

3. **Pat. 8336543 US.** Filter Cartridge Having Cover for Masking Service Life Indicator / Holmquist-Brown T. W., Rakow N. A. // Appl. 25.12.2012.

4. **Балабанов П. В., Пономарев С. В., Балабанова Е. Н.** Метод и устройство для измерения теплофизических свойств образцов регенеративного продукта на матрице при нагреве их постоянным тепловым потоком // Измерительная техника. 2009. № 5. С. 49–53.

5. **Балабанов П. В., Костров А. С.** Методика повышения точности и оперативности измерения теплофизических характеристик на стадии регулярного режима второго рода // Вестник ТГТУ. 2011. Т. 17. № 4. С. 936–944.

6. **Балабанов П. В., Мищенко С. В., Костров А. С.** Метод комплексного определения объемной и удельной теплоемкостей сыпучих материалов и устройство для его осуществления // Вестник ТГТУ. 2013. Т. 19. № 2. С. 255–261.

7. **Мордасов М. М., Савенков А. П., Чечетов К. Е.** Манометрический метод измерения кажущейся плотности сыпучих материалов // Измерительная техника. 2015. № 4. С. 38–42.

8. **Балабанов П. В., Савенков А. П.** Устройство для неразрушающего измерения плотности сыпучих материалов // Приборы. 2015. № 9 (183). С. 3–6.

9. **Минко К. Б., Артемов В. И., Яньков Г. Г.** Гидравлическое сопротивление и эффективная теплопроводность засыпок из сферических частиц // Вестник МЭИ. 2011. № 4. С. 47–55.

10. **Zarichnyak Y. P., Ivanov V. A.** Calculating the thermal conductivity of filled fluoroplastics by methods of general conductivity theory // Intern. Polymer Sci. Technol. 2015. V. 42. No 1. P. T27–T30.

Дата принятия: 02.12.2016.

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

621.391.8

Методика оценки отношения сигнал–шум в волоконно-оптических системах передачи с частотным разделением каналов

В. А. ВАРДАНЫН

Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Новосибирск, Россия,
e-mail: vardgesvardanyan@mail.ru

Предложена методика оценки отношения сигнал–шум в волоконно-оптических системах передачи со спектральным уплотнением, уплотнением ортогональных и неортогональных поднесущих каналов при перекрестных помехах между каналами из-за четырёхволнового смешения в волокне. Показано, что оценить отношение сигнал–шум системы с любым количеством поднесущих каналов можно по результатам измерений этого отношения для четырёхканальной системы передачи.

Ключевые слова: частотное разделение каналов, оптическое отношение сигнал–шум, четырёхволновое смешение, поднесущие каналы.

The procedure of estimating optical signal to noise ratio (OSNR) in optical fiber transmission systems with spectral multiplexing, using orthogonal and not orthogonal subcarriers multiplexing with domination of four-wave mixing effects was offered. The technique is based on measuring the OSNR for four-channel signal transmission system which is used to predict OSNR for M-channel transmission system.

Key words: frequency division multiplexing, optical signal to noise ratio, four-wave mixing, subcarriers.

В последнее время растёт интерес к волоконно-оптическим системам передачи (ВОСП) с частотным разделением каналов (frequency division multiplexing, FDM). Это связано, с одной стороны, с трудностями реализации сверхвысокоскоростных оптоэлектронных составляющих для ВОСП с временным разделением каналов (time division multiplexing, TDM), с другой стороны – поисками экономически выгодного и эффективно-го использования пропускной способности оптического волокна. Плотное размещение каналов в частотном

спектре, а также применение методов многоуровневой модуляции сигналов при формировании каналов позволяют повысить спектральную эффективность. Так, в ВОСП со спектральным уплотнением каналов (dense wavelength division multiplexing, DWDM) каналы формируются в оптическом диапазоне, где частотные интервалы Δf между каналами регламентируются стандартом [1] и составляют 100, 50, 25 и 12,5 ГГц. Однако частотно-разделённые каналы могут формироваться не только в оптическом, но и в сверхвысокочастотном

