

УДК 621.391.64

В.А. Варданян

Определение максимального количества поднесущих каналов в волоконно-оптических системах передачи с прямым фотодетектированием

Рассматриваются передача по оптическому волокну частотно-разделенных поднесущих каналов с разными форматами модуляции и оценка качества приема сигналов после фотодетектирования. Исследуется влияние на Q-фактор усиленного спонтанного шума оптического усилителя, находящегося на передающей стороне и, возникающее в волокне явление четырехволнового смещения.

Ключевые слова: волоконно-оптические системы передачи, частотное разделение каналов, поднесущий канал, четырехволновое смещение, ВОСП, ЧРК, ЧВС.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-1-33-37

В последнее время растет интерес к методам частотного разделения каналов в волоконно-оптических системах передачи (ВОСП). Особый интерес представляют оптические когерентные системы передачи с частотным разделением поднесущих каналов, которые позволят в будущем многократно увеличить пропускную способность оптического волокна [1, 2]. В таких системах при передаче информации на сверхдальние расстояния успешно компенсируется хроматическая дисперсия, что важно для организации связи между дата-центрами и востребовано операторами магистральных линий связи. С другой стороны современные сети доступа основаны на технологии пассивных оптических сетей (PON-Passive Optical Network), где активное оборудование присутствует только на оконечных пунктах передачи или приема [3].

Для сетей доступа, в которых количество пользователей, скорость передачи и набор предоставляемых мультисервисных услуг интенсивно растут, применение технологии когерентного приема в приемной части пользовательского оборудования на сегодняшний день экономически невыгодно, так как использование более сложного оборудования приводит к удорожанию всей сети. Для дальнейшего развития сетей доступа и повышения их пропускной способности альтернативой когерентному приему может стать применение прямого фотодетектирования на приемной стороне совместно с использованием широкополосной аппаратуры в диапазоне радиочастот (РЧ) и СВЧ. Кроме этого, возможность формирования поднесущих каналов разного формата модуляции, отсутствие каких-либо протоколов и схем синхронизации позволит операторам беспроводных сетей «доставлять» сигналы в диапазоне РЧ и СВЧ (без преобразования) на базовые станции или непосредственно к мобильному терминалу абонента. Поднесущие каналы могут формироваться с помощью разных цифровых методов модуляции, например: фазовой манипуляции или бинарной фазовой модуляции (Binary Phase-Shift Keying – BPSK), амплитудно-импульсной модуляции (Amplitude-Shift Keying – ASK), квадратурно-фазо-

вой модуляции (Quadrature Phase-Shift Keying – QPSK), квадратурно-амплитудной модуляции (Quadrature Amplitude Modulation – QAM) разного уровня.

Существует два способа формирования многоканального сигнала для передачи по оптическому волокну. В первом случае в диапазонах СВЧ и РЧ формируется групповой многоканальный сигнал с использованием частотного мультиплексирования каналов – FDM (Frequency Division Multiplexing) с последующим «переносом» в оптический диапазон с помощью модуляции оптической несущей [4]. Для эффективного использования оптического спектра, концентрации энергии в поднесущих каналах и для уменьшения шумов используется оптическая однополосная модуляция лазерного излучения [4, 5]. Частотный интервал между поднесущими каналами выбирается из условия безошибочного выделения на приемной стороне канальных сигналов, что реализуется методом фильтрации (демодуляции).

Возможно также использование технологии мультиплексирования ортогональных (Orthogonal) поднесущих каналов. В этом случае частотные полосы поднесущих каналов взаимно перекрываются, что позволяет уменьшить, по сравнению с методом фильтрации каналов, как минимум в два раза величину частотного интервала между поднесущими каналами и увеличить количество поднесущих каналов. Данная технология реализована на хорошо разработанных аппаратно-программных методах цифровой обработки сигналов. Она положительно зарекомендовала себя в проводных (xDSL – Digital Subscriber Line) и беспроводных системах передачи. В этой технологии частотный диапазон разбивается между поднесущими каналами, количество которых может достигать тысячи [6].

