

Исследование распределения продуктов четырехволнового смешивания в ВОСП с ЧРК

В. А. Варданян

В работе исследуется спектральное распределение продуктов четырехволнового смешивания (ЧВС), возникающее в оптическом волокне при передаче многоканального сигнала с частотным разделением каналов (ЧРК). Исследуется спектр продуктов ЧВС при равномерном размещении сигналов с ЧРК. Предлагаются аппроксимирующие формулы для расчета количества продуктов ЧВС. Сравниваются результаты, рассчитанные по формулам, с результатами компьютерного моделирования. Относительное расхождение результатов, рассчитанных по формулам и при компьютерном моделировании, не превышает 3.3 %. Рассматривается распределение по спектру продуктов ЧВС при организации двухсторонней передачи по одному волокну методом ЧРК. Показано, что спектр продуктов ЧВС имеет многопиковый характер.

Ключевые слова: волоконно-оптические системы передачи, уплотнение по длинам волн, уплотнение поднесущих, четырехволновое смешивание.

Для эффективного использования пропускной способности оптического волокна при передаче широкополосного трафика применяются методы частотного разделения каналов как в оптическом диапазоне, так и в радиочастотном (РЧ) или сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазонах. Первое из них принято называть уплотнением каналов по длинам волн (WDM – Wavelengths Division Multiplexing), а второе – уплотнением поднесущих (SCM – Subcarrier Multiplexing). При уплотнении поднесущих информационные сигналы модулируют поднесущие частоты, таким образом создаются поднесущие каналы, а после суммирования поднесущих каналов формируется многоканальный сигнал в РЧ или СВЧ диапазоне. Преимущество метода SCM в том, что существующее оборудование в РЧ и СВЧ диапазонах имеет более привлекательные параметры по стабильности генераторов, по возможности частотной фильтрации, а также в реализации многоуровневых форматов модуляции по сравнению с оборудованием в оптическом диапазоне. Заметим, что сформированный многоканальный сигнал в РЧ или СВЧ диапазоне модулирует по интенсивности оптический источник излучения на определенной длине волны. В последнее время широко исследуются возможности оптических однополосных методов модуляции, позволяющих формировать однополосные каналы на разных длинах волн и таким образом эффективно размещать спектральные каналы в полосе пропускания оптического волокна. Еще одним широко используемым в радиосвязи методом передачи является ортогонально-частотное разделение каналов (OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Использование данного метода в волоконно-оптических системах передачи (ВОСП) позволяет компенсировать хроматическую дисперсию при передаче информации на сверхдальние расстояния. Например, в [1, 2] продемонстрированы эксперименты по передаче данных со скоростью 20 Гбит/с на большие расстояния (~ 4160 км). Оптическое OFDM условно можно считать разновидностью SCM, уточним, однако, что в большинстве случаев на приемной стороне используются когерентные методы приема сигналов [3, 4]. Таким образом, говоря о ВОСП с ЧРК, будем иметь в виду как ВОСП с WDM и SCM, так и ВОСП с их совместным использованием.

С увеличением суммарного количества каналов (поднесущих и/или спектральных) в оптическом волокне проявляются нелинейные явления. Одним из них является четырехволновое смешивание (ЧВС), возникающее между близко расположенными по спектру каналами. Продукты ЧВС нежелательны для ВОСП с ЧРК, т.к. приводят к ухудшению отношения сигнал/шум на приеме. Исследование распределения этих продуктов по спектру группового сигнала с ЧРК является актуальной задачей, т.к. позволяет оценить их влияние на любой заданный канал, а также возможность применения методик уменьшения помех. Например, распределяя на передающей стороне оптическую мощность по определенной закономерности между поднесущими каналами, можно добиться уменьшения нежелательного влияния продуктов ЧВС [6].