и радиочастотном диапазоне. В этом случае сформированный в этих диапазонах групповой многоканальный сигнал «переносится» в оптический диапазон с помощью модуляции оптической несущей, поэтому каналы называются поднесущими (subcarrier multiplexing, SCM). Второе часто используемое название этой технологии ROF (radio over fiber) [2–4]. Эти групповые многоканальные сигналы можно мультиплексировать с помощью технологии DWDM, которую обозначим как ВОСП-SCM-DWDM. В настоящее время исследуются возможности применения технологии уплотнения ортогональных поднесущих каналов (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) в ВОСП. Данная технология реализована на хорошо разработанных аппаратно-программных методах цифровой обработки данных. Она положительно зарекомендовала себя в проводных (digital subscriber line, xDSL) и беспроводных системах передачи [5–7]. Оптический частотный диапазон ВОСП-OFDM разбивается между поднесущими каналами, количество которых может достигать нескольких сотен. Спектры поднесущих каналов перекрываются, однако из-за их ортогональности на приёмной стороне ВОСП каналные сигналы демодулируются без «аналоговой» фильтрации, с цифровой обработкой данных. Приведённые в настоящей статье расчётные соотношения и полученные результаты справедливы для ВОСП-SCM-DWDM и ВОСП-OFDM. В этих системах каналы частотно-разделённые, поэтому для упрощения обозначим их ВОСП-FDM.

Очевидно, что для увеличения пропускной способности ВОСП-FDM, кроме использования спектрально-эффективных многоуровневых форматов модуляции, необходимо увеличивать число каналов в спектральном диапазоне с одновременным уменьшением частотного интервала между ними. С ростом числа каналов суммарный уровень мощности в оптическом волокне увеличивается, что приводит к возникновению в нём нелинейных явлений (продуктов) вследствие нелинейной восприимчивости третьего порядка оптического волокна [8]. Для ВОСП-FDM нежелательные и доминирующие помехи – комбинационные частотные продукты в спектре из-за четырёхволнового смешения (ЧВС) [4, 9]. Некоторые продукты ЧВС попадают в частотные диапазоны каналов и обуславливают появление перекрестных помех между каналами и уменьшение оптического отношения сигнал-шум (optical signal to noise ratio, OSNR) на приёмной стороне ВОСП [10, 11]. В реальных условиях оценка влияния этих нелинейных продуктов на OSNR затруднена, так как внутри полосы пропускания канала невозможно отделить (отличить) сигнал от нежелательной помехи и измерить отдельно уровни их мощностей. Поэтому разработка методики оценки OSNR является актуальной задачей для существующих и проектируемых сетей, а также при создании измерительной аппаратуры.

Предлагаем методику оценки влияния комбинационных частот ЧВС на OSNR в ВОСП с 13-ю и более частотно-разделёнными каналами. Методика позволяет по четырём канальным сигналам управлять уровнем суммарной мощности в волокне и прогнозировать влияние нелинейных продуктов в волокне на значение OSNR при большом количестве каналов в существующих или

тестируемых ВОСП-FDM.

Каналы ВОСП-FDM формируются модуляцией источников излучения информационными сигналами с различными длинами волн. После объединения сигналов в волокно поступает суммарный сигнал, состоящий из разных оптических несущих. С ростом суммарного уровня оптической мощности в волокне возникает ЧВС, вызванное нелинейным взаимодействием волн с близкими частотами. Однако для систем с большим количеством передаваемых канальных сигналов при условии удержания требуемого суммарного уровня мощности в волокне влияние нелинейных продуктов на качество передачи сигналов не зависит от количества M каналов [7]. Следовательно, отношение мощностей канального сигнала и продукта ЧВС, измеренное, например, при подаче на вход волокна сигналов по $M=4$ каналам ($OSNR_4$), может характеризовать комплексное влияние нелинейности оптического волокна на качество передачи сигналов. Измерив $OSNR_4$ при определённой суммарной мощности сигнала на входе волокна, можно спрогнозировать отношение мощности сигнала к полной мощности продуктов нелинейностей $OSNR_M$ (при заданном M), попадающих в полосу пропускания канала, если известно число продуктов ЧВС в полосе одного канала.

