

УДК 621.391.6

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ И КОМПЕНСАЦИЯ ШУМА БИЕНИЙ МЕЖДУ ПОДНЕСУЩИМИ OFDM-СИГНАЛА В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ С ПРЯМЫМ ФОТОДЕТЕКТИРОВАНИЕМ

В. А. Варданян

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

Разработана математическая модель для расчёта шума биений, возникающих во время фотодетектирования однополосного оптического сигнала с множеством ортогональных поднесущих каналов. Модель позволяет оценить спектральное распределение шума биений, а также искажения уровней поднесущих из-за дисперсии волокна. Исследуются влияние шума биений на ортогональные поднесущие каналы, способы увеличения пропускной способности системы передачи и метод компенсации шума на принимающей стороне.

Ключевые слова: волоконно-оптические системы передачи, прямое фотодетектирование, интерференционный шум биений между сигналами (SSBI), ортогональное частотное мультиплексирование (OFDM), однополосная оптическая модуляция (SSB), Q -фактор.

DOI: 10.15372/AUT20180312

Введение. Стремительный рост интернет-технологий и широкополосного мультимедийного трафика в оптических сетях доступа требует увеличения их пропускной способности. Для этого необходимо в первую очередь обеспечить спектральную эффективность волоконно-оптических систем передачи (ВОСП). Очевидно, что в высокоскоростных магистральных ВОСП, используемых на сверхдальних расстояниях, решить данную проблему возможно с помощью когерентного детектирования на принимающей стороне [1, 2]. В сетях доступа применение технологии когерентного приёма, требующего более сложного пользовательского оборудования в принимающей части, на сегодняшний день экономически невыгодно, так как это приводит к удорожанию всей сети [3, 4]. Актуальной задачей является увеличение пропускной способности сети доступа без существенных затрат на реконструкцию оптической инфраструктуры. В связи с этим альтернативой когерентному приёму может стать прямое фотодетектирование совместно с технологией ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM — Orthogonal Frequency Division Multiplexing) [5, 6]. Технология OFDM позволяет применять современные методы цифровой обработки сигналов на передающей и принимающей сторонах, не затрагивая и не усложняя оптической инфраструктуры сети. В технологии OFDM передаваемые данные распределяются по множеству частотных ортогональных друг другу поднесущих и происходит параллельная передача поднесущих сигналов. Для реализации этой технологии на передающей стороне применяется обратное быстрое преобразование Фурье, меняющее временное представление сигнала на частотное. Таким образом, по параллельным поднесущим каналам передаются сигнальные выборки, вследствие чего полоса частот используется эффективно. На принимающей стороне происходит прямое преобразование Фурье, трансформирующее сигнал из частотного представления во временное.

Для обеспечения спектральной эффективности в оптическом диапазоне применяются методы однополосной модуляции (SSB — Single Sideband) оптической несущей и техноло-

гия плотного спектрального мультиплексирования (DWDM — Dense Wavelengths Division Multiplexing) [7, 8]. Однако при однополосной реализации OFDM-сигнала и передаче его по оптическому волокну происходит не только искажение уровней поднесущих из-за хроматической дисперсии, но и при фотодетектировании возникают шумы биений между поднесущими, которые в спектре фототока располагаются в низкочастотной области [9, 10]. Эти шумы не позволяют использовать всю полосу пропускания волоконно-оптического линейного тракта. При формировании оптического сигнала приходится оставлять защитную полосу между OFDM-сигналом и оптической несущей, чтобы после фотодетектирования шумы биений не попали в полосу полезного OFDM-сигнала, что приведёт к ухудшению показателя спектральной эффективности. Одним из способов повышения спектральной эффективности является увеличение полосы OFDM-сигнала за счёт уменьшения защитной полосы. Однако в этом случае необходимо иметь возможность спрогнозировать спектральное распределение шумов биений, так как они попадают в поднесущие каналы, и возникает трудность отделения сигнала от шума.

Цель данного исследования — разработка математической модели для расчёта уровней шумов биений и их спектрального распределения, что позволит найти технические решения для минимизации влияния этих шумов на сигналы.

