

УДК 621.391.6

ВЛИЯНИЕ ПОМЕХ ОТ ЧЕТЫРЁХВОЛНОВОГО СМЕШЕНИЯ НА СПЕКТРАЛЬНО РАЗДЕЛЁННЫЕ КАНАЛЫ В ПАССИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СЕТЯХ ДОСТУПА

В. А. Варданян

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

Исследовано явление четырёхволнового смешения, возникающее в пассивных оптических сетях со спектральным уплотнением каналов. Приведены результаты моделирования распределения комбинационных частот по спектру в зависимости от количества и частотного интервала между каналами. Для подавления перекрёстных помех между каналами на комбинационных частотах предложено разбить диапазон на две полосы и подобрать защитный интервал между ними. Рассмотрено влияние комбинационных частот на качество передачи сигналов в зависимости от уровня мощности в каналах, частотного интервала и длины передачи.

Ключевые слова: пассивные оптические сети (WDM-PON), плотное спектральное уплотнение (DWDM), четырёхволновое смешение (FWM).

DOI: 10.15372/AUT20170108

Введение. В настоящее время происходит активное внедрение пассивных оптических сетей доступа (xPON — Passive Optical Network) в телекоммуникации. Существующие и создаваемые широкополосные сети xPON стандартизованы и должны обеспечивать абонентов скоростями до 10 Гбит/с в нисходящем и $\sim 2,5$ Гбит/с в восходящем направлениях [1]. За нисходящее (DS — Downstream) принимается направление от станционного оборудования (OLT — Optical Line Terminal) до абонентского устройства (ONT — Optical Network Terminal), а за восходящее (US — Upstream) — от ONT до OLT. Гарантированная скорость широкополосной услуги, предоставляемой абоненту, — один из важных критериев привлечения клиентов. При растущем спросе на мультисервисные широкополосные услуги для абонентов возникает необходимость дальнейшего увеличения пропускной способности существующей сети по возможности с малыми затратами. Перспективной является технология спектрального уплотнения (WDM) каналов, где спектральные каналы находятся на расстоянии $\Delta\lambda$ друг от друга по шкале длин волн. Такие пассивные сети доступа называются WDM-PON. Эквивалентный частотный интервал между каналами Δf регламентируется стандартом ITU-T G.694.1 и может составлять 100, 50, 25, 12,5 ГГц [2]. Внедрение технологии WDM в пассивные сети возможно как поэтапно при реконструкции существующих сетей, так и при организации новых, что позволит увеличить радиус сети доступа.

В общем случае в сетях WDM-PON для обеспечения двусторонней связи с n абонентами присутствует участок сети, состоящий из оптических мультиплексоров/демультиплексоров (MUX/DMUX) (рис. 1), в качестве которых используются упорядоченные волноводные решётки. Эти устройства широко применяются в современных волоконно-оптических системах передачи данных, выпускаются в виде готовых модулей, имеют большую плотность размещения каналов в определённом окне прозрачности оптического волокна, отличаются малыми потерями и габаритами [3–5]. Необходимо отметить, что для ор-

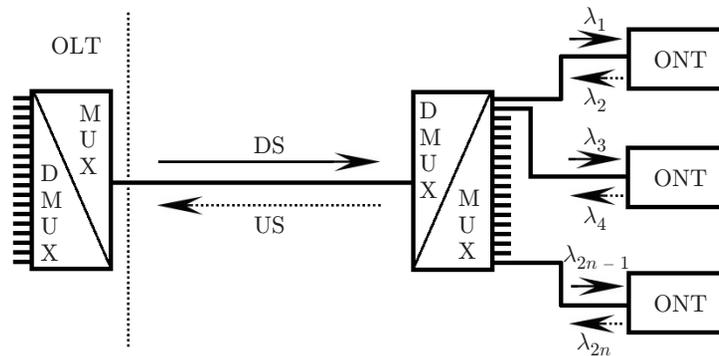


Рис. 1. Участок сети WDM-PON

организации двусторонней связи возможны разные технические решения. Например, каждое абонентское устройство может передавать и принимать данные на разных длинах волн, как показано на рис. 1. Тогда количество длин волн в 2 раза превысит количество абонентских устройств (рис. 2, *a*). Возникают ситуации, когда целесообразно генерировать оптические несущие (длины волн) на стороне OLT и передавать их абонентским устройствам, где после модуляционных схем (в частности, с помощью отражательных полупроводниковых усилителей-ремодуляторов [6–8]) на этих несущих будут сформированы восходящие каналы. Двустороннюю связь с конкретным абонентом можно реализовать и на одной длине волны, используя технологию уплотнения поднесущих каналов в сверхвысокочастотном или радиочастотном диапазоне [9]. В данном случае одна часть поднесущих каналов будет применяться для DS-направления, а другая — для US-направления и суммарное количество длин волн уменьшится (сколько абонентов — столько длин волн). Рассмотрим также способ, когда для разделения спектральных каналов DS- и US-направлений используются разные оптические диапазоны, в которых равномерно размещены каналы (рис. 2, *b*). Для упрощения реализации двусторонней связи по одному волокну между диапазонами предусматривается защитная полоса $\Delta\lambda_g$. Чем она больше, тем технически легче разделить спектральные диапазоны, например, с помощью циркуляторов и/или оптических фильтров.