В общем случае для M -канальной системы мощность одного продукта ЧВС определяется как [8]:

$$(P_{ijk})_M = \eta_{ijk} (d \gamma L_{\text{эфф}} / 3)^2 (P_i)_M (P_j)_M (P_k)_M \exp(-\alpha L), \quad (1)$$

где η_{ijk} – эффективность генерации комбинационных частот; d – коэффициент вырождения ($d=3$ или 6 для продуктов вида $2f_i - f_j$ или вида $f_i + f_j - f_k$); γ – нелинейный коэффициент оптического волокна; $L_{\text{эфф}} = (1 - \exp(-\alpha L)) / \alpha$ – эффективная длина волокна; L – длина оптического волокна; α – коэффициент затухания; P_M – мощность сигнала в одном канале (i, j, k).

В данном случае для i -го канала можно записать $OSNR_M = (P_i)_M / (P_{\text{ЧВС}})_M$, где $(P_{\text{ЧВС}})_M$ – суммарная мощность продуктов ЧВС, попадающих в канал. Таким образом, с учётом (1) и затухания сигнала в волокне отношение сигнал-шум будет

$$OSNR_M = (P_i)_M \exp(-\alpha L) / [(P_{ijk})_M N(i)_M], \quad (2)$$

где $N(i)_M$ – количество продуктов ЧВС, частота которых совпадает с частотой i -го канала, при общем количестве M каналов в системе.

Выразим $OSNR_M$ для M -канальной системы через $OSNR_4$ четырёхканальной системы передачи. Из условия постоянной суммарной оптической мощности в волокне при любом количестве каналов следует равенство

$$(P_i)_M = 4(P_i)_4 / M. \quad (3)$$

Подставим (3) в (2) и получим

$$OSNR_M = OSNR_4 M^2 / [16N(m)_M], m = 1, \dots, M. \quad (4)$$

Воспользуемся аналитическими выражениями $N(m)_M$ для случая передачи равномерно размещённых в спек-

тре каналов [10–13]. Для продуктов ЧВС видов $f_i + f_j - f_k$, $2f_i - f_j$ соответственно имеем

$$N(m)_M = m(M-m+1)/2 + [(M-3)^2 - 5]/4 - [1 - (-1)^M](-1)^{M+m}/8; \quad (5)$$

$$N(m)_M = \{M - 2 - [1 - (-1)^M](-1)^m/2\}/2. \quad (6)$$

Из сравнения (5), (6) следует, что количество продуктов ЧВС вида $f_i + f_j - f_k$ быстро растёт с увеличением числа M каналов и преобладает над продуктами вида $2f_i - f_j$, которые можно не учитывать при $M \rightarrow \infty$. Более того, максимальная концентрация этих продуктов наблюдается в середине частотного диапазона размещения каналов, где $m \approx M/2$ [10, 11]. Тогда для большого количества ($M \rightarrow \infty$) каналов число продуктов ЧВС вида $f_i + f_j - f_k$ стремится к предельному значению:

$$N(M/2)_\infty = 3M^2/8. \quad (7)$$

Для крайних каналов, расположенных в спектре, где $m \approx 1$ или M , получим

$$N(1)_\infty = N(M)_\infty = M^2/4. \quad (8)$$

После подстановки (7) в (4) для каналов в середине частотного диапазона отметим уменьшение отношения сигнал–шум при использовании большого количества (M) каналов вместо четырёх. При условии постоянного среднего уровня оптической мощности в волокне уменьшение этого отношения составит не более 7,8 дБ. Подставив (8) в (4), можно убедиться, что для первого и последнего каналов уменьшение отношения сигнал–шум составит не более 6 дБ.