Структурная схема ВОСП и математическое обоснование методики расчёта. На рис. 1 показана функциональная схема ВОСП OFDM, адаптированная к предложенной математической модели. Информационные сигналы S_i поступают на соответствующие модуляторы (Мод.), на другие входы которых поданы поднесущие частоты, формируемые в генераторе ортогональных поднесущих частот (ГОПЧ). Для ГОПЧ некоторой опорной частотой является ω_n , вырабатываемая высокостабильным генератором опорной частоты (Γ). На выходе оборудования ГОПЧ имеем поднесущие частоты OFDM-сигнала, величины которых кратны опорной частоте ω_n . На выходе каждого модулятора поднесущих имеем сигнал, спектр которого сосредоточен на определённой поднесущей частоте $\omega_i = i\omega_n$ ($i \in 1, 2, \dots, N$), а минимумы спектра попадают в максимумы соседних поднесущих каналов [6]. После суммирования сигналов всех модуляторов формируется электрический OFDM-сигнал, поступающий на оптический однополосный модулятор (ОМ). На выходе ОМ имеем спектральное распределение, состоящее из оптической несущей и одной боковой полосы шириной B , соответствующей полосе OFDM-сигнала (рис. 2, а).

Далее оптический сигнал вводится в волокно и распространяется на расстояние L . На выходе волокна оптический сигнал поступает на фотодетектор (ФД) и происходит демодуляция (Демод.) сигнальных выборок OFDM-сигнала S_i^* на приёме. Очевидно, что переданные выборки S_i не равны принятым S_i^* из-за искажения сигнала при его распространении по дисперсионному оптическому волокну. В [6] показано, что дисперсионность волокна приводит к деградации уровня высокочастотных (ВЧ) поднесущих OFDM-сигнала. При

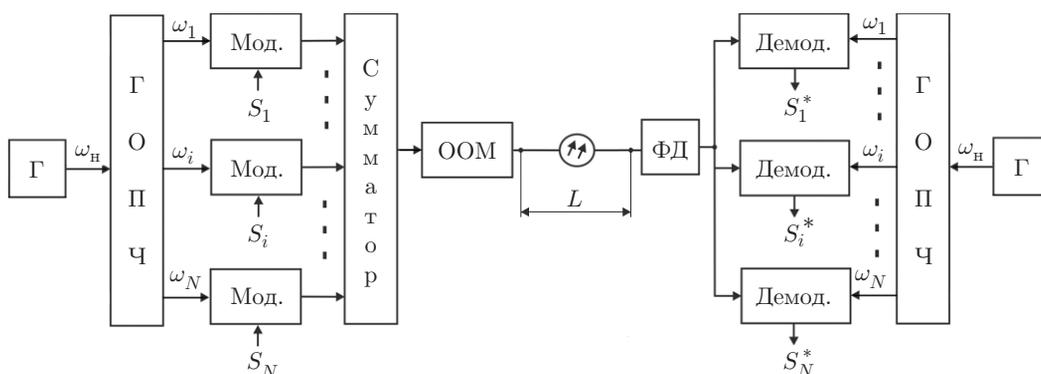


Рис. 1. Функциональная схема ВОСП OFDM

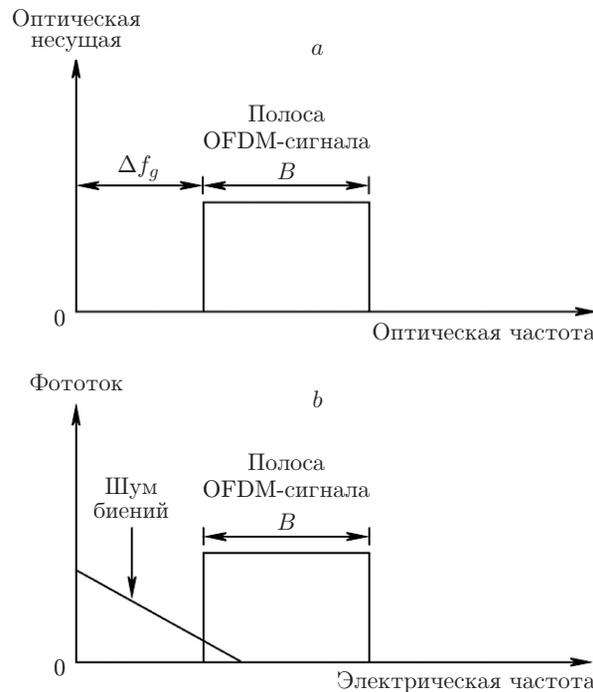


Рис. 2. Спектры OFDM-сигнала: *a* — оптический спектр; *b* — спектр сигнала после фотодетектирования при $\Delta f_g < B$

