

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ УРОВНЕЙ МОЩНОСТИ ПЕРЕДАЮЩИХ ОПТИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ С ЧАСТОТНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ КАНАЛОВ

DOI 10.24411/2072-8735-2018-10284

Варданын Вардгес Андраникович,
ФГБОУ ВО "Сибирский государственный университет
телекоммуникаций и информатики",
г. Новосибирск, Россия,
vardgesvardanyan@mail.ru

Ключевые слова: частотное разделение каналов (FDM), четырехволновое смещение (FWM), фазовая кросс-модуляция (XPM), вынужденное комбинационное рассеяние (SRS), Q-фактор.

В настоящее время в оптических сетях доступа происходит взрывной спрос на широкополосные мультимедийные услуги, услуги облачных вычислений и хранения информационного контента. Это обстоятельство побуждает разработчиков телекоммуникационной аппаратуры, с одной стороны, искать решения, обеспечивающие гарантированную требуемую высокую скорость передачи данных пользователям, а, с другой стороны, использовать экономичное оборудование пользовательского класса. Для решения проблем, связанных с увеличением пропускной способности оптических сетей доступа, предлагается использовать частотное разделение каналов не только в оптическом диапазоне, но и в радиодиапазоне. При частотном разделении каналов в радиодиапазоне частот формируются многоканальные сигналы, у которых в каналах передаются спектрально-эффективные многоуровневые сигналы разного формата модуляции. Применением частотного разделения этих многоканальных сигналов в оптическом диапазоне достигается увеличение пропускной способности системы передачи. Однако увеличение канальной загрузки приводит к появлению нелинейных явлений в оптическом волокне, что ограничивает дальнейший рост пропускной способности системы передачи. Рассматривается передача частотно-разделенных канальных сигналов форматов BPSK, QPSK, ASK, QAM по волоконно-оптическому тракту, функционирующему в нелинейном режиме. Показано, что уровни мощности оптических передающих модулей ограничиваются снизу спонтанным шумом оптического усилителя, а сверху – нелинейными явлениями. При формировании до 80 оптических частотно-разделенных каналов форматами модуляции BPSK, QPSK, ASK ограничивающим фактором становится четырехволновое смещение, а для каналов форматами QAM – фазовая кросс-модуляция. Дальнейшее увеличение количества оптических каналов приводит к тому, что к этим ограничивающим нелинейным явлениям добавляется вынужденное комбинационное рассеяние. Приводятся формулы, позволяющие рассчитать оптимальные уровни мощности передающих оптических модулей в зависимости от требуемых параметров системы передачи: дальности передачи, количества спектральных и поднесущих каналов, их форматов модуляции и частотного интервала между ними.

Информация об авторе:

Варданын Вардгес Андраникович, доцент кафедры многоканальной электрической связи и оптических систем, к.т.н., ФГБОУ ВО "Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики", г. Новосибирск, Россия

Для цитирования:

Варданын В.А. Определение оптимальных уровней мощности передающих оптических модулей в волоконно-оптических системах передачи с частотным разделением каналов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Том 13. №7. С. 4-9.

For citation:

Vardanyan V.A. (2019) Estimation of the optimal power levels of transmitters in fiber-optic transmission systems with frequency division channels. *T-Comm*, vol. 13, no.7, pp. 4-9. (in Russian)

Введение

В волоконно-оптических системах передачи (ВОСП) с прямым фотодетектированием использование оптических сигналов, сформированных мультиплексированием поднесущих (SCM – subcarrier multiplexing) каналов с многоуровневыми (амплитудно-фазовыми) форматами модуляции дает возможность эффективно использовать радиодиапазон частот и увеличить суммарную скорость передачи данных. Плотное волновое мультиплексирование (DWDM – dense wavelengths multiplexing) однополосных оптических сигналов, сформированных с помощью технологии SCM, позволяет компактно размещать в спектре эти оптические каналные сигналы и многократно увеличивать пропускную способность системы передачи. Эквивалентный частотный интервал между оптическими каналами регламентирован ИТУ-T и может составлять 12,5 ГГц, 25 ГГц, 50 ГГц, 100 ГГц [1]. Увеличение пропускной способности ВОСП путем увеличения количества каналов, как в оптическом, так и в радиодиапазоне приводит к росту средней мощности в оптическом волокне, что в свою очередь обуславливает появление таких нелинейных явлений, как четырехволновое смещение (ЧВС), фазовая кросс-модуляция (ФКМ), вынужденное комбинационное рассеяние Рамана (ВКР) и Манделштама-Бриллюэна (ВКРМБ) [2, 3, 4]. Нелинейные явления ограничивают дальнейший рост уровня мощности в волокне, а, следовательно, и в индивидуальных каналах. Отметим, что в работе явление ВРМБ не рассматривается, так как для широкого класса одномодовых волокон можно избежать влияния эффекта ВРМБ на каналные сигналы, если выбрать эквивалентный частотный интервал между оптическими каналами больше 12,5 ГГц [5].