Важной задачей является выбор оптических частот четырёх каналов. Например, в [14] с помощью неравномерного размещения в спектре четырёх оптических каналов добились минимизации влияния продуктов ЧВС на каналы. В рассматриваемом случае необходимо разместить четыре канала в частотном диапазоне M -канальной системы так, чтобы никакие комбинационные частоты не попадали в полосы пропускания этих каналов, и спектры продуктов ЧВС не перекрывали друг друга, т. е. в «пассивные» каналы не должно попадать более одного комбинационного продукта. Для нахождения индексов четырёх частотных каналов разработали программу на объектно-ориентированном языке Delphi. Установили, что такие сочетания индексов частот существуют при $M \geq 12$ каналов. Для $M=12$ индексы следующие: 1, 2, 8, 12; 1, 2, 9, 12; 1, 4, 11, 12; 1, 5, 11, 12. В таблице приведён фрагмент полученных сочетаний индексов частот при $M=13...16$, удовлетворяющих данным условиям.

Наборы из четырёх индексов частот составляют линейку Голомба, где разность между любыми индексами не повторяется [15, 16]. Удобнее описать эти наборы расстояниями между соседними индексами. Очевидно, что минимальный набор индексов при $M=12$ повторяется и при $M \geq 12$. Однако для удобства восприятия и запоминания, а также унификации рассмотрим набор 3-4-5 из индексов 1, 4, 8, 13 (выделены в таблице полужирным шрифтом), который присутствует для всех $M \geq 13$. В дан-

Индексы неравномерно расположенных четырёх канальных частот, удовлетворяющих условиям выбора

Индексы канальных частот при количестве каналов			
13	14	15	16
1, 2, 6, 13	1, 2, 5, 14	1, 2, 5, 14	1, 2, 5, 14
1, 2, 8, 12	1, 2, 6, 13	1, 2, 5, 15	1, 2, 5, 15
1, 2, 9, 12	1, 2, 8, 12	1, 2, 6, 13	1, 2, 5, 16
1, 2, 10, 13	1, 2, 9, 12	1, 2, 7, 15	1, 2, 6, 13
1, 3, 10, 13	1, 2, 9, 14	1, 2, 8, 12	1, 2, 7, 15
1, 4, 8, 13	1, 2, 10, 13	1, 2, 9, 12	1, 2, 8, 12
1, 4, 11, 12	1, 2, 11, 14	1, 2, 9, 14	1, 2, 9, 12
1, 4, 11, 13	1, 3, 8, 14	1, 2, 10, 13	1, 2, 9, 14
1, 4, 12, 13	1, 3, 9, 14	1, 2, 10, 15	1, 2, 10, 13
1, 5, 11, 12	1, 3, 10, 13	1, 2, 11, 14	1, 2, 10, 15
1, 6, 10, 13	1, 3, 11, 14	1, 2, 11, 15	1, 2, 10, 16
1, 8, 12, 13	1, 4, 5, 14	1, 2, 12, 15	1, 2, 11, 14
2, 3, 9, 13	1, 4, 8, 13	1, 3, 6, 15	1, 2, 11, 15
2, 3, 10, 13	1, 4, 11, 12	1, 3, 8, 14	1, 2, 12, 15
...	...	...	1, 2, 12, 16
...	...	1, 4, 8, 13	1, 2, 13, 16
...	...	...	...
...	...	...	1, 4, 8, 13
...	...	...	...

ном случае обозначение 3-4-5 показывает, что расстояния между четырьмя соседними каналами составляют $3\Delta f$, $4\Delta f$, $5\Delta f$, где Δf – частотный интервал между каналами M -канальной системы, зависящий от указанного расстояния и не зависящий от выбора частот.