Повышение пропускной способности сети WDM-PON достигается увеличением количества спектральных каналов и/или уменьшением частотного интервала между ними, что приводит к росту суммарной оптической мощности в оптическом волокне, из-за чего возникают нелинейные явления в оптическом волокне. Одно из них — четырёхволновое смешение (ЧВС), которое образуется вследствие нелинейной восприимчивости третьего порядка

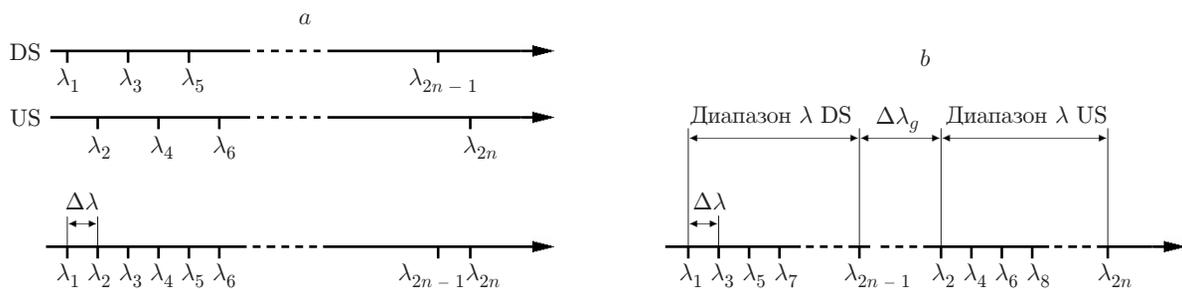


Рис. 2. Два способа размещения оптических каналов в спектре: *a* — соседние длины волн выделены определённым ONT; *b* — DS- и US-направления спектрально разнесены (нечётные каналы предназначены для DS-направления, а чётные — для US-направления)

оптического волокна. Нелинейное взаимодействие между соседними каналами обуславливает появление комбинационных длин волн или спектральных компонент. Некоторые из них попадают в диапазоны длин волн каналов, что приводит к перекрёстным помехам между каналами и к ухудшению отношения сигнал/шум на приёмной стороне. Существуют разные методы подавления комбинационных частот: управление дисперсионными характеристиками оптического волокна; технология совместного использования временного мультиплексирования и WDM; кодовое мультиплексирование каналов; применение определённых форматов модуляции в каналах; использование неравномерного спектрального размещения каналов [10–12], при котором для подавления помех от ЧВС применяются минимизирующие алгоритмы [13, 14].

В сетях WDM-PON предпочтительнее использовать технически простые и экономически выгодные решения для подавления помех от ЧВС. В данной работе рассматриваются два типа реализации сетей WDM-PON: однодиапазонный с равномерным частотным интервалом между каналами (см. рис. 2, *a*) и двухдиапазонный с равномерным частотным интервалом между каналами внутри диапазонов и защитной полосой между диапазонами (см. рис. 2, *b*). Во втором случае, подбирая ширину защитной полосы, можно добиться подавления перекрёстных помех между каналами на комбинационных частотах. Качество передачи сигнала в сетях WDM-PON оценивается по Q -фактору [15].

Цель данной работы — исследование влияния на величину Q -фактора комбинационных частот ЧВС в зависимости от уровня оптической мощности в каналах и дальности передачи по оптическому волокну при равномерном размещении спектральных каналов, а также возможности подавления помех от ЧВС с использованием защитной полосы между спектральными диапазонами.

Результаты моделирования распределения комбинационных частот. Для сети WDM-PON, где каналы равномерно размещены в одном спектральном диапазоне (см. рис. 2, *a*), нежелательными являются комбинационные частоты третьего порядка первого рода, которые описываются в частотном диапазоне выражениями $f_i + f_j - f_k$, $2f_i - f_k$, где f_i, f_j, f_k — центральные частоты (несущие) каналов. Для n -канальной системы индексы i, j, k принимают любые значения от 1 до n , что приводит к генерации $(n^3 - n^2)/2$ комбинационных частот. Однако не все эти комбинационные частоты попадают в спектральный диапазон многоканального сигнала, более того, в диапазон одного канала. Заметим, что не все сочетания индексов i, j, k комбинированных частот классифицируются как ЧВС. Так, например, при $i = j = k$ имеем явление фазовой самомодуляции, а при $i, j = k$ — явление фазовой кроссмодуляции [16]. Далее будет вестись учёт только комбинационных частот ЧВС. Для оценки распределения по частотной области всех комбинационных частот, возникающих не только в диапазоне канала, но и вне его, была реализована программа на объектно-ориентированном языке Delphi.