ЧВС возникает из-за нелинейной восприимчивости оптического волокна третьего порядка. Сигналы трех частот при распространении по волокну взаимодействуют друг с другом, вследствие чего возникают новые частотные комбинационные составляющие. Некоторые вновь появившиеся комбинационные частоты попадают в частотные диапазоны порождающих их каналов, что приводит к перекрестным помехам между каналами. Для ВОСП нежелательными являются продукты ЧВС третьего порядка первого рода $f_i + f_j - f_k$, $2f_i - f_k$, где f_i, f_j, f_k – центральные частоты каналов. Для N -канальной системы индексы i, j, k принимают любые значения от 1 до N , что приводит к генерации $(N^3 - N^2)/2$ продуктов ЧВС, однако не все эти продукты попадают в диапазон группового многоканального ЧРК сигнала. 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 $i, j = k$ имеем явление фазовой кросс-модуляции [7]. Их влияние не рассматривается в данной работе, ведется учет только продуктов ЧВС. Для нахождения количества нежелательных продуктов, попадающих в заданный канал с индексом m , где $m = 1 \dots N$, воспользуемся аналитическими выражениями, приведенными в [8], для случая передачи многоканального ЧРК сигнала через нелинейное звено третьего порядка:

$$N_{(f_i+f_j-f_k)}(m, N) = \frac{m}{2}(N - m + 1) + \frac{1}{4}((N - 3)^2 - 5) - \frac{1}{8}(1 - (-1)^N)(-1)^{N+m}; \quad (1)$$

$$N_{(2f_i-f_k)}(m, N) = \frac{1}{2}(N - 2 - \frac{1}{2}(1 - (-1)^N)(-1)^m). \quad (2)$$

Здесь $N_{(f_i+f_j-f_k)}$ – количество продуктов ЧВС типа $f_i + f_j - f_k$, а $N_{(2f_i-f_k)}$ – количество продуктов ЧВС типа $2f_i - f_k$, попадающих в полезный канал с индексом m , где $m = 1 \dots N$.

Аналитические выражения (1), (2) совпадают с оценкой количества продуктов ЧВС, попадающих в диапазон частот каналов, приведенной в [6, 7]. Для оценки распределения по частотной области всех продуктов ЧВС, возникающих не только в диапазоне каналов, а также вне его, была реализована программа на объектно-ориентированном языке Delphi. На рис. 1 показаны результаты моделирования распределения продуктов $f_i + f_j - f_k$ и $2f_i - f_k$ для случаев с количеством каналов $N=16, 32, 128$. Как видно из рис. 1, с увеличением количества каналов частотное распределение продуктов ЧВС вида $f_i + f_j - f_k$ приобретает функциональную зависимость, близкую к гауссовскому распределению. Более того, с увеличением числа каналов количество продуктов ЧВС резко увеличивается и максимальная концентрация этих продуктов наблюдается в середине частотного диапазона размещения каналов ($m = 1 \dots N$). Как видно из рис. 1, частотное распределение продуктов ЧВС вида $2f_i - f_k$ имеет форму трапеции, оно равномерно распределено в частотном диапазоне каналов ($m = 1 \dots N$) и линейно уменьшается вне этого диапазона. Их количество намного меньше, чем продуктов вида $f_i + f_j - f_k$. На основе анализа результатов количественных расчетов с помощью компьютерного моделирования предлагаются следующие функциональные зависимости, аппроксимирующие частотное распределение продуктов ЧВС:

$$N_{(f_i+f_j-f_k)}(m, N) = \left\{ \frac{m}{2}(N - m + 1) + \frac{1}{4}((N - 3)^2 - 5) \right\} \exp\left[-\frac{\left(m - \frac{N+1}{2}\right)^2}{\frac{\left(N - \frac{x}{2}\right)^2}{4} \sqrt{2\pi}}\right], \quad (3)$$

где $x = \log_2(N)$.