На рис. 1 в качестве примера представлен спектр всех комбинационных частотных продуктов ЧВС, возникающих при передаче по волокну 4-х каналов на частотах f_1 , f_4 , f_8 , f_{13} . Продукты ЧВС в эти каналы не попадают. В другие, «пассивные» каналы попадает, по крайней мере, один продукт вида $f_i + f_j - f_k$ или $2f_i - f_j$.

Для измерения $OSNR_d$ на приёмной стороне ВОСП измеряют уровень оптической мощности сначала в одном из четырёх каналов, например, с индексом $m=4$, затем в канале, например, с индексом $m=5$, где присутствует помеха вида $f_i + f_j - f_k$. Используя формулу (4), можно спрогнозировать, будет ли превышено требуемое значение $OSNR_M$ при передаче M -канального сигнала вместо четырёхканального.

Пример реализации методики оценки $OSNR$ и результаты расчётов. На рис. 2 показана структурная схема участка ВОСП, в которой необходимо оценить уменьшение $OSNR_M$ вследствие нелинейных явлений в волокне. Такой участок присутствует как в традиционных

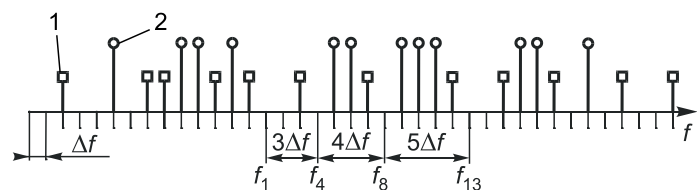


Рис. 1. Спектр продуктов четырёхволнового смешения, возникающих в оптическом волокне при передаче четырёх сигналов с центральными частотами f_1, f_4, f_8, f_{13} . 1, 2 – продукты видов $2f_i - f_j$; $f_i + f_j - f_k$, соответственно.

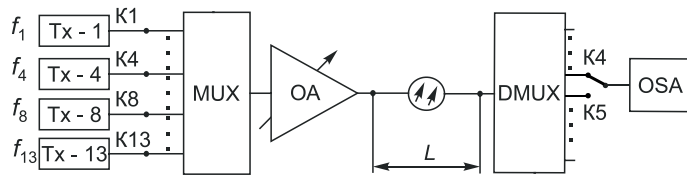


Рис. 2. Структурная схема участка сети для оценки отношения сигнал-шум:

Tx – транспондер; MUX , $DMUX$ – оптические мультиплексор и демультиплексор, соответственно; OA – оптический усилитель; OSA – измеритель мощности; K – каналы; L – расстояние между ВОСП и приёмником сигналов

системах ВОСП-DWDM, так и ВОСП-OFDM. Спектральные каналы формируются в транспондерах Tx , и после уплотнения в мультиплексоре MUX групповой многоканальный сигнал, состоящий из суммы спектрально разделенных M каналов, усиливается в оптическом усилителе OA (optical amplifier) с управляемым коэффициентом усиления. В настоящее время широко используются эрбиевые оптические усилители (erbium-doped fiber amplifier, EDFA). Далее многоканальный сигнал передается по оптическому волокну. На расстоянии L от ВОСП находится приёмная аппаратура, в состав которой входит оптический демультиплексор $DMUX$ для разделения спектральных каналов. Отметим, что демультиплексирование каналов в ВОСП-OFDM можно реализовать с помощью интегрированного в функционал приёмника аппаратно-программного комплекса, а не отдельного блока. Предположим, что на приёмной стороне ВОСП мощность сигнала в каждом спектральном канале можно измерить анализатором спектра со встроенным измерителем мощности (optical spectrum analyzer, OSA). Заметим, что измерение мощности шумов технически возможно в приёмной аппаратуре после фотодетектирования сигнала, но с учётом дополнительных шумов, возникающих при этом процессе, а также шумов фотоприёмного модуля.