На рис. 3 приведены результаты моделирования распределения комбинационных частот $f_i + f_j - f_k$ и $2f_i - f_k$ для количества каналов $M = 32$. Как показывает анализ [17], с увеличением числа каналов распределение комбинационных частот вида $f_i + f_j - f_k$ приобретает функциональную зависимость, близкую к гауссовскому распределению, более того, количество комбинационных частот резко возрастает и их максимальная концентрация наблюдается в середине диапазона размещения каналов. Как видно из рисунка, спектр комбинационных частот вида $2f_i - f_k$ имеет форму трапеции: равномерно распределяется в частотном диапазоне каналов и линейно уменьшается вне диапазона передачи сигналов. Количество комбинационных частот вида $2f_i - f_k$ намного меньше количества комбинационных частот вида $f_i + f_j - f_k$. Основные результаты моделирования при $M = 8, 16, 32, 64, 128$ представлены в таблице (однодиапазонный случай), где $N_{(f_i + f_j - f_k)}$ — максимальное количество комбинационных частот вида $f_i + f_j - f_k$, а $N_{(2f_i - f_k)}$ — количество комбинаци-

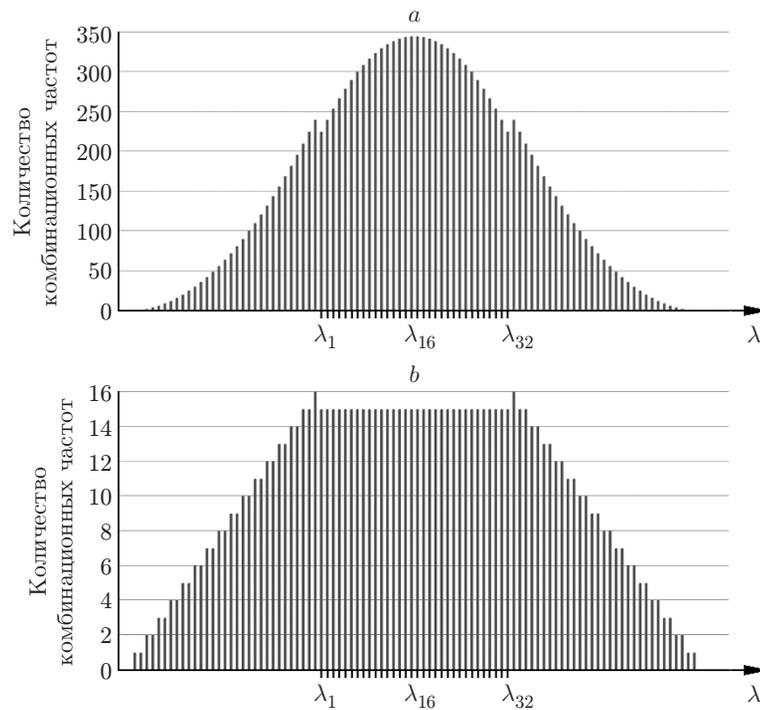


Рис. 3. Пример спектрального распределения комбинационных частот при равномерном размещении 32 каналов по спектру: $f_i + f_j - f_k$ (a) и $2f_i - f_k$ (b)

**Максимальное количество комбинационных частот,
попадающих в один канал при разном числе каналов M**

| Тип WDM-PON | | $M = 8$ | | $M = 16$ | |
|-----------------|--|-------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------|
| | | $N_{(f_i + f_j - f_k)}$ | $N_{(2f_i - f_k)}$ | $N_{(f_i + f_j - f_k)}$ | $N_{(2f_i - f_k)}$ |
| Однодиапазонный | Δf | 15 | 3 | 77 | 7 |
| | $\Delta f_g = 2\Delta f$ | 11 | 2 | 67 | 6 |
| Двухдиапазонный | $\Delta f_g = n\Delta f,$ $n = M/2$ | 10 | 1 | 55 | 3 |

| Тип WDM-PON | | $M = 32$ | | $M = 64$ | | $M = 128$ | |
|-----------------|--|-------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------|
| | | $N_{(f_i + f_j - f_k)}$ | $N_{(2f_i - f_k)}$ | $N_{(f_i + f_j - f_k)}$ | $N_{(2f_i - f_k)}$ | $N_{(f_i + f_j - f_k)}$ | $N_{(2f_i - f_k)}$ |
| Однодиапазонный | Δf | 345 | 15 | 1457 | 31 | 5985 | 63 |
| | $\Delta f_g = 2\Delta f$ | 323 | 14 | 1411 | 30 | 5891 | 62 |
| Двухдиапазонный | $\Delta f_g = n\Delta f,$ $n = M/2$ | 253 | 7 | 1082 | 15 | 4465 | 31 |