Целью работы является: оценка влияния нелинейных явлений, возникающих в оптическом волокне, на показатели качества многоканальных сигналов с форматами: бинарной фазовой модуляции (Binary Phase-Shift Keying – BPSK), амплитудно-импульсной модуляции (Amplitude-Shift Keying – ASK), квадратурно-фазовой модуляции (Quadrature Phase-Shift Keying – QPSK), квадратурно-амплитудной модуляции с разным уровнем M (Quadrature Amplitude Modulation – M-QAM); нахождение оптимальных уровней оптических передающих оптических модулей ВОСП для достижения заданных показателей качества сигналов.

Структурная схема оптического тракта и математическое обоснование методики расчета

Структурная схема ВОСП с частотным разделением каналов, как в оптическом, так и в радиодиапазоне, показана

на рис. 1. ВОСП состоит из M передающих оптических модулей, включающих оптические однополосные модуляторы (ООМ) на разных длинах волн, оптического мультиплексора (MUX) и оптического усилителя (ОУ), волокна, оптического демультиплексора (DMUX), фотодетекторов (ФД) и демодуляторов (ДМ). На входы ООМ подаются сформированные в радиодиапазоне частот (f_1, f_2, \dots, f_N) поднесущие каналные сигналы, модулированные информационными сигналами S_i , где $i = 1, 2, \dots, N$. Для упрощения анализа предполагается одинаковое количество поднесущих на разных длинах волн, а также одинаковые уровни оптической мощности на выходах передающих оптических модулей P_m , где $m = 1, 2, \dots, M$. Таким образом, мощность оптического каналного сигнала состоит из спектральных составляющих на центральной оптической частоте и поднесущих, соответствующих верхней боковой полосе (в частотной области). На выходе MUX окончательно формируется многоканальный частотно-разделенный сигнал, который после усиления в ОУ в точке «S» вводится в оптическое волокно с длиной L .

В работе предполагается, что ОУ компенсирует оптические потери в линейном тракте, включая потери в MUX и DMUX. В дальнейшем не будем учитывать линейные потери по мощности, подразумевая их скомпенсированными ОУ. После демультиплексирования сигналы оптических каналов поступают на соответствующие ФД, преобразуются в электрические сигналы и с помощью ДМ выделяются исходные информационные сигналы. Для оценки качества приема поднесущих каналных сигналов необходимо найти соответствующие им токи на выходах ДМ. Токи содержат не только полезные сигналы, но и шумовые составляющие, достигшие ФД, например, шум ОУ и нелинейные шумы. В волоконно-оптическом тракте, функционирующем в нелинейном режиме, в каждом спектральном канале возникают нелинейные шумы при изменении оптической мощности из-за явления ВКР, а также в случае попадания в каналы помех, вызванных ФКМ и ЧВС, что приводит к ухудшению показателя качества сигнала в поднесущих каналах.

При ВКР происходит обмен энергией между оптическими каналами, причем в наихудшем состоянии оказывается первый канал (по шкале длин волн), энергия первого канала «истощается», и часть энергии распределяется между вышестоящими каналами в спектре. Уменьшение энергии в оптическом однополосном канале приводит к уменьшению мощности в поднесущих каналах.