Предположим, что на передающей стороне ВОСП мощность сигнала в каждом спектральном канале одинаковая и заданная для сети конкретной конфигурации. Процедура измерения $OSNR_M$ будет следующей:

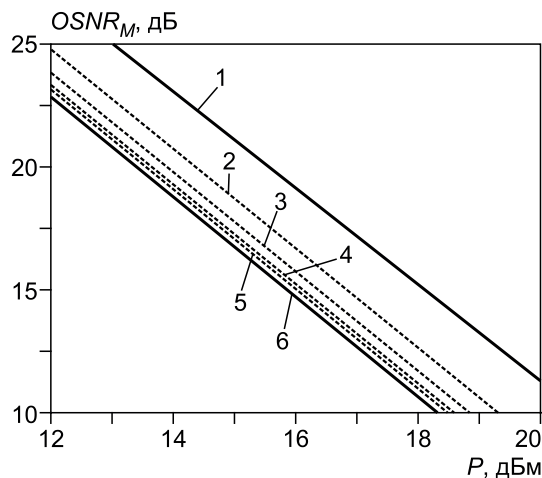


Рис. 3. Зависимость отношения сигнал-шум $OSNR_M$ от уровня оптической мощности P в одном канале на входе ВОСП при количестве каналов $M=4; 8; 16; 32; 64$ – соответственно линии 1–5; $M \rightarrow \infty$ – линия 6 ($OSNR_M \approx OSNR_4 - 7,8$ дБ)

на передающей стороне включаются только сигналы четырёх транспондеров, центральные частоты которых соответствуют, например, f_1, f_4, f_8, f_{13} . Остальные каналы выключаются;

коэффициент усиления OA увеличивается в $M/4$ раза по сравнению с первоначально установленным рабочим значением. Такое увеличение связано с необходимостью поддержания в волокне такого же уровня оптической мощности, что и при передаче M -канального оптического сигнала. Данное увеличение можно реализовать программно-аппаратными средствами;

на приёмной стороне ВОСП, на выходе порта $DMUX$, соответствующего каналу № 4, измеряется уровень мощности сигнала в канале;

на выходе порта $DMUX$, соответствующего каналу № 5, измеряется уровень мощности помехи в канале;

рассчитывается $OSNR_4$, затем по (4) вычисляется $OSNR_M$. Если требуемое значение отношения сигнал-шум в децибелах для данной системы $OSNR_{тр} > OSNR_4 - 7,8$, то на работоспособность M -канальной системы (качество передачи сигналов) не будут влиять нелинейные продукты.

Для подтверждения правильности методики оценки приведём пример зависимости $OSNR_M$ от уровня мощности в одном канале для ВОСП с разным количеством каналов, передаваемых по стандартному одномодовому волокну (standard single-mode fiber, SSMF) на расстояние $L=100$ км в диапазоне длин волн 1550 нм с частотным интервалом между каналами 6,25 ГГц (рис. 3). При увеличении M от 4 до 64 график $OSNR_M(P)$ быстро приближается к прямой $OSNR_4 - 7,8$, где $OSNR_4$ определяется экспериментально согласно описанной выше процедуре. При $M > 64$ можно считать, что характеристики M -канальной системы определяются по характеристикам четырёхканальной системы, т. е. $OSNR_M \approx OSNR_4 - 7,8$.

Приведем результаты вычислений оценки $OSNR_M$ в зависимости от частотного интервала между каналами. На рис. 4 показаны примеры расчётных зависимостей $OSNR_M$ от уровня мощности в одном канале с разными частотными интервалами между каналами. При относительно малой оптической мощности в каналах ВОСП-FDM и частотном интервале $\Delta f > 1,5$ ГГц ограничивающим фактором $OSNR_M$ может стать усиленный спонтанный шум оптического усилителя (amplified spontaneous emission, ASE). В расчётах предполагалось, что коэффициент шума ASE составляет 6 дБ. С увеличением уровня мощности в каналах нелинейные продукты становятся основным фактором ухудшения $OSNR_M$. При частотных интервалах $\Delta f < 1,5$ ГГц между каналами ВОСП-FDM уровень шума ASE намного меньше уровня помех, возникающих вследствие ЧВС, из-за малой частотной полосы пропускания каналов. Таким образом, можно определить необходимый для обеспечения достоверной передачи сигналов уровень мощности в одном канале для требуемого отношения сигнал-шум, которое должно быть больше измеренного $OSNR_M \approx OSNR_4 - 7,8$.