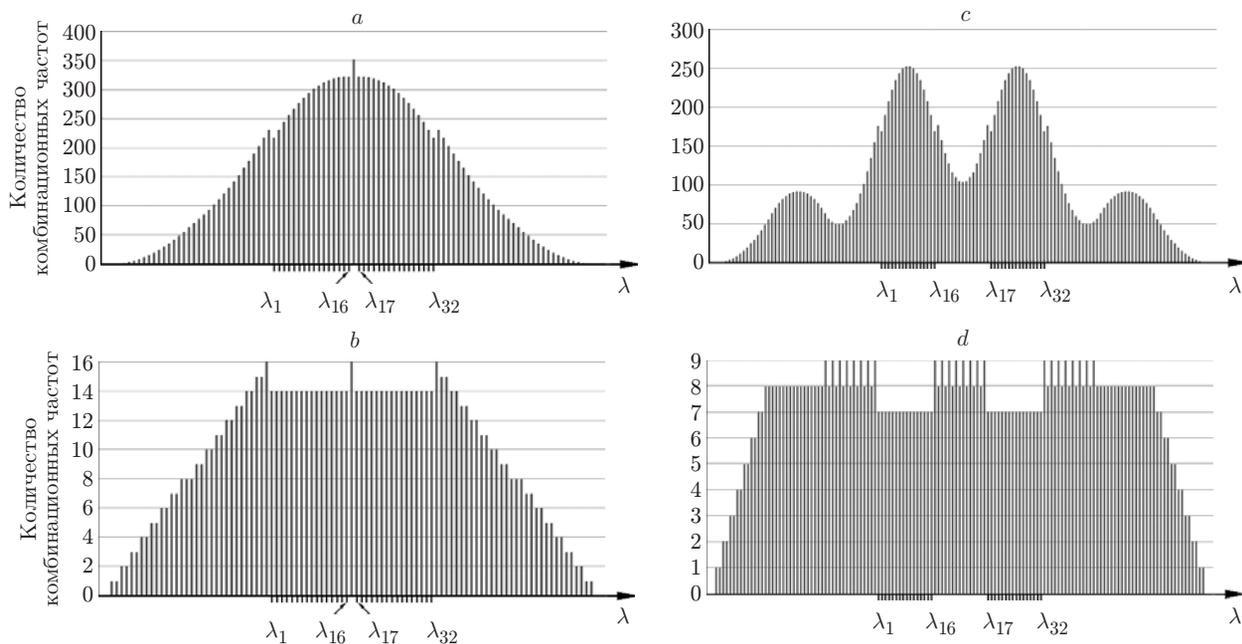


Рис. 4. Пример спектрального распределения комбинационных частот при размещении 32 каналов в двух диапазонах: при $\Delta\lambda_g = 2\Delta\lambda$ (a, b) и $\Delta\lambda_g = 16\Delta\lambda$ (c, d) для $f_i + f_j - f_k$ (a, c) и $2f_i - f_k$ (b, d)

онных частот вида $2f_i - f_k$, попадающих в канал, находящийся в наихудшем состоянии (для однодиапазонной системы — это канал в середине диапазона).

Рассмотрим случай, когда в сети WDM-PON используются два спектральных диапазона: для DS-направления и US-направления при условии, что каналы равномерно размещены в этих диапазонах и их количество идентично. (Спектральное распределение каналов показано на рис. 2, b.) Между диапазонами предусмотрена защитная полоса $\Delta\lambda_g$, величину которой в частотной области обозначим Δf_g . На рис. 4 представлены результаты моделирования распределения комбинационных частот $f_i + f_j - f_k$ и $2f_i - f_k$ с общим количеством каналов $M = 32$ при двух значениях ширины защитной полосы $\Delta f_g = 2\Delta f$ и $\Delta f_g = n\Delta f$, где $n = 16$ — количество дуплексных каналов. Как видно из рис. 4, a, b, для $\Delta f_g = 2\Delta f$ имеем почти аналогичное однодиапазонному случаю распределение комбинационных частот (см. рис. 3), при этом их количество максимально в середине защитной полосы и незначительно уменьшается в частотных диапазонах каналов.