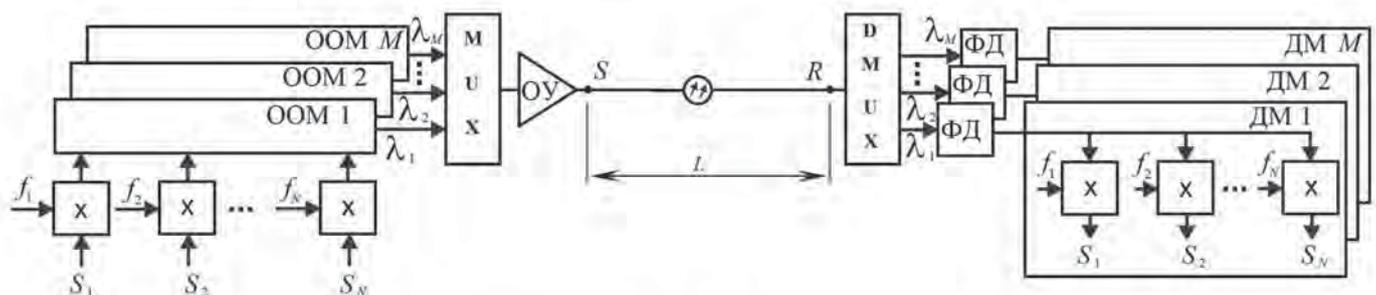


Рис. 1. Структурная схема ВОСП с частотным разделением каналов

В [4] приводится выражение для оценки показателя качества сигнала (Q-фактора), учитывающее не только эффект «истощения» мощности канала из-за ВКР, а также влияние усиленного спонтанного шума (УСШ) ОУ дошедшего до ФД:

$$Q_{УСШ+ВКР} \geq \frac{\sqrt{P_m(1-D_R)}(\Delta S)_{\min}}{2N\sqrt{hf_0F\Delta f}}, \quad (1)$$

где

$Q_{УСШ+ВКР}$ – показатель качества сигнала в поднесущих каналах, учитывающий шум УСШ и «истощение» мощности сигнала из-за ВКР;

P_m – уровень средней мощности на выходе модулятора;

D_R – характеризует степень «истощения» мощности в канале из-за ВКР [4, 6];

F – коэффициент шума ОУ (в расчетах принят 6 дБ);

$(\Delta S)_{\min}$ – нормированное минимальное расстояние между соседними точками информационного сигнала в IQ-диаграмме. Оно определяется: для QPSK: $(\Delta S)_{\min} = \sqrt{2}$; 16-QAM: $(\Delta S)_{\min} = \sqrt{2}/3$; 64-QAM: $(\Delta S)_{\min} = \sqrt{2}/7$; 256-QAM: $(\Delta S)_{\min} = \sqrt{2}/15$;

h – постоянная Планка, f – оптической частота первого канала, Δf – электрическая полоса ширины канала.

При ЧВС в оптическом волокне генерируются комбинационные частотные составляющие, которые попадая в каналы, ухудшают показатели качества сигналов. Анализ в [2, 7, 8] показал, что в худшем состоянии находятся каналы в середине частотного спектра. Ухудшение Q-фактора из-за ЧВС можно оценить:

$$Q_{ЧВС} = \left(\frac{(P_s / 2N) \exp(-\alpha L)}{(P_{ijk} N_{ЧВС})_{(\omega_i + \omega_j - \omega_k)} + (P_{ijk} N_{ЧВС})_{(2\omega_i - \omega_k)}} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где

$Q_{ЧВС}$ – показатель качества сигнала в поднесущих каналах, учитывающий шум из-за ЧВС;

P_s – уровень средней мощности оптического сигнала на входе волокна в точке «S», $(P_{ijk} N_{FWM})_{(\omega_i + \omega_j - \omega_k)}$ и $(P_{ijk} N_{FWM})_{(2\omega_i - \omega_k)}$ – произведение уровня мощности комбинационных частотных продуктов P_{ijk} вида $\omega_i + \omega_j - \omega_k$ и $2\omega_i - \omega_k$ и количества этих продуктов $N_{ЧВС}$, попадающих в заданный поднесущий канал, где $i, j, k = 1 \dots N$ [7]; α – потери в оптическом волокне.