$$N_{(2f_i - f_k)}(m, N) = \begin{cases} \frac{1}{2}(N + m - \frac{1}{2}(1 - (-1)^N)(-1)^m), & \text{при } -N \leq m \leq 0 \\ \frac{1}{2}(N - 2 - \frac{1}{2}(1 - (-1)^N)(-1)^m) & \text{при } 1 \leq m \leq N \\ \frac{1}{2}(m - 2N - 2 - \frac{1}{2}(1 - (-1)^N)(-1)^m), & \text{при } (N + 1) \leq m \leq (2N + 1) \end{cases} \quad (4)$$

Анализ функциональных зависимостей распределения продуктов ЧВС показывает, что в определенном частотном диапазоне предложенные формулы (3) и (4) согласуются с результатами компьютерного моделирования. На рис. 1в для случая $N = 128$ показаны рассчитанные по формулам (3) и (4) функциональные зависимости продуктов ЧВС. Для продуктов вида $f_i + f_j - f_k$ погрешность минимальна в частотном диапазоне каналов. Для продуктов вида $2f_i - f_k$ формула (2) полностью совпадает с результатами компьютерного моделирования. На рис. 2 показано относительное расхождение результатов (в процентах), рассчитанных по формуле (3), и результатов компьютерного моделирования для случая комбинационных продуктов вида $f_i + f_j - f_k$ и $N = 128$. Как видно из рис. 2, величина расхождения для аппроксимирующего выражения (3) в частотном диапазоне каналов ($m = 1 \dots N$) не превышает 3.3 %, более того, такой порядок расхождения остается также вне диапазона в пределах, когда $m \sim -32$ до 160, что соответствует $m \sim -N/4$ до $5N/4$, где N – количество каналов.