При $\Delta f_g = n\Delta f$ спектральное распределение принимает многопиковую форму (рис. 4, c, d). Приведено распределение комбинационных частот при $\Delta f_g = n\Delta f$ ($n = 16$). Анализ показывает, что чем больше ширина защитной полосы между диапазонами, тем нагляднее многопиковое частотное распределение комбинационных частот вследствие расширения спектра и уменьшения количества этих частот, попадающих в каналы. В случае $\Delta f_g = n\Delta f$ имеем многопиковое распределение комбинационных частот, максимумы которых находятся в середине частотных диапазонов каналов (в середине защитной полосы наблюдается их минимальное количество). Из результатов моделирования следует, что в случае $\Delta f_g = 2n\Delta f$ в середине защитной полосы отсутствуют комбинационные частоты.

На рис. 5 приведены зависимости нормированного максимального количества комбинационных частот от ширины защитной полосы $\Delta f_g = l\Delta f$, где l — целое число. Как видно из рисунка, начиная с ширины защитной полосы $\Delta f_g \geq (n/2)\Delta f$ ($l \geq n/2$, $n = M/2$), количество частот в каналах стабилизируется и почти не меняется. Следовательно, для

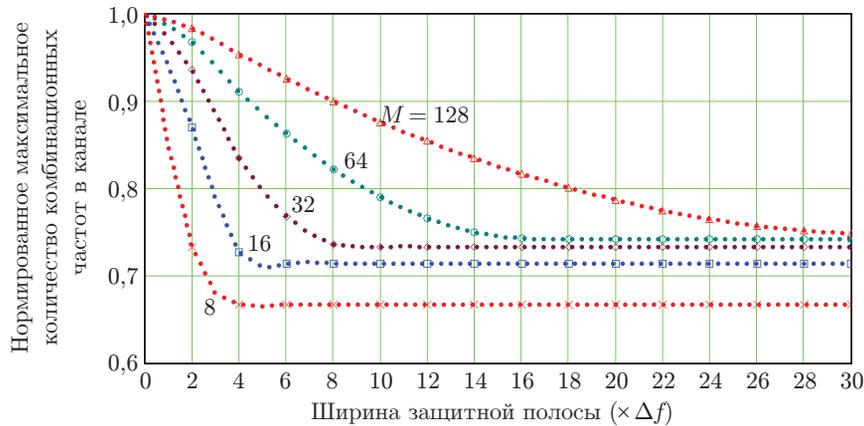


Рис. 5. Зависимости нормированного количества комбинационных частот от ширины защитной полосы между диапазонами

уменьшения количества комбинационных частот, оказавшихся в каналах, достаточно удерживать ширину защитной полосы не менее величины, эквивалентной половине частотного диапазона DS- или US-направления. Например, при WDM-PON с 32 каналами, где 16 каналов передаются в DS-направлении и 16 каналов — в US-направлении, ширина защитной полосы может принимать значение не менее ширины полосы размещения 8 каналов. Дальнейшее увеличение ширины защитной полосы не будет уменьшать количество комбинационных частот, попадающих в каналы.

В таблице приводятся максимальные значения комбинационных частот $f_i + f_j - f_k$ и $2f_i - f_k$ при разном числе каналов ($M = 8, 16, 32, 64, 128$) и при значениях защитной полосы $\Delta f_g = 2\Delta f$, $\Delta f_g = n\Delta f$. Количество комбинационных частот при $\Delta f < \Delta f_g < n\Delta f$ находится между значениями, указанными в таблице.

Оценка влияния ЧВС на качество передачи в WDM-PON. Для оценки влияния четырёхволнового смещения на качество передачи сигнала воспользуемся Q -фактором. В нашем случае для i канала Q -фактор определяется как $Q = (P_i/P_{\text{ЧВС}})^{1/2}$, где P_i — средний уровень мощности в канале, $P_{\text{ЧВС}}$ — суммарная мощность комбинационных частот, попадающих в канал. Отметим, что для достижения вероятности появления ошибки менее 10^{-12} необходимая величина Q -фактора должна превышать 17 дБ. Это справедливо при предположении, что в аппаратуре WDM-PON не применяется прямая или упреждающая коррекция ошибок.

На расстоянии L от начала ввода группового многоканального сигнала в оптическое волокно мощность комбинационных частот определяется выражением [18]

$$P_{ijk}(L, d) = \eta_{ijk} \left(\frac{d}{3} \gamma L_{\text{эф}} \right)^2 P_i P_j P_k \exp(-\alpha L). \quad (1)$$

Здесь η_{ijk} — эффективность генерации комбинационных частот; d — коэффициент вырождения ($d = 3$ при $i = j$, $d = 6$ при $i \neq j$); γ — нелинейный коэффициент оптического волокна; $L_{\text{эф}} = (1 - \exp(-\alpha L))/\alpha$ — эффективная длина; α — коэффициент затухания кабеля (1/км).