Во втором случае формирование группового многоканального сигнала происходит в оптическом диапазоне с помощью объединения сигналов от разных оптических поднесущих каналов. Оптические поднесущие могут генерироваться от одного лазерного источника излучения и далее модулироваться информационными сигналами [7, 8]. Такой способ

мультиплексирования часто называют оптическим частотным разделением каналов (Optical FDM). Здесь также возможно применение технологии мультиплексирования ортогональных оптических поднесущих каналов, что является перспективой в оптических сетях [8].

Так как для формирования группового многоканального сигнала используется частотное разделение каналов, для упрощения описания обозначим такую систему ВОСП-FDM. Для увеличения пропускной способности ВОСП-FDM необходимо увеличивать количество поднесущих каналов при требуемом частотном интервале между поднесущими. Однако увеличение количества каналов, следовательно, и уровня мощности оптического сигнала приводит к появлению нелинейных явлений в оптическом волокне. Из-за относительно малого уровня оптической мощности, приходящейся на один поднесущий канал, а также достаточно близкого размещения в спектре поднесущих каналов в ВОСП-FDM основным нелинейным источником помех является четырехволновое смешение (ЧВС, англ. FWM – Four Wave Mixing), возникающее в оптическом волокне [9]. Для компенсации потерь группового многоканального сигнала, распространяющегося по оптическому волокну, на передающей стороне используются оптические усилители, однако их шумовые характеристики также влияют на качество передачи сигнала.

В данной работе приводится оценка влияния шума усилителя и явления четырехволнового смешения на качество передачи поднесущих каналов. Показателем качества сигнала принят Q-фактор. Целью работы является определение максимального количества поднесущих каналов ВОСП-FDM при использовании прямого фотодетектирования на приемной стороне при заданном Q-факторе.

Описание ВОСП-FDM

Структурная схема ВОСП-FDM представлена на рис. 1. В передающей части системы показано формирование многоканального сигнала в предположении, что оптические частоты $f_0 + f_i$ уже сгенерированы аппаратурой передачи [7, 8], где f_0 – центральная частота излучения лазера, а f_i – центральные частоты поднесущих каналов i ($i=1,2,3...N$). В данной работе предполагается равномерное размещение в спектре поднесущих каналов с частотным интервалом $|f_i - f_{i-1}| = \Delta f$. Информационные сигналы S_i поступают на соответствующие модуляторы (Mod), на другие входы которых поданы поднесущие частоты $f_0 + f_i$. На выходах модуляторов можно получать оптические сигналы разных форматов модуляции [4, 5].

В данной работе предполагаем, что все поднесущие каналы имеют одинаковый формат модуляции. После мультиплексирования (MUX) оптических поднесущих каналов окончательно формируется многоканальный оптический сигнал, который

поступает на оптический усилитель (ОУ). В настоящее время коммерчески доступны и широко используются эрбиевые оптические усилители (Erbium-Doped Fiber Amplifier – EDFA). Усиленный оптический сигнал вводится в оптическое волокно и распространяется на расстояние L , на котором находится приемная аппаратура. После фотодетектирования (ФД) происходит демодуляция (Demod) сигналов поднесущих каналов.

Целью работы является исследование Q-фактора в поднесущих каналах после фотодетектора и определение максимально возможного количества каналов при заданных требованиях к системе передачи. Отметим, что для обеспечения вероятности ошибки (BER – Bit Error Rate) менее 10^{-12} величина Q-фактора должна превышать 17 дБ. Это справедливо при предположении, что в аппаратуре ВОСП-FDM не применяется прямая или упреждающая коррекция ошибок FEC (Forward Error-Correction Coding) [10, 11].