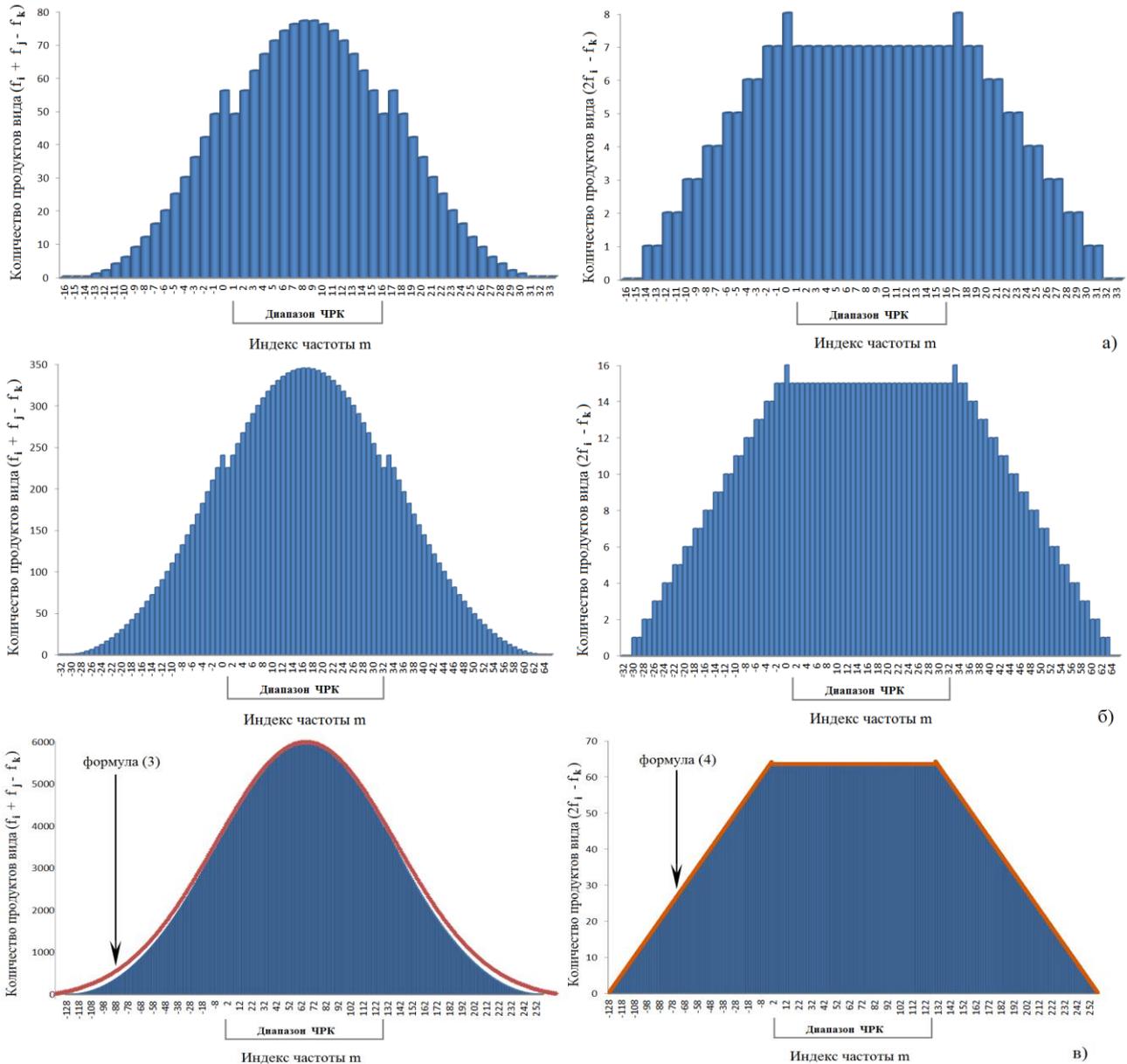


Рис. 1. Частотная зависимость количества продуктов ЧВС при разных значениях количества каналов: а) $N=16$, б) $N=32$, в) $N=128$

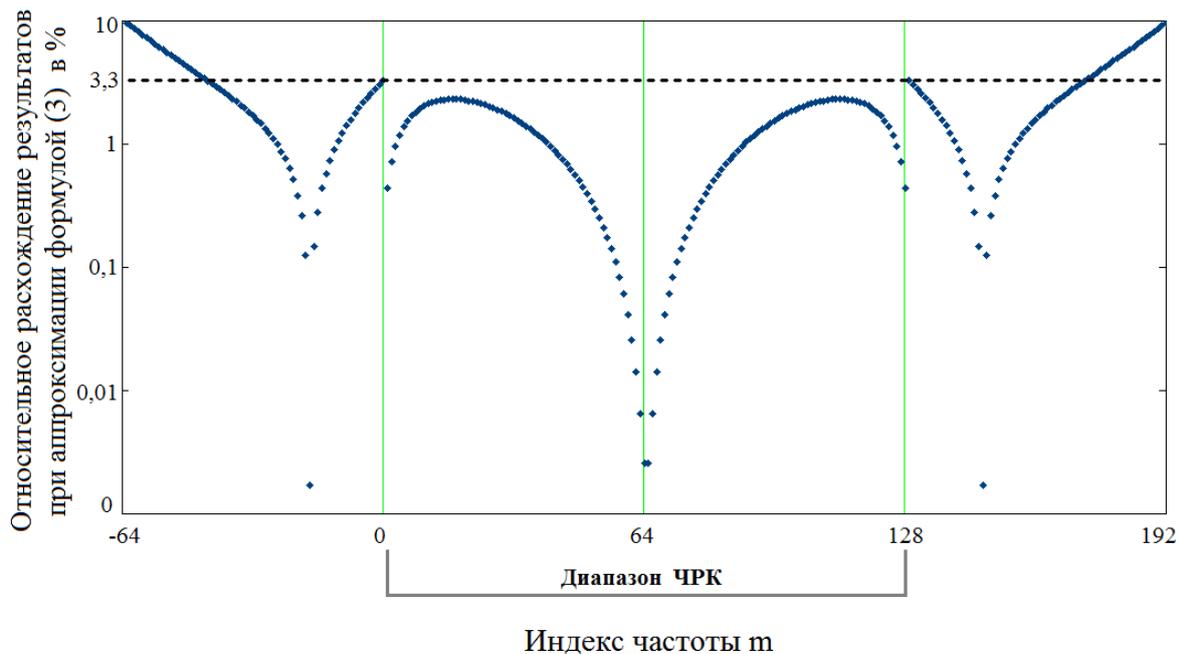


Рис. 2. Относительное расхождение результатов между аппроксимирующей формулой (3) и результатами компьютерного моделирования для случая с количеством каналов $N=128$