Эффективность зависит от фазового рассогласования $\Delta\beta = \beta_{ijk} + \beta_k - \beta_i - \beta_j$ между передаваемыми каналами [18]:

$$\eta_{ijk} = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta\beta^2} \left[1 + \frac{4 \exp(-\alpha L) \sin^2(\Delta\beta L/2)}{(1 - \exp(-\alpha L))^2} \right]. \quad (2)$$

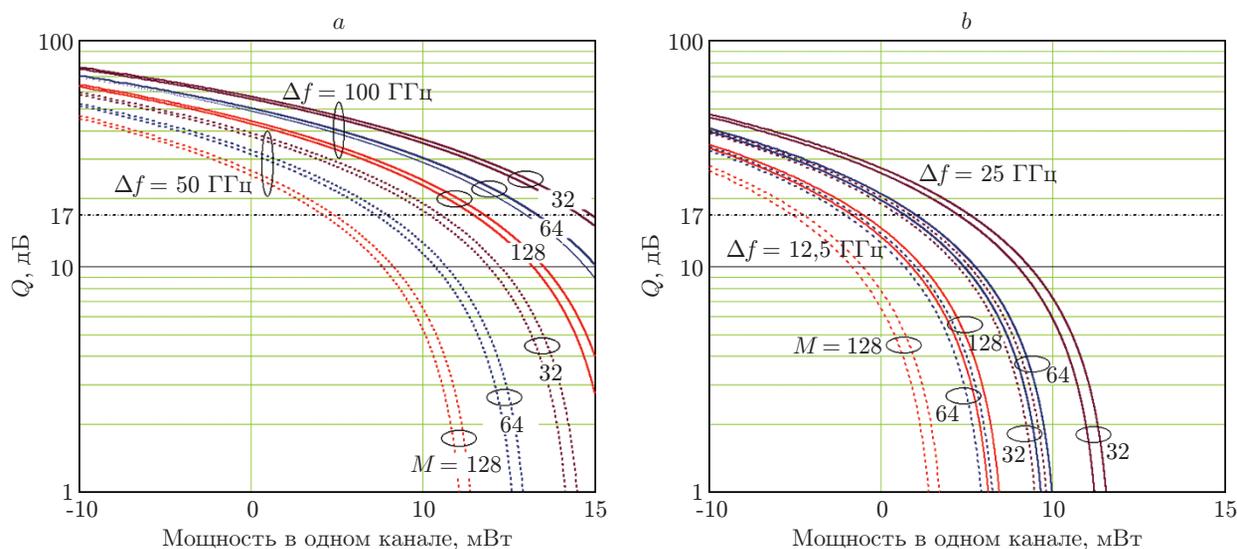


Рис. 6. Зависимость Q -фактора от мощности на расстоянии $L = 20$ км при количестве каналов $M = 32, 64, 128$: a — $\Delta f = 100$ и 50 ГГц; b — $\Delta f = 25$ и $12,5$ ГГц

Таким образом,

$$Q = \left(\frac{P_i \exp(-\alpha L)}{P_{ijk}(L, 6)N_{(f_i + f_j - f_k)}(m, N) + P_{ijk}(L, 3)N_{(2f_i - f_k)}(m, N)} \right)^{1/2}. \quad (3)$$

В качестве примера оценки влияния комбинационных частот на Q -фактор рассмотрим WDM-PON с 32, 64, 128 каналами. Предположим, что в каналах передаются сигналы с равной оптической мощностью и параметры оптического волокна согласно рекомендациям ITU-T G.652 для стандартного одномодового волокна в спектральном диапазоне «С» [19]. На рис. 6 показаны зависимости Q -фактора от мощности в канале при длине оптического волокна $L = 20$ км для каналов, находящихся в наихудшем положении. Кривые соответствуют случаям частотного интервала между каналами $\Delta f = 100$ и 50 ГГц и $\Delta f = 25$ и $12,5$ ГГц. Для построения кривых Q -фактора использовались результаты моделирования из таблицы для однодиапазонного ($\Delta f_g = \Delta f$, правые кривые на рис. 6) и двухдиапазонного ($\Delta f_g = n\Delta f$, где $n = M/2$, левые кривые) случаев. Для заданного M и при $\Delta f < \Delta f_g < n\Delta f$ значения Q -фактора находятся между кривыми, расположенными рядом. Как видно из рисунка, мощность в каналах необходимо ограничивать, чтобы не превышать требуемого значения Q -фактора. Чем меньше частотный интервал, тем сильнее влияние ЧВС, и мощность в каналах следует понижать. В наилучшем положении находятся каналы с частотным интервалом $\Delta f = 100$ ГГц, в наихудшем — с $\Delta f = 12,5$ ГГц. Так, для $M = 128$ при $\Delta f = 12,5$ ГГц уровень мощности в каналах не должен превышать значения $-5,2 \dots -4,6$ дБм. При том же количестве каналов, но при $\Delta f = 100$ ГГц уровень мощности может достигать значения $12,8 \dots 13,4$ дБм. При сокращении количества каналов увеличивается допустимая мощность в канале.