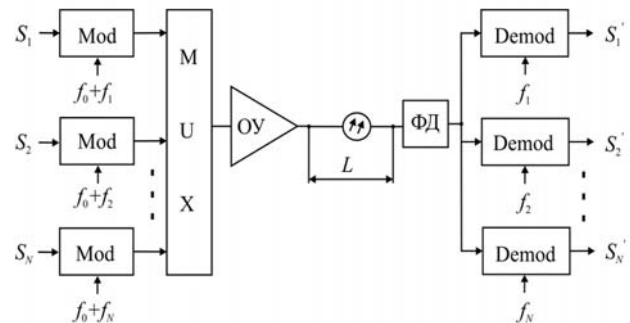


Рис. 1. Структурная схема волоконно-оптической системы передачи с частотным разделением каналов и прямым фотодетектированием

Расчетная часть

На приемной стороне при фотодетектировании спонтанный шум ОУ, достигший приемной стороны, смешивается с полезным сигналом, и на выходе ФД появляется так называемый шум усиленной спонтанной эмиссии «ASE» (Amplified Spontaneous Emission). Следовательно, качество сигнала поднесущего канала на приеме из-за влияния шума усиленной спонтанной эмиссии определяется [12]

$$Q_{ASE} = \frac{\sqrt{P(\Delta u_n)_{\min}}}{2N\sqrt{h(f_0 + f_i)\Delta f}}, \quad (1)$$

где P – средняя оптическая мощность на входе оптического волокна; N – количество поднесущих каналов; h – постоянная Планка; $f_0 + f_i \approx f_0$ – оптическая частота сигнала; F – коэффициент шума ОУ (при расчетах принят $F = 6$ дБ); $(\Delta u_n)_{\min}$ – минимальное расстояние между символами информационных данных (таблица).

Соотношение (1) справедливо, если частотный интервал между поднесущими каналами совпадает с частотной полосой поднесущего канала (наихудший случай), что соответствует передаче ортогональных поднесущих. При использовании неортогональных

поднесущих каналов (1) переоценивает влияние усиленного спонтанного шума почти на 1,5 дБ. Как видно из (1), увеличение частотного интервала между поднесущими Δf и количества каналов N уменьшают Q_{ASE} .

Нормированные минимальные расстояния между символами

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

В качестве наглядных примеров на рис. 2 показано семейство кривых, соответствующих зависимостям Q_{ASE} от Δf для поднесущих каналов с форматом модуляции QPSK при уровне мощности $P = +10$ дБм на входе стандартного одномодового оптического волокна (SSMF – Standard Single Mode Fiber) длиной $L = 20$ км и при разном количестве каналов ($N = 131, 353, 1114$).

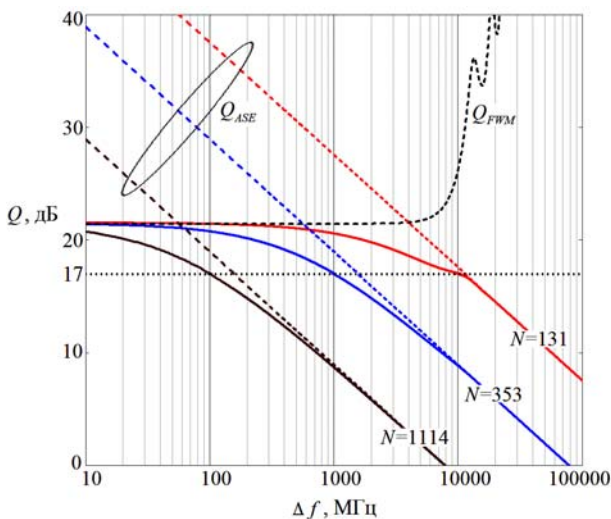


Рис. 2. Зависимость Q-фактора от частотного интервала между поднесущими каналами формата QPSK при разном количестве каналов, при $P = +10$ дБм, $L = 20$ км, волокно SSMF

Как видно из рис. 2, для передачи $N \geq 131$ поднесущих каналов необходимо выбрать частотный интервал $\Delta f \leq 10$ ГГц. Следовательно, усиленный спонтанный шум является ограничивающим фактором для выбора частотного интервала между поднесущими. С другой стороны, как видно из (1), увеличение мощности на входе волокна уменьшает влияние усиленного спонтанного шума и улучшает качество передачи сигналов. Однако увеличение уровня суммарной мощности в оптическом волокне приводит к появлению нелинейного явления – ЧВС между каналами. Данное явление ограничивает максималь-

ную канальную мощность, тем самым ограничивая пропускную способность системы в целом.

