

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ**Влияние фазовой самомодуляции и фазовой кросс-модуляции на OFDM-сигналы в волоконно-оптических сетях доступа****В.А.Варданян**

Рассматривается пассивная волоконно-оптическая система передачи ортогональных поднесущих каналов с квадратурно-фазовым и квадратурно-амплитудным форматами модуляции. Предложена методика оценки показателя качества сигнала при ортогональном частотном мультиплексировании каналов, основанная на преобразовании фазовых искажений канальных несущих в искажения уровней сигналов. Ухудшение показателя качества происходит из-за нелинейных явлений (фазовой самомодуляции и фазовой кросс-модуляции), а также шума оптического усилителя. Приводятся соотношения, позволяющие выбрать оптимальный уровень мощности оптического сигнала в зависимости от формата модуляции каналов.

Ключевые слова: пассивные оптические сети, спектральное разделение каналов, ортогональное частотное разделение каналов, фазовая самомодуляция, фазовая кросс-модуляция, Q-фактор.

1. Введение

По прогнозам аналитиков, существующие сети доступа, основанные на технологии пассивных оптических сетей (passive optical network – PON), в которых активное оборудование находится только на оконечных пунктах передачи и приема, а расстояния передачи небольшие (порядка нескольких десятков километров), в ближайшем будущем не смогут справляться с нарастающим дуплексным трафиком. Увеличение пропускной способности PON-сетей без существенных затрат на их реконструкцию является актуальной задачей. Применение методов частотного разделения каналов позволяет решить эту задачу и гарантированно обеспечить пользователей дуплексными широкополосными услугами и сервисами. При этом на первом этапе выгодно реализовать частотное разделение каналов в радиочастотном диапазоне и в дальнейшем, по мере развития PON-сетей, использовать мультиплексирование каналов в оптическом диапазоне (dense wavelengths division multiplexing – DWDM) [1–3].

Современные технические возможности цифровой обработки данных позволяют повышать спектральную эффективность с помощью технологии ортогонального частотного мультиплексирования (orthogonal frequency division multiplexing – OFDM) [4, 5]. В технологии OFDM передаваемые данные сначала распределяются по множеству частотных, ортогональных друг другу поднесущих, число которых может достигать тысячи, а затем происходит параллельная передача поднесущих сигналов. Несмотря на то что с увеличением числа каналов суммарная полоса частот расширяется, по отдельности частотные полосы поднесущих каналов являются сравнительно узки-

ми и неравномерности частотно-модуляционных характеристик оптических и оптоэлектронных компонент в системе передачи не оказывают существенного влияния на показатели качества передачи канальных сигналов. Поднесущие каналы OFDM-сигнала могут формироваться с помощью разных цифровых методов модуляции, например квадратурно-фазового (quadrature phase-shift keying – QPSK) или квадратурно-амплитудного формата модуляции разного уровня (quadrature amplitude modulation – M-QAM) [6].

Очевидно, что для увеличения пропускной способности оптических систем передачи OFDM-сигналов необходимо увеличивать число поднесущих каналов, что приводит к росту суммарной оптической мощности в волокне. Увеличение оптической мощности может породить в нем такие нелинейные явления, как четырехволновое смешение, фазовая самомодуляция (ФСМ) и фазовая кросс-модуляция (ФКМ) [7, 8]. Достаточно опасным для систем с частотным разделением каналов является четырехволновое смешение, когда из-за нелинейной восприимчивости третьего порядка в оптическом волокне возникают нежелательные комбинационные частотные составляющие, попадающие в частотные полосы каналов. Для поддержания требуемого качества сигнала необходимы ограничение числа каналов или уменьшение мощностей в них, использование неравномерных способов спектрального размещения каналов, применение технических решений, например методов компенсации четырехволнового смешения или методов помехоустойчивого кодирования сигналов [9].

Явление ФСМ возникает в оптическом волокне вследствие зависимости показателя преломления от интенсивности излучения и вызывает изменение фазы оптической несущей, пропорциональное интенсивности сигнала. В случае передачи OFDM-сигнала ФСМ проявляется в виде самовоздействия – уровень мощности в поднесущем канале влияет на его поднесущую частоту, приводя к частотной девиации поднесущей. Однако из-за небольшой мощности в поднесущих каналах влияние ФСМ на пока-

В.А.Варданян. Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Россия, 630102 Новосибирск, ул. Кирова, 86; e-mail: vardgesvardanyan@mail.ru

Поступила в редакцию 9 января 2018 г., после доработки – 9 февраля 2018 г.

затели качества канала незначительно по сравнению с влиянием ФКМ. В отличие от ФСМ, эффект ФКМ, как и четырехволновое смешение, возникает в частотно-разделенных многоканальных системах передачи, при этом эффективный показатель преломления волокна на определенной поднесущей частоте зависит не только от мощности сигнала в данном канале, но и от мощностей в других каналах.