Рассмотренные выше распределения частотных продуктов ЧВС имеют место при равномерном размещении каналов в частотном диапазоне. Однако в телекоммуникации могут возникнуть случаи нарушения равномерного распределения каналов по частоте, например, при пропадании или «изъятии» из спектра одного или группы каналов. Кроме того, возможна организация двухсторонней связи по одному волокну с помощью ЧРК. В этих случаях произойдет перераспределение продуктов ЧВС по спектру. Рассмотрим случай, когда в волокне присутствуют оптические каналы, размещенные в двух частотных диапазонах, а между этими диапазонами – защитная полоса. Данный метод можно использовать для организации двухсторонней связи, где в одном частотном диапазоне будут размещаться каналы по одному направлению передачи, а в другом частотном диапазоне – в противоположном направлении. Предположим, что в каждом диапазоне присутствует одинаковое количество $n=(N-\Delta f)/2$ каналов и ширина защитной полосы является переменной величиной и равняется Δf . В данном случае Δf оценивается как величина, кратная разному частот соседних каналов (если $\Delta f=1$, то защитная полоса эквивалентна разному частот каналов, если $\Delta f=2$, то защитная полоса в 2 раза больше разности частот каналов и т.д.). На рис. 3 показаны результаты компьютерного моделирования распределения возникающих продуктов ЧВС по частоте, когда ширина защитной полосы принимает значения $\Delta f=15, 31, 65$. Как видно из рис. 3а, при достаточно маленьких значениях ширины защитной полосы между частотными диапазонами ($\Delta f < N/8$), распределение продуктов ЧВС вида $f_i + f_j - f_k$ почти не отличается от случая с равномерно размещенными каналами. Заметим, что максимальное количество продуктов ЧВС в расчете на один канал уменьшается, т.к. общее количество каналов уменьшается. С увеличением Δf появляется провал в спектре распределения ЧВС около значения $\Delta f/2$, а также заметное расширение спектра продуктов ЧВС. При достижении ширины защитной полосы значения $\Delta f=N/2$ имеем «нулевой провал» продуктов ЧВС в середине защитной полосы и максимумы в середине частотных диапазонов, где размещаются каналы. На рис. 3в показан случай такого распределения спектра продуктов ЧВС при $n=32, \Delta f=65 (N=128)$. Таким образом, можно утверждать, что при ширине защитной полосы, равной двукратной ширине спектра сигнала с ЧРК для одного направления передачи ($\Delta f=N/2$), максимальное количество продуктов ЧВС появляется в каналах, находящихся в середине данного частотного диапазона. В этом случае распределение продуктов ЧВС в диапазонах сигналов с ЧРК подобно случаям равномерного размещения каналов по спектру (пример на рис. 1в при $N=32$). Отличаются в основном пиковые значения количества продуктов ЧВС (в несколько раз превышают аналогичные при рав-

номерном размещении каналов при том же количестве каналов). Что касается продуктов ЧВС вида $2f_i - f_k$, возникающих в оптическом волокне при неравномерном размещении каналов по спектру, то их количество намного меньше, чем продуктов ЧВС вида $f_i + f_j - f_k$. Получается, что при больших значениях защитных полос Δf распределение продуктов ЧВС в диапазонах сигналов с ЧРК повторяет форму функциональных зависимостей (3) и (4), отличающихся только пиковыми значениями. С увеличением Δf уменьшаются пиковые значения продуктов ЧВС, одновременно возникают побочные пики вне спектра сигналов с ЧРК. Таким образом, с нарушением равномерности размещения каналов спектр продуктов ЧВС приобретает многопиковый вид.