Явление ФКМ проявляется в каналах в виде высокочастотных флуктуаций фазы в течение длительности одной выборки информационного сигнала [3]. При $N > 32$ плотность распределения этих флуктуаций стремится к гауссовому и ухудшение показателя качества сигнала можно оценить:

$$Q_{ФКМ} \geq \frac{(\Delta S)_{\min}}{(1,35 \cdot \gamma \cdot L_{эфф} \cdot P_s)^2}, \quad (3)$$

где

$Q_{ФКМ}$ – показатель качества сигнала в поднесущих каналах, учитывающий шум из-за фазовой кросс-модуляции;

γ – нелинейный коэффициент оптического волокна (в расчетах для стандартного одномодового волокна принят $\gamma = 1,2$ 1/(Вт·км);

$L_{эфф}$ – эффективная длина оптического волокна [5, 6].

Все нелинейные явления, возникают в оптическом волокне одновременно и необходимо оценить их совместное влияние на показатели качества поднесущих каналов. Суммарный вклад в Q-фактор явлений ЧВС, ФКМ и ВКР определим предполагая их случайный характер, и независимость друг от друга [9-12,]:

$$1/Q_{\Sigma}^2 \approx 1/Q_{УСШ+ВКР}^2 + 1/Q_{ЧВС}^2 + 1/Q_{ФКМ}^2, \quad (4)$$

Результаты расчетов

Проводились численные расчеты по (4), а также отдельно по формулам (1), (2), (3) при трех значениях частотного интервала между оптическими каналами: 100 ГГц, 50 ГГц, 25 ГГц, соответствующие $M = 40, 80, 160$. В расчетах предполагалось, что каждый оптический канал сформирован с помощью модуляции группового многоканального электрического сигнала, состоящего из множества равномерно расположенных по спектру поднесущих каналов с суммарной полосой, не превышающей 10 ГГц. В расчетах использовались параметры стандартного одномодового оптического волокна в диапазоне «С» с максимальной длиной 20 км.

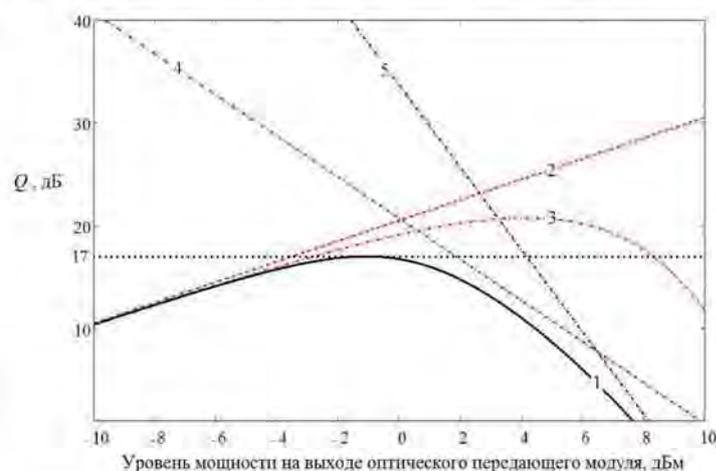


Рис. 2. Зависимости Q-фактора от уровня выходной мощности передающих оптических модулей ($M = 40, N = 434$, формат поднесущих QPSK);

1, 2, 3, 4, 5 – $Q_{\Sigma}, Q_{УСШ+ВКР}, Q_{ЧВС}, Q_{ФКМ}$

На рис. 2 показаны зависимости Q-фактора от уровня мощности на выходах оптических передающих оптических модулей при их количестве $M = 40$. Каждый из передающих модулей в состоянии передавать до $N = 434$ поднесущих канала формата QPSK. Как видно из рис. 2 при относительно низких уровнях мощности передающего модуля ограничивающим фактором является усиленный спонтанный шум ОУ, около значения 0 дБм происходит «переломный» момент кривой Q_{Σ} , и дальнейшее увеличение мощности при-

водит к уменьшению Q_{Σ} из-за ЧВС. Таким образом, при относительно больших уровнях мощности (от +2 дБм до +6 дБм) основным ограничивающим фактором является ЧВС, влияние ФКМ проявляется при мощностях более +6 дБм. Аналогичные зависимости Q_{Σ} от уровня мощности сигналов передающих оптических модулей получаются для поднесущих каналов формата BPSK, ASK.