Применительно к OFDM-сигналу ФКМ приводит к дополнительной фазовой модуляции поднесущих частот, величина которой зависит от мощностей в других каналах в момент наблюдения. В [7, 8] показано, что вклад ФКМ зависит от числа каналов, если каналы сформированы амплитудно-импульсными методами модуляции, и может стать фактором, ограничивающим пропускную способность системы передачи и обуславливающим уменьшение числа каналов или ограничение мощностей в них. При этом возможность использования фазовых форматов модуляции в поднесущих каналах, в которых информация «переносится» фазой, а не амплитудой сигнала, может привести к результативному усреднению оптической мощности и ослаблению роста вклада ФКМ с ростом числа каналов [10]. Кроме того, для повышения пропускной способности эффективным является формирование поднесущих каналов не только с фазовыми форматами модуляции, но и с многоуровневыми – амплитудно-фазовыми. Однако многоуровневые каналные сигналы больше подвержены фазовым искажениям, возникающим в оптическом тракте из-за ФСМ и ФКМ, т.к. дополнительная фазовая модуляция в каналах может преобразоваться во флуктуации амплитуд при передаче сигнала по оптическому тракту и привести к уменьшению показателей качества сигнала на приемной стороне.

Для компенсации потерь мощности сигнала в оптическом тракте применяются оптические усилители. В настоящее время коммерчески доступны и получили широкое применение эрбиевые оптические усилители (EDFA). Основным источником линейных помех, является усиленный спонтанный шум оптического усилителя ASE, возникающий во время фотодетектирования при смешивании спонтанного шума усилителя с OFDM-сигналом.

Отметим, что в настоящее время, в связи с увеличением загрузки магистральных волоконно-оптических систем передачи DWDM-каналами, широко исследуется искажение сигналов из-за нелинейных явлений в оптическом волокне. В работах [11–13] предложены модели, позволяющие оценить качество канальных сигналов при нелинейных искажениях, рассматривая последние как нелинейный шум, и обосновать аддитивное сложение мощностей нелинейного шума и шума оптического усилителя ASE, что подтверждается результатами экспериментальных исследований. В настоящей работе при оценке совместного влияния ФСМ, ФКМ и шума ASE на канальные сигналы учитываются результаты этих исследований.

Целью данной работы является оценка вкладов ФСМ и ФКМ в показатели качества передачи OFDM-сигнала, использующего в каналах форматы модуляции QPSK и M-QAM, в волоконно-оптических системах с прямым фотодетектированием. Оценка качества передачи сигнала проводится с помощью Q -фактора. Методика оценки Q -фактора основана на вычислении фазовых искажений канальных несущих из-за ФСМ и ФКМ и их преобразовании в искажения уровней сигналов. При анализе учитываются также шумы оптического усилителя, даются

рекомендации по выбору оптимального уровня оптической мощности в зависимости от формата модуляции канала.

2. Математическая модель

На рис.1 показана структурная схема волоконно-оптической системы передачи OFDM-сигнала. Информационные сигналы, используемые для передачи, преобразуются в OFDM-сигнал в формирователе OFDM, на выходе которого имеем N разнесенных по спектру каналов с частотами Ω_i ($i = 1, 2, \dots, N$). В зависимости от формата модуляции каждый канальный сигнал может модулироваться по амплитуде информационной сигнальной выборкой $S_i(k, t)$ с длительностью T_s , а также по фазе $\varphi_i(k, t)$, где k характеризует число значений (позиционность) модулируемого параметра сигнала. Например, если в каналах передаются сигналы QPSK, то $S_i(k, t) = \text{const}$, $\varphi(k, t) = (2k - 1)\pi/4$ ($k = 1, 2, 3, 4$). Для OFDM-сигнала частотный интервал между каналами $\Delta\Omega = 2\pi/T_s$. После объединения в сумматоре групповой многоканальный сигнал

$$S(t) = \sum_{i=1}^N S_i(k, t) \cos[\Omega_i t + \varphi_i(k, t)] \quad (1)$$

поступает на однополосный оптический модулятор (ОМ), на другой вход которого подается излучение с частотой ω_0 от когерентного источника, например от лазерного диода (ЛД). На выходе ОМ оптическое поле содержит спектральную составляющую E_0 на частоте ω_0 и верхнюю боковую полосу частот $\omega_1 - \omega_N$ (single sideband – SSB), где $\omega_i = \omega_0 + \Omega_i$ – оптические частоты i -х поднесущих каналов ($i = 1, 2, \dots, N$). Реализация однополосной оптической модуляции возможна, например, с использованием модулятора Маха–Цендера на кристалле LiNbO₃ с двойными электродами [14, 15]. Для компенсации потерь в оптическом тракте на передающей стороне используется оптический усилитель (ОУ).

Таким образом, в точке А (рис.1) формируется оптический OFDM-сигнал, спектр которого показан на рис.2 (левый рисунок). Распространяясь на расстояние L по волокну, оптический сигнал детектируется фотодиодом (ФД) и с помощью демодуляторов (ДМ) выделяются сигнальные выборки. Для оценки искажения сигнальных выборок из-за нелинейных явлений ФСМ, ФКМ, а также шума ОУ необходимо найти Q -фактор на выходах демодуляторов.