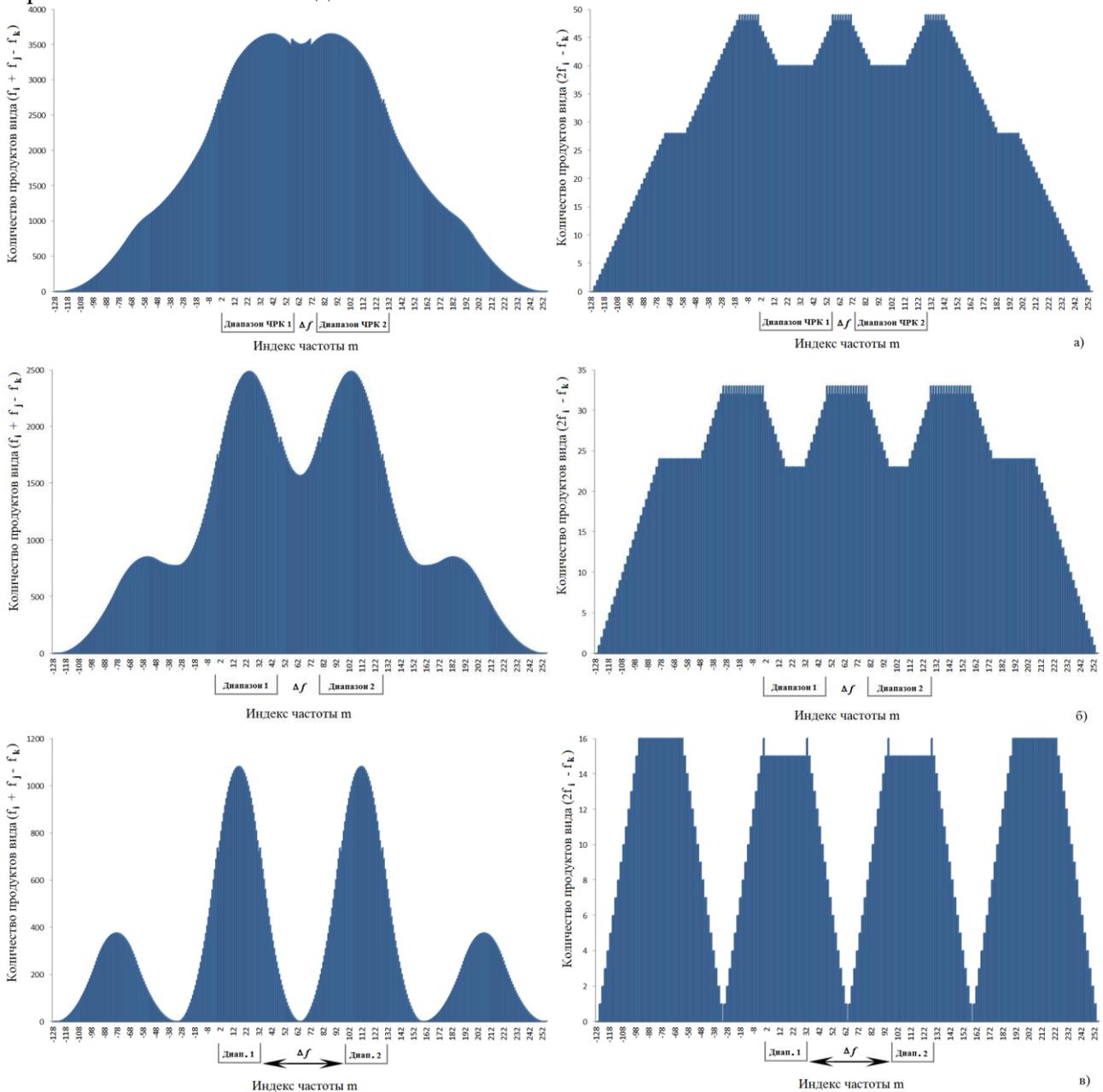


Рис. 3. Частотная зависимость количества продуктов ЧВС от значения ширины защитной полосы Δf при разном количестве каналов n : а) $n=56$, $\Delta f=15$; б) $n=48$, $\Delta f=31$; в) $n=32$, $\Delta f=65$

Заключение

Предложены аппроксимирующие формулы для оценки количества продуктов ЧВС при равномерном размещении каналов по спектру. Показано, что неравномерное спектральное размещение каналов приводит к появлению пиков в спектре распределения продуктов ЧВС. Полученные результаты компьютерного моделирования и аппроксимирующие формулы могут быть полезны при проектировании ВОСП с ЧРК и в учебных целях.