использовании однополосных оптических OFDM-сигналов к этому явлению добавляется шум биений, возникающий между поднесущими при фотодетектировании оптического сигнала. На рис. 2, *b* схематично показаны электрический спектр OFDM-сигнала и спектр шума биений. Как видим, шум биений в частотной области сконцентрирован ниже ширины полосы OFDM-сигнала. Шумы могут попасть в диапазоны низкочастотных поднесущих OFDM-сигнала и ухудшить отношение сигнал/шум. Для минимизации данного явления и предназначена защитная частотная полоса между OFDM-сигналом и оптической несущей Δf_g , величина которой должна быть равна или больше полосы OFDM-сигнала B . Однако в этом случае уменьшается спектральная эффективность.

Математическая модель для определения спектрального распределения шума биений, а также его влияния на OFDM-сигнал основана на гармоническом анализе периодических сигналов [6, 11]. В [6] получено выражение напряжённости оптического поля на расстоянии L при использовании на передающей стороне обыкновенного оптического модулятора:

$$E(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} \sum_{k=0}^{\infty} a_k \cos((\omega_0 - k\omega_H)t + k\varphi_1 - k^2\varphi_2) + \frac{\sqrt{2}}{2} \sum_{k=0}^{\infty} a_k \cos((\omega_0 + k\omega_H)t - k\varphi_1 - k^2\varphi_2), \quad (1)$$

где a_k — коэффициенты ряда Фурье, полученные при предположении, что OFDM-сигнал периодический (сумма ортогональных периодических сигналов является периодической относительно независимой переменной $\omega_H t$):

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \left(\sqrt{1 + \sum_i m_i \cos(i\omega_H t)} \right) \cos(k\omega_H t) d(k\omega_H t) \quad (2)$$

(m_i — глубина оптической модуляции поднесущей на частоте $i\omega_H$, здесь и далее предполагаем, что уровни поднесущих одинаковы на передаче); $\varphi_1 = \beta_1 L \omega_H$ — фазовый сдвиг, характеризующий групповое время запаздывания сигнала; $\varphi_2 = (1/2)\beta_2 L \omega_H^2$ — фазовый

сдвиг, характеризующий дисперсию группового времени запаздывания (β_1 и β_2 — первая и вторая производные постоянной распространения на оптической частоте ω_0).

Как видим из (1), оптическое поле состоит из несущей частоты ω_0 и двух боковых полос OFDM-сигнала с частотами $\omega_k = \pm k\omega_H$, $k \in 1, 2, \dots, N$. При использовании однополосной модуляции имеем несущую частоту и одну боковую полосу сигнала:

$$E(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} \sum_{k=0}^{\infty} a_k \cos((\omega_0 - k\omega_H)t + k\varphi_1 - k^2\varphi_2). \quad (3)$$

Выражение (3) получено в предположении, что в ООМ сначала происходит двухполосная модуляция, а затем фильтрация одной боковой полосы, что не является существенным и не влияет на дальнейший анализ и результаты.

После ряда тригонометрических операций (3)

$$E(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} \left\{ a_0 \cos(\omega_0 t) + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos(k(\omega_H t - \varphi_1)) \cdot \cos(\omega_0 t - k^2\varphi_2) + \right. \\ \left. + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos(k(\omega_H t - \varphi_1)) \cdot \sin(\omega_0 t - k^2\varphi_2) \right\}. \quad (4)$$

На принимающей стороне после фотодетектирования фототок пропорционален интенсивности [12], т. е. пропорционален значению $(E(t))^2$, усреднённому по отрезку времени T , большому по сравнению с периодом оптического поля. В итоге после выполнения всех операций усреднения по времени получим

$$I \sim \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (E(t))^2 dt = \frac{a_0^2}{4} + \frac{1}{4} \sum_{k=1}^{\infty} a_k^2 + \\ + \frac{1}{4} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{\substack{l=1 \\ k \neq l}}^{\infty} a_k a_l \cos((k^2 - l^2)\varphi_2) \cdot \cos((k - l)(\omega_H t - \varphi_1)) + \\ + \sum_{k=1}^{\infty} a_0 a_k \cos(k^2\varphi_2) \cdot \cos(k(\omega_H t - \varphi_1)) - \sum_{k=1}^{\infty} a_0 a_k \sin(k^2\varphi_2) \cdot \sin(k(\omega_H t - \varphi_1)). \quad (5)$$