Если предположить, что ОМ имеет линейную модуляционную характеристику, то в точке А напряженность оптического поля определяется несущей с амплитудой E_0 и групповым однополосным сигналом

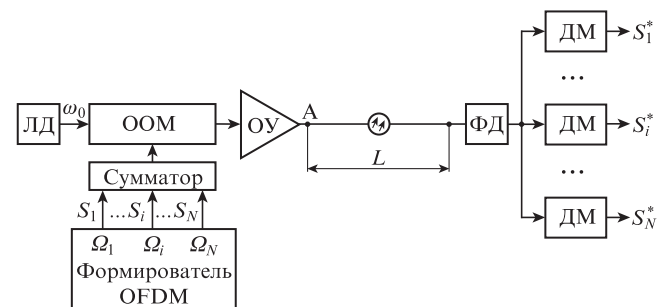


Рис.1. Структурная схема волоконно-оптической системы передачи OFDM-сигнала (см. текст).

$$E_{\text{SSB}}(t) = \sum_{i=1}^N E_i(t) = \sum_{i=1}^N E_i(k, t) \cos[\omega_i t + \varphi_i(k, t)], \quad (2)$$

где $E_i(k, t)$ – амплитуды поля, соответствующие многоуровневым сигнальным выборкам в i -м канале; $\varphi_i(k, t)$ – фазы сигнала в i -м канале.

Для дальнейшего анализа преобразуем (2) относительно некоторой фиктивной оптической частоты $\omega_f = (\omega_1 + \omega_N)/2$:

$$\begin{aligned} E_{\text{SSB}}(t) &= \sum_{i=1}^N E_i(k, t) \cos[(\omega_i - \omega_f)t + \omega_f t + \varphi_i(k, t)] \\ &= \sum_{i=1}^N E_i(k, t) \cos[(\omega_i - \omega_f)t + \varphi_i(k, t)] \cos(\omega_f t) \\ &\quad - \sum_{i=1}^N E_i(k, t) \sin[(\omega_i - \omega_f)t + \varphi_i(k, t)] \sin(\omega_f t) \\ &= A(t) \cos(\omega_f t) - B(t) \sin(\omega_f t), \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$A(t) = \sum_{i=1}^N E_i(k, t) \cos[(\omega_i - \omega_f)t + \varphi_i(k, t)], \quad (4)$$

$$B(t) = \sum_{i=1}^N E_i(k, t) \sin[(\omega_i - \omega_f)t + \varphi_i(k, t)]. \quad (5)$$

Как видно из (3), $E_{\text{SSB}}(t)$ представляет собой амплитудно-модулированное колебание на фиктивной частоте ω_f :

$$E_{\text{SSB}}(t) = E_m(t) \cos[\omega_f t + \phi(t)], \quad (6)$$

с амплитудой и фазой

$$E_m(t) = \sqrt{A^2(t) + B^2(t)}, \quad (7)$$

$$\tan \phi(t) = \frac{B(t)}{A(t)}. \quad (8)$$

Таким образом, многоканальный сигнал можно представить в виде амплитудно-модулированного колебания на фиктивной частоте ω_f с амплитудой $E_m(t)$, что схематично показано на рис.2 (правый рисунок). В этом случае анализ упрощается, т.к. вместо многоканального сигнала, состоящего из частотно-разделенных поднесущих каналов, рассматривается один фиктивный амплитудно-модулированный сигнал, мощность которого совпадает с мощностью группового однополосного сигнала. Следовательно, зная амплитуду этого фиктивного сигнала, мож-

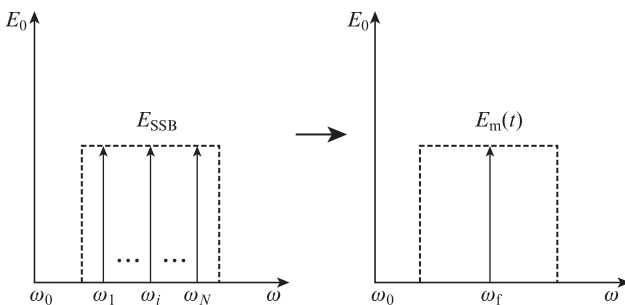


Рис.2. Спектр оптического OFDM-сигнала.

но найти его мощность. Подставив в (7) выражения (4), (5) и выполнив ряд тригонометрических преобразований, получим

$$\begin{aligned} E_m^2(t) &= \sum_{i=1}^N E_i^2(k, t) + \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq p}}^N \sum_{p=1}^N E_l(k, t) E_p(k, t) \\ &\quad \times \cos[(\omega_l - \omega_p)t + \varphi_l(k, t) - \varphi_p(k, t)]. \end{aligned} \quad (9)$$

Если предположить, что при однополосной оптической модуляции в точке А (рис.1) 50% входной оптической мощности ($P_{\text{in}0}$) сконцентрировано в оптической несущей, а остальная ее часть равномерно распределена между поднесущими каналами [14], то, учитывая, что мощность $P \propto E^2(t)$ и также то, что

$$\sum_{i=1}^N E_i^2(k, t) \approx N E_i^2 \approx \frac{P_{\text{in}0}}{2}, \quad E_l(k) E_p(k) \leq E_i^2,$$