в четыре раза приводит к уменьшению числа поднесущих каналов приблизительно в два раза.

Таблица 1

Максимальное количество поднесущих N_{max} максимальные уровни мощности передающих оптических модулей P_m при количестве оптических каналов $M = 40, 80, 160$ для разных форматов модуляции

Формат модуляции	$M = 40$		$M = 80$		$M = 160$	
	N_{max}	P_m , дБм	N_{max}	P_m , дБм	N_{max}	P_m , дБм
BPSK	872	-0,97	676	-1,5	438	-3
QPSK	434	-0,97	337	-1,5	219	-3
ASK	215	-0,97	167	-1,5	109	-3
16-QAM	45	-1,5	36	-1,5	24	-2,6
64-QAM	20	-2,2	5	-2,2	4	-2,2
256-QAM	1	-3	1	-3	-	-

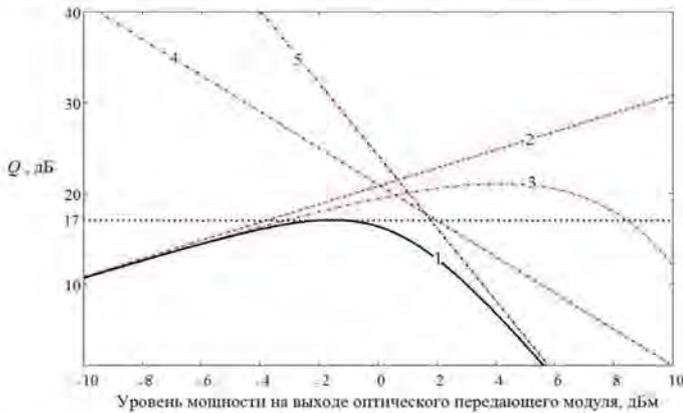


Рис. 3. Зависимости Q-фактора от уровня выходной мощности передающих оптических модулей ($M=40, N=45$, формат поднесущих 16-QAM);
1, 2, 3, 4, 5 – $Q_{\Sigma}, Q_{УСЦИ}, Q_{УСЦИ+ВКР}, Q_{ЧВС}, Q_{ФКМ}$

Помеховая обстановка меняется если в качестве поднесущих форматов модуляции используются форматы QAM. На рис. 3 показаны зависимости Q-фактора от уровней оптической мощности сигналов на выходах передающих оптических модулей при их количестве $M = 40$. Каждый из передающих модулей в состоянии обеспечить до $N = 45$ поднесущих каналов формата 16-QAM. Как видно из рис. 3 ограничивающим фактором сверху (при больших мощностях) является ФКМ, а не ЧВС.

Для наглядности в Таблице 1 приведены значения максимального количества поднесущих и максимальные уровни мощности передающих оптических модулей для разных форматов модуляции. Отметим, что в Таблице 1 представлены результаты для 40, 80 и 160-канальных оптических систем передачи.

Расчеты показывают, что с уменьшением частотного интервала между оптическими каналами и увеличением количества каналов, вклад от ВКР увеличивается и становится доминирующим. В основном, для поднесущих каналов с форматами модуляции BPSK, QPSK, ASK ограничивающими являются ВКР и ЧВС, а при форматах модуляции QAM – ВКР и ФКМ. На рис. 4 и рис. 5 для подтверждения вышесказанного, показаны зависимости Q_{Σ} от уровня мощности передающих оптических модулей 160-канальной оптической системы при форматах модуляции в поднесущих каналах QPSK и 16-QAM, при количестве поднесущих 219 и 24, соответственно. Необходимо отметить, что увеличивая число оптических каналов необходимо уменьшать уровень мощности передающих модулей. Для примеров, приведенных на рис. 4 и рис. 5, оптимальная мощность передающих оптических модулей находится около -3 дБм. Кроме этого, как видно из таблицы 1 увеличение количества оптических каналов