Приведём (5) к виду, удобному для спектрального анализа фототока. Два первых слагаемых характеризуют постоянную составляющую фототока:

$$S_0 = \frac{a_0^2}{4} + \frac{1}{4} \sum_{k=1}^{\infty} a_k^2. \quad (6)$$

После замены переменной в третьем слагаемом (5) ($i = k - l$, $k = l + i$, $k^2 - l^2 = 2li + i^2$) будем иметь $\sum_{i=1}^{\infty} S_i^{\text{noise}} \cos(i(\omega_H t - \varphi_1))$, где

$$S_i^{\text{noise}} = \frac{1}{4} \sum_{l=1}^{\infty} a_l a_{l+i} \cos((2li + i^2)\varphi_2). \quad (7)$$

После объединения последних двух слагаемых (5) получим $\sum_{i=1}^{\infty} S_i^* \cos(i(\omega_H t - \varphi_1) + i^2\varphi_2)$, где

$$S_i^* = a_0 a_i. \quad (8)$$

С учётом (6)–(8) выражение (5) для фототока примет вид

$$I \sim S_0 + \sum_{i=1}^{\infty} S_i^{\text{noise}} \cos(i(\omega_{\text{H}}t - \varphi_1)) + \sum_{i=1}^{\infty} S_i^* \cos(i(\omega_{\text{H}}t - \varphi_1) + i^2\varphi_2). \quad (9)$$

Выражение (9) показывает, что кроме постоянной составляющей S_0 и полезного OFDM-сигнала с уровнями поднесущих S_i^* в спектре присутствует шум на частотах $\omega_i = i\omega_{\text{H}}$ ($i \in 1, 2, \dots, N$). Уровень шума на частоте с индексом i обозначен S_i^{noise} и определяется с помощью (7). Уровни OFDM-сигнала S_i^* находятся с использованием (8), однако на них влияет фазовый сдвиг $i^2\varphi_2$ ($i \in 1, 2, \dots, N$), определяемый хроматической дисперсией оптического волокна, приводящий к уменьшению уровня ВЧ-поднесущих полезного сигнала по мере его распространения по волокну по закону $\sim(\cos(i^2\varphi_2))$.

Следовательно, качество сигнала в i -м поднесущем канале на приёме после ФД из-за влияния шума биений (SSBI — Signal to Signal Beat Interference) можно оценить, определив уровень сигнала относительно шума [7, 12]:

$$Q_i^{\text{SSBI}} \simeq \frac{S_i^*(1) - S_i^*(0)}{S_i^{\text{noise}}(1) + S_i^{\text{noise}}(0)} \geq \frac{S_i^*}{2S_i^{\text{noise}}}, \quad (10)$$

где $S_i^*(0)$, $S_i^{\text{noise}}(0)$ — средние значения уровней тока сигнала и шума биений в i -м поднесущем канале при передаче логического «0»; $S_i^*(1)$, $S_i^{\text{noise}}(1)$ — средние значения уровней тока сигнала и шума биений в i -м поднесущем канале при передаче логической «1». Для оценки влияния шума биений на изменение уровня в поднесущих каналах достаточно рассмотреть передачу обыкновенных импульсных сигналов. В этом случае логической «1» будет соответствовать присутствие импульса на данной поднесущей частоте, а «0» — отсутствие импульса, т. е. $S_i^*(0) = 0$. Более того, при этом будем предполагать, что во всех остальных каналах передаётся «1» и $S_i^{\text{noise}}(1) \approx S_i^{\text{noise}}(0)$ (наихудший случай).