Для оценки влияния ЧВС на качество передачи сигнала воспользуемся Q-фактором. При однополосной модуляции оптической несущей групповым многоканальным сигналом вся оптическая мощность делится между несущей и поднесущими каналами. Если предположить, что 50% оптической мощности сконцентрировано в несущей [4], то уровень мощности в одном поднесущем канале составит $\sim P/2N$. Таким образом, для одного поднесущего канала Q-фактор из-за влияния ЧВС определяется как

$$Q_{FWM} = \left(\frac{P/2N}{P_{FWM}} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где P_{FWM} – суммарная мощность комбинационных частот, попадающих в канал [13].

Следовательно,

$$Q_{FWM} = \left(\frac{(P/2N)\exp(-\alpha L)}{(P_{ijk}N_{FWM})(f_i+f_j-f_k) + (P_{ijk}N_{FWM})(2f_i-f_k)} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

где $(P_{ijk}N_{FWM})(f_i+f_j-f_k)$ и $(P_{ijk}N_{FWM})(2f_i-f_k)$ – произведение уровня мощности комбинационных частотных продуктов P_{ijk} вида $f_i+f_j-f_k$ и $2f_i-f_k$ и числа этих продуктов N_{FWM} , попадающих в заданный поднесущий канал [14], где $i, j, k = 1 \dots N$, α – коэффициент затухания оптического волокна. Анализ в [14] показывает, что в наилучшем состоянии оказывается канал в середине спектра группового сигнала, куда попадает больше продуктов ЧВС, чем в другие каналы. Следовательно, если для этого канала обеспечить требуемое качество, то для других каналов оно будет гарантировано.

На рис. 2 в качестве примера приводится зависимость Q_{FWM} от Δf для поднесущего канала с форматом модуляции QPSK, находящегося в середине спектральной полосы при уровне мощности +10 дБм на входе SSMF волокна длиной $L = 20$ км. Отметим сильную зависимость Q_{FWM} от уровня оптической мощности в относительно низкочастотной области интервала частот Δf . При маленьких частотных интервалах между поднесущими каналами в оптическом волокне возникают сильные четырехволновые взаимодействия между каналами. При $\Delta f > 20$ ГГц явление ЧВС резко ослабляется и имеет осциллирующий характер.

Так как усиленный спонтанный шум и ЧВС – явления, возникающие независимо друг от друга, то их совместное влияние можно оценить:

$$1/Q = 1/Q_{ASE} + 1/Q_{FWM}. \quad (4)$$

На рис. 2 показаны результирующие кривые (сплошная линия), описывающие зависимость сум-

марного Q-фактора от частотного интервала между поднесущими QPSK формата. Как видно из рис. 2, для обеспечения $Q \geq 17$ дБ и при уровне оптического сигнала +10 дБм на входе волокна на расстояние 20 км (что соответствует эффективной длине SSMF волокна) можно передать не более 1114 поднесущих каналов с частотным интервалом $\Delta f = 100$ МГц или 353 каналов с $\Delta f = 1$ ГГц, или 131 канал с $\Delta f = 10$ ГГц.

Чтобы оценить максимально возможное количество поднесущих каналов в зависимости от уровня оптической мощности, на входе волокна необходимо решить (4), используя (1) и (3). Были проведены численные расчеты (4) при заданных величинах $Q = 17$ дБ, $L = 20$ км для разных канальных форматов модуляции. Для расчетов брались параметры SSMF волокна в спектральном диапазоне «С» и три значения частотного интервала $\Delta f = 100$ МГц, 1 ГГц, 10 ГГц.

На рис. 3 показаны расчетные значения количества поднесущих каналов формата QPSK в зависимости от уровня входной оптической мощности в волокне при разных частотных интервалах между каналами (метками показаны полученные результаты). Как видим, при относительно малых величинах оптической мощности основным сдерживающим фактором является усиленный спонтанный шум, и для увеличения количества каналов придется увеличивать оптическую мощность на передающей стороне. Однако при уровнях оптической мощности более +10 дБм появляются нелинейные искажения из-за ЧВС, приводящие к резкому ухудшению характеристик системы, а при дальнейшем увеличении оптической мощности – к невозможности передачи канальных сигналов из-за ЧВС. Следовательно, уровень канальной мощности ограничивается сверху максимальным значением, определяемым помехами от ЧВС.

