Показано, что можно организовать 160 спектральных каналов и в каждом сформировать до 27 поднесущих каналов в зависимости от формата модуляции поднесущих. Применение форматов модуляции QAM 64/256 ограничивает количество поднесущих до 5–11, а каналов DWDM — до 40.

Полученные функциональные соотношения и результаты расчётов могут применяться при проектировании волоконно-оптических сетей доступа, когда планируется транспортировка беспроводных каналов разных форматов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kottke C., von Hoyningen-Huene J., Eiselt M. et al.** Coherent SCM-WDM-PON system using OFDM or single carrier with SSB modulation and wavelength reuse // Proc. of the 39th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC). London, UK, 2013. DOI: 10.1049/cp.2013.1463.
2. **Buset J. M., El-Sahn Z. A., Plant D. V.** Experimental demonstration of a 10Gb/s RSOA-based 16-QAM subcarrier multiplexed WDM PON // Opt. Express. 2014. **22**, Is. 1. P. 1–8. DOI: 10.1364/OE.22.000001.
3. **Bakaul M., Nirmalathas A., Lim C. et al.** Hybrid multiplexing of multiband optical access technologies towards an integrated DWDM network // IEEE Photon. Technol. Lett. 2006. **18**, Is. 21. P. 2311–2313.
4. **Gutierrez F. A., Perry P., Smyth F. et al.** Impact of band rejection in multichannel broadband subcarrier multiplexing // IEEE/OSA Journ. Opt. Commun. and Networking. 2015. **7**, Is. 4. P. 248–252. DOI: 10.1364/JOCN.7.000248.
5. **Smith G. H., Novak D., Ahmed Z.** Overcoming chromatic-dispersion effects in fiber-wireless systems incorporating external modulators // IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques. 1997. **45**, Is. 8. P. 1410–1415. DOI: 10.1109/22.618444.
6. **Qiu M., Zhuge Q., Chagnon M. et al.** Digital subcarrier multiplexing for fiber nonlinearity mitigation in coherent optical communication systems // Opt. Express. 2014. **22**, Is. 15. P. 18770–18777. DOI: 10.1364/OE.22.018770.
7. **Cossu G., Presi M., Ciaramella E.** Optical double-to-single sideband modulation converter for radio-over-fiber systems based on injection-locked Fabry — Perót lasers // Proc. of the Conf. on Laser and Electro-Optics (CLEO). San Jose, USA, 2010. DOI: 10.1364/CLEO.2010.CThK4.

8. **Hui R., Zhu B., Huang R. et al.** Subcarrier multiplexing for high-speed optical transmission // Journ. Lightwave Technol. 2002. **20**, Is. 3. P. 417–427.
9. **Листвин В. Н., Трещиков В. Н.** DWDM системы. М.: Наука, 2013. 267 с.
10. **Agrawal G. P.** Lightwave Technology: Telecommunication Systems. Hoboken, USA: Wiley-Interscience, 2005. 480 p.

Поступила в редакцию 17 ноября 2015 г.