имеем

$$\begin{aligned} P_{\text{SSB}}(t) &\leq \frac{P_{\text{in}0}}{2} \\ &\times \left\{ 1 + \frac{1}{N} \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq p}}^N \sum_{p=1}^N \cos[(\omega_l - \omega_p)t + \varphi_l(k, t) - \varphi_p(k, t)] \right\}. \end{aligned} \quad (10)$$

Итак, суммарная мощность в оптическом волокне определяется выражением

$$\begin{aligned} P_{\Sigma}(t) &\leq \frac{P_{\text{in}0}}{2} + P_{\text{SSB}}(t) \approx P_{\text{in}0} \\ &\times \left\{ 1 + \frac{1}{2N} \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq p}}^N \sum_{p=1}^N \cos[(\omega_l - \omega_p)t + \varphi_l(k, t) - \varphi_p(k, t)] \right\}, \end{aligned} \quad (11)$$

где $P_{\text{in}0}$ – среднее значение оптической мощности на входе волокна (в точке А). Второе слагаемое в (11) показывает флуктуации оптической мощности вблизи среднего значения во времени; величина флуктуаций зависит от разности частот и фактических фаз парных поднесущих канальных сигналов.

Явления ФСМ и ФКМ приводят к дополнительным фазовым сдвигам в поднесущих каналах. Нелинейный набег фазы зависит от суммарной оптической мощности в волокне [7, 8]:

$$\Phi_{\text{nl}}(t) = \gamma L_{\text{eff}} P_{\Sigma}(t), \quad (12)$$

где γ и L_{eff} – нелинейный коэффициент и эффективная длина оптического волокна соответственно. Для стандартного одномодового волокна (SSMF) имеем $\gamma = 1.2 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$, $L_{\text{eff}} = 12.6 \text{ км}$ при $L = 20 \text{ км}$.

Подставив (11) в (12) и учтя, что сдвиг фазы при ФСМ пропорционален мощности поднесущего канала, получим

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{SPM}} &= \gamma L_{\text{eff}} \frac{P_{\text{in}0}}{2N}, \\ \Phi_{\text{XPM}} &= \gamma L_{\text{eff}} \frac{P_{\text{in}0}}{2} \left\{ 2 - \frac{1}{N} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{N} \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq p}}^N \sum_{p=1}^N \cos[(\omega_l - \omega_p)t + \varphi_l(k, t) - \varphi_p(k, t)] \right\}, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\Phi_{nl}(t) = \Phi_{SPM} + \Phi_{XPM}. \quad (15)$$

Сравнивая (13) и (14), видим, что фазовый сдвиг при ФСМ не зависит от времени и незначителен по сравнению со сдвигом при ФКМ, т. к. оптическая мощность в пересчете на один поднесущий канал мала и составляет $P_{in0}/(2N)$. Фазовый сдвиг при ФКМ имеет среднее значение $\gamma L_{eff} P_{in0}$ и случайно флуктуирует в зависимости от передаваемых информационных символов. Если не рассматривать случайный характер передаваемых данных, то результирующее значение двойной суммы в (14) сильно зависит от числа каналов и составляет $N(N-1)$. В этом случае Φ_{XPM} в $\sim N^2$ раз больше, чем Φ_{SPM} . Такой подход чрезмерно переоценивает влияние ФКМ на поднесущие каналы и неприемлем для расчетов, поскольку не учитывает случайный характер информационных данных.

Для более точной оценки влияния фазового сдвига из-за ФКМ на поднесущие каналы проводилось компьютерное моделирование для расчета двойной суммы в (14) с учетом дискретного характера изменений фазы многопозиционных сигналов в поднесущих каналах. Компьютерное моделирование выполнялось в среде MathCAD с применением встроенных функций mean и stdev для расчета среднего значения и среднеквадратичного отклонения фазы σ_{ph} в течение одной выборки. Результаты моделирования показывают, что случайный характер изменения амплитудно-фазовых позиций в информационных сигналах в разных поднесущих каналах приводит к тому, что при $N > 32$ третье слагаемое в (14) описывается нормальным законом распределения фазы.

На рис.3,а приведен пример флуктуаций фазы оптической несущей в течение одной выборки при передаче $N = 128$ поднесущих каналов формата QPSK с частотным интервалом между ними 64 МГц. Видно, что ФКМ приводит к появлению высокочастотных (относительно канальных частот) флуктуаций фазы. На рис.3,б в виде гистограммы представлена плотность распределения фазы. Анализ показывает, что среднее значение флуктуирующей фазы стремится к нулю, а ее среднеквадратичное отклонение – к $\sigma_{ph} \approx 1/\sqrt{2} \approx 0.707$, что говорит о независимости среднеквадратичного значения $\langle \Phi_{XPM} \rangle$ от числа каналов при $N > 32$:

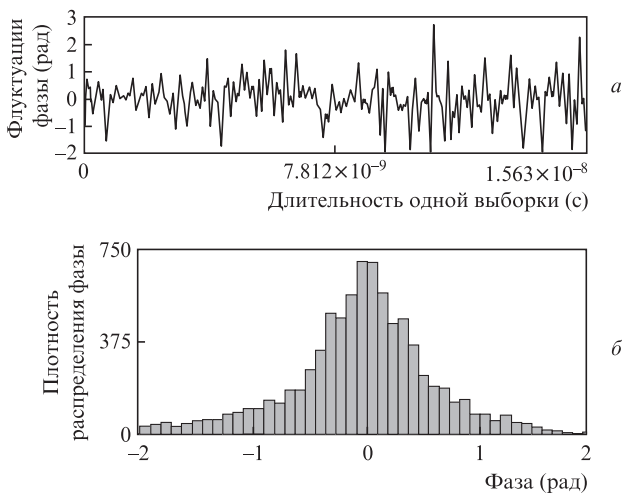


Рис.3. Пример флуктуаций фазы из-за ФКМ в течение одной выборки (а) и плотность распределения фазы (б) при передаче $N = 128$ поднесущих каналов формата QPSK с частотным интервалом между ними 64 МГц.

$$\langle \Phi_{XPM} \rangle \approx \gamma L_{eff} \frac{P_{in0}}{2} (2 + \sigma_{ph}) \approx 1.35 \gamma L_{eff} P_{in0}. \quad (16)$$

Сравнивая (13) и (16), видим, что значительный вклад в искажение сигнала вносит ФКМ, а вкладом ФСМ можно пренебречь уже при $N > 4$. Например, для волоконно-оптической системы передачи с длиной SSMF-волокна $L = 20$ км, числом каналов $N = 64$ и мощностью $P_{in0} \leq 10$ мВт расчетные сдвиги фаз таковы: $\Phi_{SPM} \leq 1.2 \times 10^{-3}$ и $\Phi_{XPM} \leq 0.2$. Эти нелинейные фазовые сдвиги получают все поднесущие каналы. Рассмотрим оптическое поле i -го поднесущего канала, достигшее ФД:

$$\begin{aligned} E_i(t) &= E_i(k, t) \cos[\omega_i t + \varphi_i(k, t) + \Phi_{nl}(t)] \\ &= E_i(k, t) \{ \cos[\omega_i t + \varphi_i(k, t)] \cos[\Phi_{nl}(t)] \\ &\quad - \sin[\omega_i t + \varphi_i(k, t)] \sin[\Phi_{nl}(t)] \}. \end{aligned} \quad (17)$$

Упростим (17), учитывая, что $\Phi_{nl} < 1$:

$$\begin{aligned} E_i(t) &\approx E_i(k, t) \cos[\omega_i t + \varphi_i(k, t)] \\ &\quad - E_i(k, t) \Phi_{nl}(t) \sin[\omega_i t + \varphi_i(k, t)]. \end{aligned} \quad (18)$$

При детектировании оптическая несущая смешивается с поднесущими сигналами и на выходе ФД имеем фототок I , пропорциональный величине $[E_0 \cos(\omega_0 t) + E_{SSB}(t)]^2$, усредненной на отрезке времени T , большем периода оптического поля:

$$\begin{aligned} I &\propto \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [E_0 \cos(\omega_0 t) + E_{SSB}(t)]^2 dt \\ &= \langle E_0^2 \cos^2(\omega_0 t) + 2E_0 E_{SSB}(t) \cos(\omega_0 t) + E_{SSB}^2(t) \rangle \\ &= \langle I_0 \rangle + \langle I_{av} \rangle + \langle I_n \rangle, \end{aligned} \quad (19)$$

где $\langle I_0 \rangle$ – постоянная составляющая фототока; $\langle I_{av} \rangle$ – средний фототок, соответствующий переданному OFDM-сигналу $S(t)$; $\langle I_n \rangle$ – усредненный шумовой ток, возникающий из-за шума биений между поднесущими (signal-signal beating noise – SSB). Отметим, что спектр шума биений занимает низкочастотную область и его влияние на поднесущие можно исключить, подобрав защитную полосу между несущей и OFDM-сигналом [4].

3. Q-фактор

Для того чтобы спрогнозировать искажения сигналов поднесущих каналов, возникающие в оптическом тракте из-за ФСМ и ФКМ, предположим, что процесс фотодетектирования и последующая демодуляция сигналов не вносят искажений. В этом случае фототок, соответствующий i -му каналу OFDM-сигнала,

$$\begin{aligned} \langle I_i \rangle &\propto \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T 2E_0 E_i(t) \cos(\omega_0 t) dt \propto S_i(k, t) \\ &\quad \times \{ \cos[\Omega_i t + \varphi_i(k, t)] - \Phi_{nl}(t) \sin[\Omega_i t + \varphi_i(k, t)] \}. \end{aligned} \quad (20)$$

Первое слагаемое в (20) представляет собой неискаженный переданный сигнал в i -м канале, а второе – квадратурное