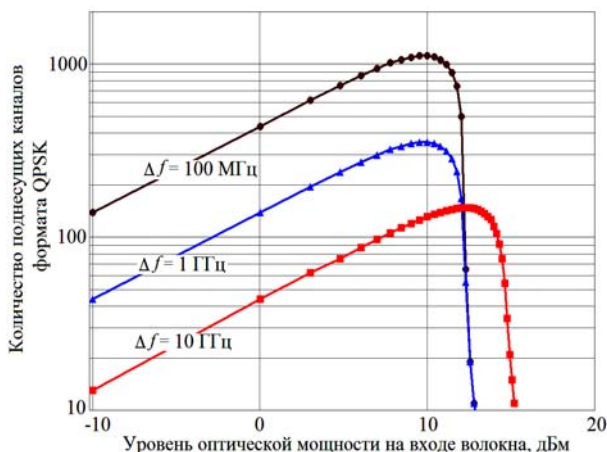


Рис. 3. Зависимость количества поднесущих каналов формата QPSK от уровня оптической мощности на входе SSMF волокна при заданных величинах $Q = 17$ дБ, $L = 20$ км

На рис. 4 в виде диаграммы представлены расчетные значения максимального количества подне-

сущих канальных сигналов разных форматов модуляции BPSK, ASK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM с разными частотными интервалами: $\Delta f = 100$ МГц, 1 ГГц, 10 ГГц. Как видим, наибольшее количество канальных сигналов можно передать с помощью канального формата модуляции BPSK, а наименьшее – с 256-QAM. Однако на практике может возникнуть необходимость обеспечения максимальной канальной пропускной способности и спектральной эффективности, а не увеличения количества каналов. В этом случае необходимо рассматривать разновидности формата модуляции QAM или QPSK. Дальнейшее увеличение пропускной способности ВОСП-FDM возможно при применении методов прямой или упреждающей коррекции ошибок.

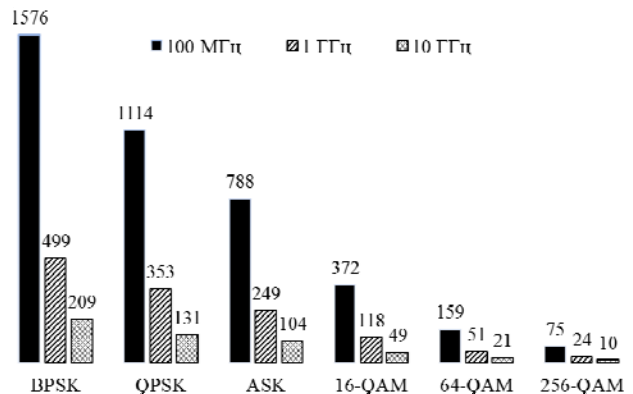


Рис. 4. Максимальное количество поднесущих каналов в зависимости от используемого формата модуляции при разных частотных интервалах между каналами

Заключение

Рассматривалась волоконно-оптическая система передачи с прямым фотодетектированием на приемной стороне. Передаваемый по оптическому волокну групповой многоканальный сигнал состоял из частотно-мультиплексированных поднесущих каналов. Исследовались влияния усиленного спонтанного шума усилителя и четырехволнового смешения на качество передачи сигналов. Наиболее вредными оказываются помехи, возникающие в оптическом волокне из-за явления четырехволнового смешения. Показано, что они ограничивают максимальный уровень канальной мощности, а также количество каналов в системе. Приводятся результаты расчета максимального количества поднесущих каналов в зависимости от канального формата модуляции. В системах передачи с канальными форматами модуляции BPSK, ASK, QPSK существует возможность организации сотен и даже тысяч каналов. При использовании многоуровневого формата модуляции QAM количество каналов не превышает нескольких сотен, однако при этом увеличивается спектральная эффективность. Расчеты показывают, что при частотных интервалах между поднесущими менее 10 ГГц ограничивающим фактором пропускной способности является четырехволновое смешение, возникающее в оптическом волокне. Увеличение частотного интервала между каналами уменьшает максимальное количество поднесущих каналов, при

этом увеличивается влияние усиленного спонтанного шума оптического усилителя.