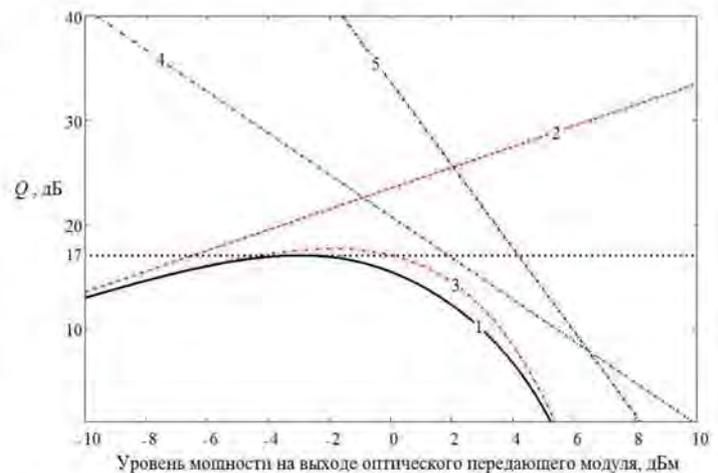


Рис. 4. Зависимости Q-фактора от уровня выходной мощности передающих оптических модулей ($M=160, N=219$, формат поднесущих QPSK);
1, 2, 3, 4, 5 – $Q_{\Sigma}, Q_{УСЦИ}, Q_{УСЦИ+ВКР}, Q_{ЧВС}, Q_{ФКМ}$

Таким образом, с помощью частотного разделения каналов, как в оптическом диапазоне, так и в электрическом можно добиться увеличения суммарной пропускной способности существующих сетей доступа. Как видно из Таблицы 1, при передаче по оптическому тракту 40 оптических каналов, каждый из которых может «нести» порядка 400 поднесущих каналов со скоростью передачи данных 50 Мбит/с (при использовании формата QPSK), суммарная скорость в сети составит порядка 800 Гбит/с.

При увеличении количества оптических каналов в 4 раза суммарная скорость составит 3,2 Тбит/с. Заметим, что приведенные оценочные величины соответствуют случаю, когда в ВОСП не применяется корректирующее кодирование данных, т.е. $Q_{\Sigma} \geq 17$ дБ [13, 14]. Дальнейшее увеличение пропускной способности ВОСП достигается использованием технологии корректирующего кодирования.

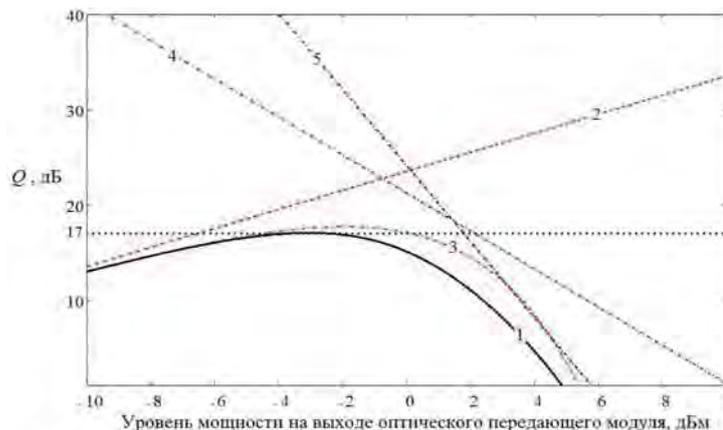


Рис. 5. Зависимости Q-фактора от уровня выходной мощности передающих оптических модулей ($M = 160$, $N = 24$, формат поднесущих 16-QAM);

1, 2, 3, 4, 5 – $Q_{\text{с}}$, $Q_{\text{УСШ}}$, $Q_{\text{УСШ-ВКР}}$, $Q_{\text{ЧВС}}$, $Q_{\text{ФЖМ}}$

Заключение

Исследован волоконно-оптический тракт в нелинейном режиме функционирования. Показано, что уровни мощности оптических передающих модулей ограничиваются снизу спонтанным шумом оптического усилителя, а сверху – нелинейными явлениями. Таким образом, существуют оптимальные величины уровней мощности передающих оптических модулей. Расчеты показали, что количество поднесущих каналов с форматами модуляции BPSK, QPSK, ASK ограничивается явлением четырехволнового смешения, а с форматами модуляции QAM – явлением фазовой кросс-модуляции. При сильных нагрузках сети, при числе оптических каналов превышающих 160 и суммарной скорости передачи данных по волокну несколько Тбит/с, к этим ограничивающим явлениям добавляется вынужденное комбинационное рассеяние.