Результаты вычислений показывают, что на практике необходимо учитывать зависимость $OSNR_M$ от длины ВОСП. Особенно это важно для сетей доступа, где расстояния передачи не превышают нескольких десятков километров. Из [11] следует, что на расстояниях $L < L_{эфф}$ (для ВОСП-SSMF $L_{эфф} \approx 20$ км) зависимость $OSNR_M(L)$ имеет осциллирующий характер. Наибольшее значение $OSNR_M$

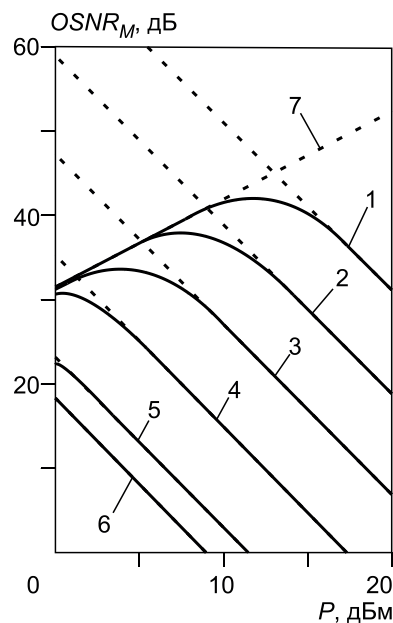


Рис. 4. Зависимость отношения сигнал-шум $OSNR_M$ от уровня оптической мощности P в одном канале на входе ВОСП для четырёхканальной системы с разными частотными интервалами между каналами $\Delta f = 25; 12,5; 6,25; 3,125; 1,562$ ГГц – кривые 1–5, соответственно; $\Delta f = 625$ ГГц – 6; шум оптического усилителя – 7

продуктов, обусловленных нелинейностью оптического волокна, на канальные сигналы являются актуальной задачей для этих систем. Предложенная методика оценки $OSNR$ для ВОСП с количеством частотно-разделенных каналов более 13 реализована простым, доступным способом – с помощью измерения $OSNR$ при четырёх активных каналах. Выполнены теоретическое и расчётное обоснования правильности методики оценки $OSNR$, а также рекомендации по выбору неравномерного спектрального размещения частот этих каналов. В качестве универсального частотного интервала между ними предложено сочетание $3\Delta f, 4\Delta f, 5\Delta f$, где Δf – частотный интервал между каналами M -канальной системы. Установлено значительное влияние комбинационных частотных продуктов ЧВС на $OSNR$ в системах с малым частотным интервалом между каналами $\Delta f < 1,5$ ГГц. При $\Delta f > 1,5$ ГГц на $OSNR$ также воздействуют шумы оптического усилителя ASE, однако при этом $OSNR$ увеличивается.

Практическая ценность этой методики заключается в том, что управляя уровнем суммарной оптической мощности в волокне, можно оценивать $OSNR$ для ВОСП со всеми технологиями уплотнения поднесущих каналов (ортогональных, неортогональных) независимо от форматов модуляции канальных сигналов. Методику измерения можно интегрировать в аппаратно-программный комплекс ВОСП. На основе такой методики можно создавать измерительное оборудование, позволяющее оценивать влияние продуктов ЧВС при загрузке ВОСП многоканальными сигналами.

принимает в точке ввода излучения в оптическое волокно, наименьшее значение и период осцилляции зависят от частотного интервала между каналами. Осцилляции сильнее проявляются, если частотный интервал между каналами $\Delta f > 1,5$ ГГц. Уменьшение частотного интервала приводит не только к увеличению периода осцилляции $OSNR_M(L)$, но и к уменьшению отношения $OSNR_M$. С увеличением расстояния $L > L_{эфф}$ $OSNR_M$ стабилизируется.