Рассмотрим возникновение комбинационных частот и их влияние на канал по мере распространения многоканального сигнала по оптическому волокну. На рис. 7 представлены зависимости Q -фактора от длины волокна L при разных уровнях оптической мощности в каналах. Анализ показывает, что на расстояниях $L < L_{\text{эф}}$ (в нашем случае $L_{\text{эф}} \sim 20$ км) наблюдается осциллирующая зависимость Q -фактора. Наибольшее значение Q -фактор принимает в точке ввода излучения в оптическое волокно, наименьшее значение отмечается на расстояниях порядка от нескольких сотен метров от начала ввода излу-

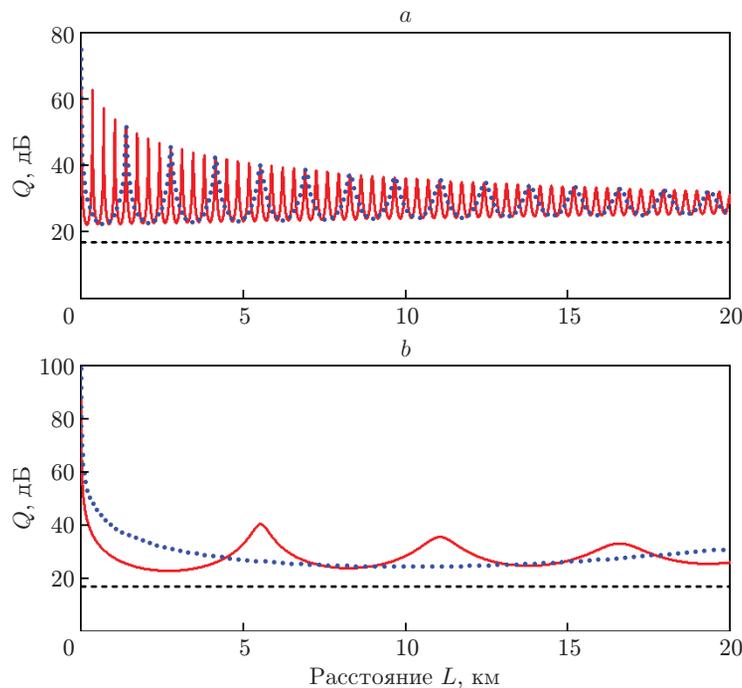


Рис. 7. Зависимости Q -фактора от дальности передачи для WDM-PON с 32 каналами при разных значениях частотного интервала и уровня мощности в каналах: a — $\Delta f = 100$ ГГц, $P_i = 12$ дБм (сплошная кривая), $\Delta f = 50$ ГГц, $P_i = 6$ дБм (точечная кривая); b — $\Delta f = 25$ ГГц, $P_i = 0$ дБм (сплошная кривая), $\Delta f = 12,5$ ГГц, $P_i = -6$ дБм (точечная кривая)

чения в волокно до нескольких километров (в зависимости от частотного интервала). По мере увеличения расстояния передачи ($L > L_{эф}$) величина Q -фактора стабилизируется и имеет незначительные отклонения. Уменьшение частотного интервала приводит не только к увеличению периода осцилляции Q -фактора от расстояния, а также к уменьшению среднего значения Q -фактора. Рисунок содержит примеры, соответствующие таким уровням мощности в каналах, при которых имеется почти одинаковая амплитуда осцилляции значения Q -фактора при её разных периодах. Заметим, что для удержания Q -фактора в определённых пределах при уменьшении частотного интервала в 2 раза необходимые уровни мощности в каналах следует снизить почти в 4 раза.

Заключение. Рассмотрен участок сети WDM-PON, где размещение оптических каналов по спектру имеет разную конфигурацию. Результаты моделирования распределения по спектру комбинационных частот четырёхволнового смешения показывают, что при равномерном размещении спектральных каналов в наихудшем положении оказывается средний канал. При неравномерном размещении каналов спектр комбинационных частот ЧВС может принимать многопиковый характер. Приведён случай, когда спектральные каналы расположены равномерно в спектральных диапазонах и между ними существует защитная полоса. Показано, что количество нежелательных помех от ЧВС, попадающих в каналы, уменьшается. Оценивается влияние ЧВС на Q -фактор. Согласно расчётам превышение уровня оптической мощности в спектральном канале может повлечь за собой резкое уменьшение Q -фактора из-за четырёхволнового смешения. Таким образом, для достоверной передачи информации необходимо ограничить уровень максимальной мощности в каналах, или увеличить частотный интервал между каналами, или сократить количество каналов. Исследование Q -фактора на коротких расстояниях передачи (до 20 км) демонстрирует его осциллирующий характер. Период осцилляции, а также её амплитуда зависят в основном от частотного интервала каналов, мощности в каналах и типа оптического волокна.