Для нахождения оптимального уровня мощности передающих оптических модулей необходимо по заданным исходным данным волоконно-оптической системы передачи численно решить предложенное в данной работе уравнение (4) относительно уровня оптической мощности.

Приведенная комплексная оценка влияния на показатель качества сигналов нелинейных явлений, возникающих в волокне, а также численное определение оптимальной величины уровней мощности передающих оптических модулей

может использоваться при проектировании волоконно-оптических систем передачи с частотным разделением каналов.

Литература

1. ITU-T Recommendation G.694.1. https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.694.1-201202-1!!!PDF-E&type=items (дата обращения 20.04.2019).
2. Вардамян В.А. Исследование распределения продуктов четырехволнового смешения в ВОСП с ЧПК // Вестник СибГУТИ. 2016. № 2. С. 78-84.
3. Вардамян В.А. Влияние фазовой самомодуляции и фазовой кросс-модуляции на OFDM-сигналы в волоконно-оптических сетях доступа // Квантовая электроника. 2018. № 4. С. 395-400.
4. Вардамян В.А. Оценка количества спектральных и поднесущих каналов в волоконно-оптических сетях доступа при однополосной оптической модуляции // Автотметрия. 2016. Т. 52, № 3. С. 116-124.
5. Shneider T. Nonlinear optic in telecommunications / Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004. 415 p.
6. Agrawal G.P. Lightwave technology: Telecommunication systems / Hoboken, USA: Wiley-Interscience, 2005. 480 p.
7. Вардамян В.А. Влияние помех от четырехволнового смешения на спектрально разделенные каналы в пассивных оптических сетях доступа // Автотметрия. 2017. Т. 53, № 1. С. 63-72.
8. Вардамян В.А. Методика оценки отношения сигнал-шум в волоконно-оптических системах передачи с частотным разделением каналов // Измерительная техника. 2017. № 7. С. 53-57.
9. Жителев А.Е., Кобышев В.А., Лукиных С.Н., Наний О.Е., Трещиков В.Н., Убайдуллаев Р.Р. Нелинейные искажения как нелинейный шум в когерентных волоконно-оптических линиях связи // Квантовая электроника. 2017. № 12. С. 1135-1139.
10. Гуркин Н.В., Кобышев В.А., Наний О.Е., Новиков А.Г., Трещиков В.Н., Убайдуллаев Р.Р. Зависимость коэффициента ошибок от мощности сигнала и длины однопролетной одноканальной когерентной линии связи (100 Гбит/с) с поляризационным мультиплексированием // Квантовая электроника. 2015. № 1. С. 69-74.
11. Гуркин Н.В., Наний О.Е., Новиков А.Г., Плаксин С.О., Трещиков В.Н., Убайдуллаев Р.Р. Нелинейный интерференционный шум в системах связи 100 Гбит/с с форматом модуляции DP-QPSK // Квантовая электроника. 2013. № 6. С. 550-553.
12. Kumar S. Impact of nonlinearities on fiber optic communications / Springer, 2011. 543 p.
13. Убайдуллаев Р.Р. Протяженные ВОЛС на основе EDFA // Lightwave Russian edition. 2003. № 1. С. 22-28.
14. ITU-T Recommendation Series G, Supplement 39 (02/2016). https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.Sup39-201602-1!!!PDF-E&type=items (дата обращения 20.04.2019).

ESTIMATION OF THE OPTIMAL POWER LEVELS OF TRANSMITTERS IN FIBER-OPTIC TRANSMISSION SYSTEMS WITH FREQUENCY DIVISION CHANNELS