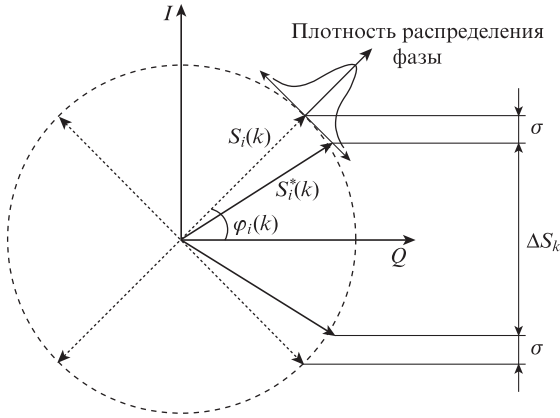


Рис.4. Переданная сигнальная выборка \$S_i(k)\$ и принятая выборка \$S_i^*(k)\$, искаженная из-за влияния ФСМ и ФКМ, на IQ-диаграмме QPSK-сигнала.

искажение сигнала в этом канале. На рис.4 на примере IQ-диаграммы, соответствующей QPSK-сигналу, в декартовой системе координат показано возникающее квадратурное искажение сигнала из-за влияния ФСМ и ФКМ для двух выборок информационного сигнала (\$k = 1\$ и \$4\$). Видно, что ФСМ и ФКМ приводят к появлению квадратурного шума со среднеквадратичным отклонением \$\sigma\$ при передаче каждой выборки сигнала.

Из рис.4 видно, что для сигнала QPSK среднеквадратичное отклонение шума \$\sigma\$ из-за ФКМ находится через абсолютное значение разности искаженной и неискаженной выборок: \$\sigma = |S_i^*(k) - S_i(k)| \cos[\varphi(k)]\$, где \$\varphi(k) = \pi/4\$. С другой стороны, \$|S_i^*(k) - S_i(k)|\$ определяется после демодуляции канального сигнала (20); эту разность можно найти из прямоугольного треугольника (рис.4), образованного катетом \$S_i(k)\$ и гипотенузой \$S_i^*(k)\$:

$$[S_i^*(k)]^2 = S_i^2(k) + S_i^2(k) \langle \Phi_{nl} \rangle^2,$$

откуда \$|S_i^*(k) - S_i(k)| \approx S_i(k) \langle \Phi_{nl} \rangle^2 / 2\$. Следовательно,

$$\sigma = S_i(k) \langle \Phi_{nl} \rangle^2 \cos[\varphi(k)] / 2. \tag{21}$$

Качество канального сигнала при приеме из-за нелинейного фазового сдвига определяется выражением [8]

$$Q_{XPM} = \frac{\Delta S_k^{\min}}{2\sigma} = \frac{\Delta S_k^{\min}}{S_i(k) \langle \Phi_{nl} \rangle^2 \cos[\varphi(k)]}. \tag{22}$$

При нормировке созвездий выборок многоуровневого сигнала минимальное расстояние между выборками информационного сигнала \$\Delta S_k^{\min} = \sqrt{2} / (\sqrt{M} - 1)\$ (\$M\$ – позиция сигнала [2, 3]). Тогда \$\Delta S_k^{\min} = \sqrt{2}\$ для QPSK, \$\sqrt{2}/3\$ для 16-QAM, \$\sqrt{2}/7\$ для 64-QAM и \$\sqrt{2}/15\$ для 256-QAM.

Учитывая (16), нормировку выборок (\$S_i(k) \to 1\$) и наилучшее положение соседних выборок с точки зрения показателя качества многоуровневых сигналов (\$\varphi(k) \to 0\$), получаем

$$Q_{XPM} \geq \frac{\Delta S_k^{\min}}{(1.35\gamma L_{eff} P_{in0})^2}. \tag{23}$$

Для упрощения анализа в (19) не учитывалась составляющая шума усиленной спонтанной эмиссии – шума ОУ, до-

стигнутого ФД, на выходе которого появляется дополнительный шумовой ток. Качество канального сигнала при приеме из-за влияния шума ASE определяется выражением [2, 3]

$$Q_{ASE} = \frac{\sqrt{P_{in0}} \Delta S_k^{\min}}{2N \sqrt{\hbar \omega_i \Delta \Omega F} / (2\pi)}, \tag{24}$$

где \$F\$ – коэффициент шума ОУ (в расчетах \$F = 4\$ дБ).