Заключение. ВОСП-FDM являются перспективными системами следующего поколения. Технические решения оценки влияния комбинационных частотных

Литература

1. ITU-T Recommendation G.694.1. Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid.
2. Gutierrez F. A., Perry P., Smyth F., Ellis A. D., Barry L. P. Impact of band rejection in multichannel broadband subcarrier multiplexing // IEEE/OSA Opt. Communicat. Networking. 2015. V.7. Iss. 4. P. 248–252.
3. Qiu M., Zhuge Q., Chagnon M., Gao Y., Xu X., Morsy-Osman M., Plant D. V. Digital subcarrier multiplexing for fiber nonlinearity mitigation in coherent optical communication systems // Opt. Express. 2014. V. 22. Iss. 15. P.18770–18777.
4. Hui R., Zhu B., Huang R., Allen C. T., Demarest K.R., Richards D. Subcarrier Multiplexing for High-Speed Optical Transmission // J. Lightwave Technol. 2002. V. 20. Iss. 3. P. 417–427.
5. Lowery A. J., Du L. B. Optical orthogonal division multiplexing for long haul optical communications: A review of the first five years // Opt. Fiber Technol. 2011. V. 17. Iss. 5. P. 421–438.
6. Shieh W., Chen Xi. Information Spectral Efficiency and Launch Power Density Limits Due to Fiber Nonlinearity for Coherent Optical OFDM Systems // IEEE Photonics J. 2011. V. 3. Iss. 2. P. 158–173.
7. Lowery A. J., Wang S., Premaratne M. Calculation of power limit due to fiber nonlinearity in optical OFDM systems // Opt. Express. 2007. V. 15. Iss. 20. P. 13282–13287.
8. T. Shneider. Nonlinear Optic in Telecommunications. N.Y.: Springer, 2004. P. 415.
9. Hmood J. K., Harun S. W., Emami S. D., Khodaei A., Noordin K. A., Ahmad H., Shalaby H. M. H. Performance analysis of an all-optical OFDM system in presence of non-linear phase noise // Opt. Express. 2015. V. 23. Iss. 4. P. 3886–3900.
10. Варданян В. А. Исследование распределения продуктов четырехволнового смешивания в ВОСП с ЧРК // Вестник СибГУТИ. 2016. №2. С. 78–84.
11. Варданян В. А. Влияние помех от четырёхволнового смешивания на спектрально разделенные каналы в пассивных оптических сетях доступа // Автометрия. 2017. Т.53, №1. С. 63–72.
12. Le S. T., Blow K., Turitsyn S. Power pre-emphasis for suppression of FWM in coherent optical OFDM transmission // Opt. Express. 2014. V. 22. P. 7238–7248.
13. Goebel B., Fesl B., Coelho L. D., Hanik N. On the Effect of FWM in Coherent Optical OFDM Systems // OFC/NFOEC: Opt. Fiber Communicat. / Nation. Fiber Opt. Eng. Conf., 2008. P. 1–3.
14. Abd El Razak B. K., Aly M. H. Suppression of Four Wave Mixing Crosstalk in Four 10Gbps Channels Over a 50 km Dispersion Shifted Fiber Using Unequal Channel Spacing // 19th Intern. Conf. Computer: Theory&Appl. ICCTA: Alexandria, Egypt, 2009. P.228–233.
15. Sugumaran S., Sharma N., Chitranshi S., Thakur N., Arulmozhivarman P. Effect of Four-wave Mixing on WDM System and its Suppression Using Optimum Algorithms // Intern. J. Eng. Technol. (IJET). 2013. V. 5. No 2. P. 1432–1444.
16. Vrizlynn L. L. Thing, Shum P., Rao M. K. Channel allocation algorithm for WDM systems // Opt. Express. 2003. V. 11. Iss. 11. P.1322–1327.

Дата принятия: 03.11.2016 г.