Сеть WDM-PON с рассмотренным спектральным размещением каналов достаточно проста в реализации, так как не требует сложных алгоритмов и методов подавления комбинационных частот в отличие от [11, 13, 14], и её внедрение может быть экономически оправдано.

Полученные результаты полезны при проектировании сетей доступа с применением спектрального уплотнения и обуславливают необходимость учёта возникающих в оптическом волокне нелинейных явлений, в частности четырёхволнового смешения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ITU-T Recommendation G.984.1**. URL: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.984.1-200803-I!!PDF-E&type=items (дата обращения: 08.12.2016).
2. **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 (дата обращения: 08.12.2016).
3. **Проспект оборудования фирмы "Enablence"**. URL: http://www.enablence.com/technologies/wp-content/uploads/2013/07/Datasheet_OCSD_AWG_Athermal_50GHz.pdf (дата обращения: 29.11.2016).
4. **Проспект оборудования фирмы "Kaiaam"**. URL: <http://www.kaiamcorp.com/media/KAIAM%2096Ch%2050GHz%20Athermal%20AWG.pdf> (дата обращения: 29.11.2016).
5. **Проспект оборудования фирмы PPI Inc.** URL: http://ppitek.com/english/sub/goods_detail.asp?num=23&linked=3&linked_s=42 (дата обращения: 29.11.2016).
6. **Kehayas E., Schrenk B., Vakopoulos P. et al.** All-optical carrier recovery with periodic optical filtering for wavelength reuse in RSOA-based colorless optical network units in full-duplex 10Gbps WDM-PONs // Proc. of the Conf. on Optical Fiber Communication / National Fiber Optic Engineers Conference. San Diego, USA, 2010. P. 1–3.
7. **Lee Y. J., Cho K. Y., Murakami A. et al.** Reflection tolerance of RSOA-based WDM PON // Proc. of the Conf. on Optical Fiber Communication / National Fiber Optic Engineers Conference. San Diego, USA, 2008. P. 1–3.
8. **Shim H. K., Kim H., Chung Y. C.** Practical 12,5-Gb/s, 12,5-GHz spaced ultra-dense WDM PON // Opt. Express. 2014. **22**, Is. 23. P. 29037–29047.
9. **Buset J. M., El-Sahn Z. A., Plant D. V.** Experimental demonstration of a 10 Gb/s RSOA-based 16-QAM subcarrier multiplexed WDM PON // Opt. Express. 2014. **22**, Is. 1. P. 1–8.
10. **Abed H. J., Din N. M., Al-Mansoori M. H. et al.** Recent four-wave mixing suppression methods // Optik. 2013. **124**, Is. 15. S. 2214–2218.
11. **Noshad M., Rostami A.** FWM minimization in WDM optical communication systems using the asymmetrical dispersion-managed fibers // Optik. 2012. **123**, Is. 9. S. 758–760.
12. **Bi M., Xiao S., Li J., He H.** A bandwidth-efficient channel allocation scheme for mitigating FWM in ultra-dense WDM-PON // Optik. 2014. **125**, Is. 8. S. 1957–1961.
13. **Thing V. L. L., Shum P., Rao M. K.** Channel allocation algorithm for WDM systems // Opt. Express. 2003. **11**, Is. 11. P. 1322–1327.
14. **Reis J., Neto B., André P. S., Teixeira A.** WDM ring performance improvement by means of a nonlinear effects crosstalk minimization algorithm // Proc. of the Conf. on Optical Fiber Communication / National Fiber Optic Engineers Conference. San Diego, USA, 2009. P. 1–3.
15. **Agrawal G. P.** Lightwave Technology: Telecommunication Systems. Hoboken, USA: Wiley-Interscience, 2005. 480 p.

16. **Goebel В., Fesl В., Coelho L. D., Hanik N.** On the effect of FWM in coherent optical OFDM systems // Proc. of the Conf. on Optical Fiber Communication / National Fiber Optic Engineers Conference. San Diego, USA, 2008. P. 1–3.
17. **Варданян В. А.** Исследование распределения продуктов четырёхволнового смешивания в ВОСП с ЧРК // Вестн. СибГУТИ. 2016. № 2. С. 78–84.
18. **Schneider Т.** Nonlinear Optics in Telecommunications. Berlin — Heidelberg: Springer-Verlag, 2004. 420 p.
19. **ITU-T Recommendation G.652.** URL: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.652-200911-S!!PDF-E&type=items (дата обращения: 08.12.2016).

Поступила в редакцию 23 мая 2016 г.