Для определения совместного влияния на качество сигнала шума ASE и шума от ФКМ необходимо учесть их случайный характер и независимость друг от друга, т.е. дисперсия результирующего шума равна сумме дисперсий каждого шума. Таким образом, суммарный \$Q_{\Sigma}\$-фактор может быть найден из соотношения [11–13, 16]

$$1/Q_{\Sigma}^2 \approx 1/Q_{XPM}^2 + 1/Q_{ASE}^2. \tag{25}$$

4. Результаты расчетов

Расчеты выполнялись по формулам (22)–(25) для форматов модуляции QPSK, 16-QAM, 64-QAM и 256-QAM. На рис.5 в качестве примера приведены зависимости \$Q\$-факторов от суммарной мощности в волокне при разном числе поднесущих каналов (\$N = 64, 128, 256\$ и \$512\$) с форматом модуляции QPSK. Этот рисунок соответствует случаю передачи OFDM-сигнала на длине волны 1.55 мкм по волокну SSMF с \$L = 20\$ км, когда частотный интервал между поднесущими составляет 64 МГц. На рис.5 показаны также прямые, ограничивающие \$Q\$-фактор по мощности, которые соответствуют ФКМ (\$Q_{XPM}\$) и четырехволновому смешению (\$Q_{FWM}\$). Отметим, что фактор \$Q_{FWM}\$ рассчитан по формулам, приведенным в [17]. Видно, что ограничивающим фактором является четырехволновое смешение, а не ФКМ. Это связано с тем, что частотный интервал между поднесущими относительно небольшой (до нескольких ГГц) и расстояние передачи составляет 20 км. При увеличении мощностей в каналах, когда суммарная оптическая мощность в волокне превысит 12 дБм, передача QPSK-сигналов станет невозможной, т.к. для достоверной передачи сигналов (без применения корректирующего кодирования) с вероятностью ошибки \$10^{-12}\$ необходимо, чтобы \$Q_{\Sigma} > 17\$ дБ [18]. Увеличение числа каналов при суммарной оптической мощности в волокне до 12 дБм приводит к уменьшению суммарного \$Q_{\Sigma}\$-фактора за счет

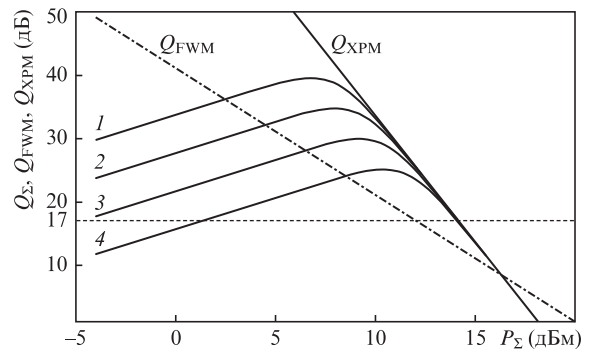


Рис.5. Зависимости \$Q\$-факторов от суммарной мощности \$P_{\Sigma}\$ в оптическом волокне SSMF длиной 20 км для поднесущих каналов формата QPSK с частотным интервалом 64 МГц при \$N = 64\$ (1), 128 (2), 256 (3) и 512 (4).

влияния шума ASE, поскольку при тех же уровнях шума уменьшается мощность в расчете на один канал. Увеличение числа каналов в два раза уменьшает суммарный Q_{Σ} -фактор на ~ 6 дБ. Таким образом может возникнуть ситуация, когда кроме ограничения сверху, необходимо обеспечить минимальный уровень суммарной оптической мощности в волокне. Так, например, на рис.5 при передаче $N = 512$ поднесущих минимальная оптическая мощность должна превышать +1.4 дБм.

Ситуация меняется когда в поднесущих каналах используются амплитудно-фазовые методы модуляции. Анализ показывает, что при частотном интервале между поднесущими не более 1 ГГц и для форматов модуляции M -QAM, где $M > 16$, ФКМ становится доминирующим нежелательным явлением. На рис.6 представлен пример зависимости Q -факторов от суммарной мощности в волокне при разном числе поднесущих каналов ($N = 64, 128, 256$ и 512) для формата модуляции 64-QAM. Как и при передаче сигналов QPSK, частотный интервал между поднесущими составляет 64 МГц. Сравнивая рис.5 и 6, видим, что сигналы с форматом модуляции M -QAM примерно в $\sqrt{M} - 1$ раз менее помехоустойчивы, чем при QPSK. Более того, при числе каналов $N > 128$, когда $Q_{\Sigma} < 17$ дБ, в каналах требуется применение технологии упреждающей коррекции ошибок (forward error correction – FEC) [15].

Отметим, что если поддерживать оптическую мощность в волокне на заданном уровне, то вклад нелинейных помех при четырехволновом смешении не зависит от числа каналов (если $N \geq 64$) [17]. Результаты расчетов шумов из-за ФКМ показывают для них аналогичную закономерность. Более того, из расчетов следует, что шумы из-за ФКМ несильно зависят от вариации частотного интервала между поднесущими, если максимальный частотный интервал не превышает 1 ГГц, в отличие от четырехволнового смешения, при котором небольшие частотные интервалы между каналами приводят к сильному взаимодействию каналов [9]. С другой стороны, увеличение частотного интервала между поднесущими обуславливает заметный вклад шума ASE. Поэтому при проектировании волоконно-оптических систем передачи OFDM-сигналов с заданными критериями качества необходимо выбирать компромиссные решения, учитывая не только частотный интервал между каналами, формат модуляции сигналов и шумы ОУ, достигшие ФД, но и влияние ФКМ и четырехволнового смешения на сигналы.