Литература

1. *A. J. Lowery, J. Armstrong* Orthogonal-frequency-division multiplexing for dispersion compensation of long-haul optical systems // *Opt. Express*. 2006. Vol. 14. P. 2079–2084.
2. *S. L. Jansen, I. Morita, N. Takeda, H. Tanaka* 20-Gb/s OFDM Transmission over 4,160-km SSMF Enabled by RF-Pilot Tone Phase Noise Compensation // in *Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference, OSA Technical Digest Series (CD) (Optical Society of America, 2007)*, paper PDP15. URL: <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=OFC-2007-PDP15> (дата обращения: 08.01.2016).
3. *B. J. Schmidt, A. J. Lowery, J. Armstrong* Experimental Demonstrations of 20 Gbit/s Direct-Detection Optical OFDM and 12 Gbit/s with a Colorless Transmitter // in *Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference, OSA Technical Digest Series (CD) (Optical Society of America, 2007)*, paper PDP18.
4. *W. Shieh, X. Yi, Y. Tang* Experimental Demonstration of Transmission of Coherent Optical OFDM Systems // in *Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference, OSA Technical Digest Series (CD) (Optical Society of America, 2007)*, paper OMP2. URL: <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=OFC-2007-OMP2> (дата обращения: 08.01.2016).
5. *A. J. Lowery, S. Wang, M. Premaratne* Calculation of power limit due to fiber nonlinearity in optical OFDM systems // *Opt. Express*. 2007. Vol. 15, P. 13282–13287. URL: <http://www.etoponline.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-15-20-13282> (дата обращения: 08.01.2016).
6. *Son Thai Le, Keith Blow, Sergei Turitsyn* Power pre-emphasis for suppression of FWM in coherent optical OFDM transmission // *Opt. Express*. 2014. Vol. 22, P. 7238–7248. URL: <http://www.etoponline.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-22-6-7238> (дата обращения: 08.01.2016).
7. *B. Goebel, B. Fesl, L. D. Coelho, N. Hanik* On the Effect of FWM in Coherent Optical OFDM Systems // in *Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference, OFC/NFOEC 2008. Conference on (2008)*, P. 1–3.
8. *Бородич С. В.* Искажения и помехи в многоканальных системах радиосвязи с частотной модуляцией. М.: Связь, 1976. 256 с.

Статья поступила в редакцию 18.01.2016

Варданян Вардгес Андраникович

к.т.н., доцент кафедры многоканальной электросвязи и оптических систем СибГУТИ
(630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), тел. (913) 4750547,
e-mail: vardgesvardanyan@mail.ru

Product distribution research of four-wave mixing in FOTS with FDC**V.A. Vardanyan**

In this paper, spectral product distribution of four-wave mixing (FWM) occurring in optical fiber while transmitting multi-channel signal with frequency division multiplexing (FDM) is considered. The spectrum of FWM products with evenly spaced signals with FDC is considered. Approximation formula for product quantity calculation is suggested. The results calculated according to the formulas with the results of computer simulation are compared. The relative divergence of the results calculated according to the formulas and computer simulation does not exceed 3.3 %. Distribution according to FWM product spectrum while organizing two-wave transmission along a single fiber via FDM is considered. It is shown that the spectrum of FWM products has multi-peak character.

Keywords: fiber optic transmission systems, wavelength-division multiplexing, sub-carrier multiplexing, four-wave mixing.