Полученные результаты полезны при проектировании волоконно-оптических систем передачи с частотным разделением поднесущих каналов разного формата модуляции и доказывают необходимость учета шумов оптических усилителей и возникающих в оптическом волокне нелинейных явлений, в частности явления четырехволнового смешения.

Литература

1. Леонов А. Развитие скоростных DWDM-систем по нескольким поднесущим / А. Леонов, М. Слепцов, В. Трещиков // Первая миля. – 2016. – № 2. – С. 42–48.
2. Lowery A. J. Optical orthogonal division multiplexing for long haul optical communications: A review of the first five years / A.J. Lowery, L.B. Du // Optical Fiber Technology. – 2011. – Vol. 17, № 5. – PP. 421–438.
3. ITU-T Recommendation G.984.1. https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.984.1-200803-I!!PDF-E&type=items
4. Hui R. Subcarrier Multiplexing for High-Speed Optical Transmission / R. Hui, B. Zhu, R. Huang et al. // Journal of Lightwave Technology. – 2002. – Vol. 20, № 3. – PP. 417–427.
5. Smith G.H. Overcoming chromatic dispersion effects in fiber-wireless systems incorporating external modulators / G.H. Smith, D. Novak, Z. Ahmed // IEEE Trans. Microwave Technol. – 1997. – Vol. 45, August. – PP. 1410–1415.
6. Armstrong J. OFDM for Optical Communications // IEEE Journal of Lightwave Technology. – 2009. – Vol. 27, № 3, February. – PP. 189–204.
7. Pataca D.M. Transmission of 1.12 Tb/s superchannel over 452 km fiber / C.L.H. Hecker, C.B.F. Adami, F.D. Simoes, M. Rocha, C.R.F. Oliveira // Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications. – 2013. – Vol. 12, № 2, December. – PP. 524–532.
8. Ma Y. 1-Tb/s single-channel coherent optical OFDM transmission over 600-km SSMF fiber with subwavelength bandwidth access / Y. Ma, Q. Yang, Y. Tang, S. Chen, W. Shieh // Optics Express. – 2009. – Vol. 17, № 11. – PP. 9421–9427.
9. Shneider T. Nonlinear Optic in Telecommunications. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2004. – 415 p.
10. Листвин В.Н. DWDM системы / В.Н. Листвин, В.Н. Трещиков. – М.: Изд. дом «Наука», 2013. – 300 с.
11. ITU-T Recommendation Series G, Supplement 39 (02/2016). https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.Sup39-201209-S!!PDF-E&type=items
12. Варданыан В.А. Оценка количества спектральных и поднесущих каналов в волоконно-оптических сетях доступа при однополосной оптической модуляции // Автотриетрия. – 2016. – Т. 52, № 3. – С. 116–124.
13. Варданыан В.А. Влияние помех от четырехволнового смешения на спектрально разделенные каналы в пассивных оптических сетях доступа // Автотриетрия. – 2017. – Т. 53, № 1. – С. 63–72.
14. Варданыан В. А. Исследование распределения продуктов четырехволнового смешивания в ВОСП с ЧРК // Вестник СибГУТИ. – 2016. – № 2. – С. 78–84.

Варданыан Вардгес Андраникович

Канд. техн. наук, доцент каф. многоканальной электросвязи и оптических систем
Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ)
Тел.: +7-913-475-05-47
Эл. почта: vardgesvardanyan@mail.ru

Vardanyan V.A.

Estimating the number of subcarrier channels in fiber optic transmission systems with direct photodetection

The performance of a fiber-optic transmission system using subcarrier multiplexing with various modulation formats is investigated. Nonlinear crosstalk of four-wave mixing and optical amplifier spontaneous emission noise influence on Q-factor is considered.

Keywords: fiber-optics, frequency division multiplexing, subcarrier multiplexing, four-wave mixing, FDM, OFDM, SCM, FWM.