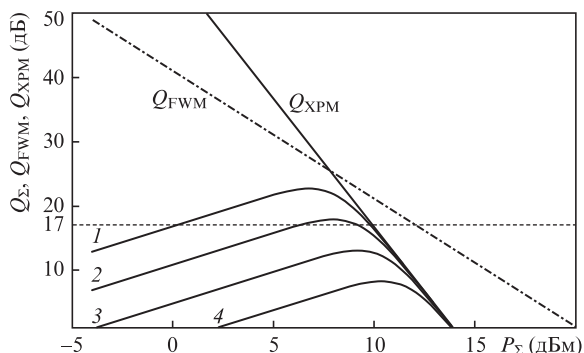


Рис.6. Зависимости Q -факторов от суммарной мощности P_{Σ} в оптическом волокне SSMF длиной 20 км для поднесущих каналов формата 64-QAM с частотным интервалом 64 МГц при $N = 64$ (1), 128 (2), 256 (3) и 512 (4).

5. Заключение

В настоящей работе рассмотрена волоконно-оптическая система передачи OFDM-сигналов, в которой поднесущие каналы имеют форматы модуляции QPSK и M -QAM. Предложена методика оценки показателя качества OFDM-сигнала при ФСМ и ФКМ. Анализ показывает следующее:

– Влияние ФСМ и ФКМ на качество сигнала не зависит от числа поднесущих каналов в OFDM-сигнале при их достаточно большом числе (более 32), а также от частотного интервала между ними, если оптическая мощность в волокне поддерживается постоянной.

– На практике влиянием ФСМ на поднесущие каналы OFDM-сигнала можно пренебречь из-за малой мощности в этих каналах.

– Для обеспечения требуемой помехозащищенности необходимо ограничивать суммарную оптическую мощность в волокне. Менее подвержены ФКМ сигналы с форматом модуляции QPSK, более подвержены – с форматом модуляции M -QAM. При $M = 16$ вклад от ФКМ оказывается соизмеримым со вкладом от четырехволнового смешения, а при $M \geq 64$ ФКМ становится доминирующим ограничивающим шумовым фактором.

– Минимальная оптическая мощность в поднесущих каналах необходима для преодоления влияния шума усиленной спонтанной эмиссии оптического усилителя. Эта мощность зависит от частотного интервала между поднесущими каналами и их числа в OFDM-сигнале.

Полученные результаты могут использоваться при проектировании пассивных оптических сетей с применением технологии OFDM и показывают необходимость учета возникающего в оптическом волокне нелинейного явления ФКМ, особенно при передаче M -QAM-сигналов.

1. Варданян В.А. *Электросвязь*, **7**, 61 (2017).
2. Vardanyan V.A. *Optoelectron. Instrum. Data Process.*, **52** (3), 311 (2016).
3. Варданян В.А. *Докл. ТУСУР*, **20** (1), 33 (2017).
4. Erkiñç M.S., Pachnicke S., Griesser H., Thomsen B.C., Bayvel P., Killey R.I. *IEEE J. Lightwave Technol.*, **33** (10), 2038 (2015).
5. Armstrong J. *IEEE J. Lightwave Technol.*, **27** (3), 189 (2009).
6. Vardanyan V.A. *Optoelectron. Instrum. Data Process.*, **51** (6), 544 (2015).
7. Shneider T. *Nonlinear Optic in Telecommunications* (Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag, 2004).
8. Agrawal G.P. *Lightwave Technology: Telecommunication Systems* (Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005).
9. Vardanyan V.A. *Optoelectron. Instrum. Data Process.*, **53** (1), 51 (2017).
10. Листвин В.Н., Трещиков В.Г. *DWDM системы* (М.: Наука, 2013).
11. Жителев А.Е., Коньшев В.А., Лукиных С.Н., Наний О.Е., Трещиков В.Н., Убайдуллаев Р.Р. *Квантовая электроника*, **47** (12), 1135 (2017) [*Quantum Electron.*, **47** (12), 1135 (2017)].
12. Гуркин Н.В., Коньшев В.А., Наний О.Е., Новиков А.Г., Трещиков В.Н., Убайдуллаев Р.Р. *Квантовая электроника*, **45** (1), 69 (2015) [*Quantum Electron.*, **45** (1), 69 (2015)].
13. Гуркин Н.В., Наний О.Е., Новиков А.Г., Плаксин С.О., Трещиков В.Н., Убайдуллаев Р.Р. *Квантовая электроника*, **43** (6), 550 (2013) [*Quantum Electron.*, **43** (6), 550 (2013)].
14. Hui R., Zhu B., Huang R., et al. *IEEE J. Lightwave Technol.*, **20** (3), 417 (2002).
15. Gutierrez F.A., Perry P., Smyth F., et al. *IEEE/OSA J. Opt. Commun. Networking*, **7** (4), 248 (2015).
16. Shiva Kumar. *Impact of Nonlinearities on Fiber Optic Communications* (New York–Dordrecht–Heidelberg–London: Springer, 2011).
17. Vardanyan V.A. *Meas. Tech.*, **60** (7), 724 (2017).
18. ITU-T Recommendation, Ser. 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