Vardges A. Vardanyan,

Siberian State University of Telecommunications and Informatics, Novosibirsk, Russia,

vardgesvardanyan@mail.ru

Abstract

Currently, optical access networks are experiencing an explosive demand for broadband multimedia services, cloud computing services and information content storage. This circumstance, on the one hand, forces the developers of telecommunication equipment to find solutions which guarantee the required high data transfer rate of users, and, on the other hand, use cost-effective user-class equipment. To solve the problems associated with an increase in the capacity of optical access networks, it is proposed to use frequency division multiplexing not only in the optical band, but also in the radio band. In the case of frequency division multiplexing in the radio frequency band, multichannel signals are formed, where spectral effective multi-level signals of different modulation formats are transmitted in channels. Using the frequency multiplexing of such multichannel signals in the optical band, an increase in the transmission capacity of the transmission system is achieved. However, an increase in channel loading leads to the appearance of nonlinear phenomena in an optical fiber, which limits the further increase in transmission capacity of the transmission system. The work deals with the transmission of frequency multiplexed signals of the formats BPSK, QPSK, ASK, QAM over a fiber operating in a nonlinear mode. It is shown that the optical power levels of transmitters are limited from below by spontaneous noise of an optical amplifier, and from above by nonlinear phenomena. When forming up to 80 optical frequency multiplexed channels by the BPSK, QPSK, ASK modulation formats, four-wave mixing becomes the limiting factor, and for channels with the QAM formats - phase cross-modulation. A further increase in the number of optical channels leads to the fact that stimulated Raman scattering is added to these limiting nonlinear phenomena. Formulas are given that allow to calculate the optimal optical power levels of transmitters depending on the required parameters of the transmission system: the transmission distance, the number of spectral and subcarrier channels, their modulation formats and the frequency interval between them.

Keywords: FDM, FWM, XPM, SRS, Q-фактор.

References

1. ITU-T Recommendation G.694.1. URL: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.694.1-201202-I!!PDF-E&type=items (Accessed 20.04.2019).
2. Vardanyan V.A. (2016). Product distribution research of four-wave mixing in FOTS with FDM. *Vestnik SibSUTI*, no.2, pp. 78-84.
3. Vardanyan V.A. (2018). Effect of self-phase modulation and cross-phase modulation on OFDM signals in fibre-optic access networks. *Quantum Electronics*, no.4, pp. 395-400.
4. Vardanyan V.A. (2016). Estimating the number of spectral and subcarrier channels in fiber-optic access networks with single side band optical modulation. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, no. 3, pp. 311-317.
5. Shneider T. (2004). *Nonlinear optic in telecommunications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 415 p.
6. Agrawal, G.P. (2005). *Lightwave technology: Telecommunication systems*. Wiley-Interscience, 461 p.
7. Vardanyan V.A. (2017). Effect of four-wave mixing interference on spectrally separated channels in passive optical networks. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, no. 1, pp. 51-58.
8. Vardanyan V.A. (2017). A Technique for estimating the signal-to-noise ratio in fiber-optic transmission systems with frequency division multiplexing. *Measurement Techniques*, no. 7, pp. 724-730.
9. Zhitelev A.E., Konyshov V.A., Lukinykh S.N., Nanii O.E., Treshchikov V.N., Ubaydullaev R.R. (2017). Nonlinear distortions as nonlinear noise in coherent fibre-optic communication lines. *Quantum Electronics*, no.12, pp. 1135-1139.
10. Gurkin N.V., Konyshov V.A., Nanii O.E., Novikov A.G., Treshchikov V.N., Ubaydullaev R.R. (2015). Dependence of the bit error rate on the signal power and length of a single-channel coherent single-span communication line (100 Gbit s⁻¹) with polarisation division multiplexing. *Quantum Electronics*, no.1, pp. 69-74.
11. Gurkin N.V., Nanii O.E., Novikov A.G., Plaksin S.O., Treshchikov V.N., Ubaydullaev R.R. (2013). Nonlinear interference noise in 100-Gbit s⁻¹ communication lines with the DP-QPSK modulation format. *Quantum Electronics*, no.3, pp. 550-553.
12. Kumar S. (2011). *Impact of nonlinearities on fiber optic communications*. Springer, 543 p.
13. Ubaydullaev R.R. (2003) Long-distance fiber optic communications based on EDFA. *Lightwave Russian edition*, no.1, pp. 22-28.
14. ITU-T Recommendation Series G, Supplement 39 (02/2016). URL: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.Supp39-201602-I!!PDF-E&type=items (Accessed 20.04.2019).

Information about author:

Vardges A. Vardanyan, Associate Professor, Candidate of Engineering Sciences, Department of Telecommunications and Optical Systems, Siberian State University of Telecommunications and Informatics, Novosibirsk, Russia