Кроме того, даже при отсутствии шума биений и дисперсии в волокне ($\Delta f_g \geq B$, идеальная среда передачи с точки зрения дисперсии) на принимающей стороне присутствует шум оптоэлектронных модулей, используемых в оборудовании, а также нелинейный шум, возникающий во время клиппирования OFDM-сигнала на передающей стороне для устранения больших пиковых выбросов [5, 9, 10]. Далее эти и другие технические шумы предусмотрим в параметре Q_0 — требуемом показателе качества OFDM-сигнала без учёта шума биений и дисперсионных искажений сигнала. Очевидно, что присутствие шума биений и хроматическая дисперсия в волокне приведут к уменьшению суммарного Q -фактора в поднесущем канале i :

$$Q_{\Sigma} \simeq \frac{\cos(i^2\varphi_2)}{1/Q_i^{\text{SSBI}} + 1/Q_0}. \quad (11)$$

Таким образом, если задаться требуемым значением Q_0 , типом оптического волокна, расстоянием передачи, частотным интервалом между поднесущими и их количеством, то с помощью (7)–(11) можно оценить качество сигнала на принимающей стороне. Анализ показывает, что для минимизации расчётов при моделировании без существенных потерь точности можно в (7)–(9) ограничить верхний предел суммирования, конкретное значение которого будет зависеть от требуемой частотной области исследования. Так, например, для исследования спектра шума биений в частотной области от 0 до $2B$ достаточно ограничить верхний предел суммирования соответствующим индексом последнего поднесущего канала [6].

Результаты компьютерного моделирования и способы увеличения полосы OFDM-сигнала без применения схем компенсации шума биений. Для определения спектрального распределения шума биений, его влияния на OFDM-сигнал, а также оценки влияния хроматической дисперсии на сигнал проводились компьютерное моделирование передачи однополосного OFDM-сигнала с частотной полосой B на длине волны 1550 нм по стандартному одномодовому оптическому волокну (SSMF — Standard Single Mode Fiber) на расстояние 20 км, фотодетектирование оптического сигнала и спектральный анализ полученного фототока. На рис. 3 приведён пример спектра фототока для случая передачи 32 поднесущих с частотным интервалом $\Delta f = 128$ МГц при защитной полосе $\Delta f_g = 32\Delta f \simeq B$. Как видно из рисунка, уровень шума биений ниже уровня OFDM-сигнала и в основном сконцентрирован в защитной полосе Δf_g . Начиная с частоты Δf до $28\Delta f$, относительный уровень шума постепенно убывает (от $-16,9$ до -39 дБ), а при увеличении частот до частотной полосы OFDM-сигнала принимает незначительные величины относительно сигнала. Компьютерное моделирование подтверждает, что уровни шумов биений определяются (7) и присутствуют во втором слагаемом в выражении (9).

На рис. 3 также показана незначительная деградация ($\sim 1,5$ дБ) уровней поднесущих OFDM-сигнала (обозначено ΔS^*), что ярко выражается в последней по спектру поднесущей. Это связано с дисперсией сигнала в SSMF-волокне, удельная хроматическая дисперсия которого $D = 18$ пс/(нм · км). Уровни S_i^* поднесущих OFDM-сигнала определяются с помощью (8) и присутствуют в третьем слагаемом в выражении (9).

Таким образом, полоса пропускания OFDM-сигнала в частотной области ограничивается сверху полосой пропускания оптических модуляторов, а также дисперсионными искажениями сигнала при его распространении по волокну [6, 12]. Для минимизации влияния дисперсии оптического волокна на сигналы возможно применение компенсационных схем в оптическом тракте или предкомпенсация на передающей стороне, что позволит увеличить пропускную способность системы за счёт увеличения поднесущих каналов в ВЧ-области OFDM-сигнала. Однако эти технические решения могут стать экономически не выгодными для сетей доступа. Ограничение снизу по частоте OFDM-сигнала связано с появлением шума биений между поднесущими сигналами. Для дальнейшего анализа примем полосу пропускания линейного оптического тракта равной $2B$.

Как следует из рис. 3, увеличение полосы OFDM-сигнала возможно за счёт уменьшения ширины защитной полосы таким образом, чтобы уровни шумов, попадающие в диапазон полезного сигнала, не ухудшали требуемые качественные показатели самого сигнала. Каков предел уменьшения ширины защитной полосы, при котором качество сигнала удовлетворяет условиям безошибочного приёма? Ответ на этот вопрос даёт моделирование

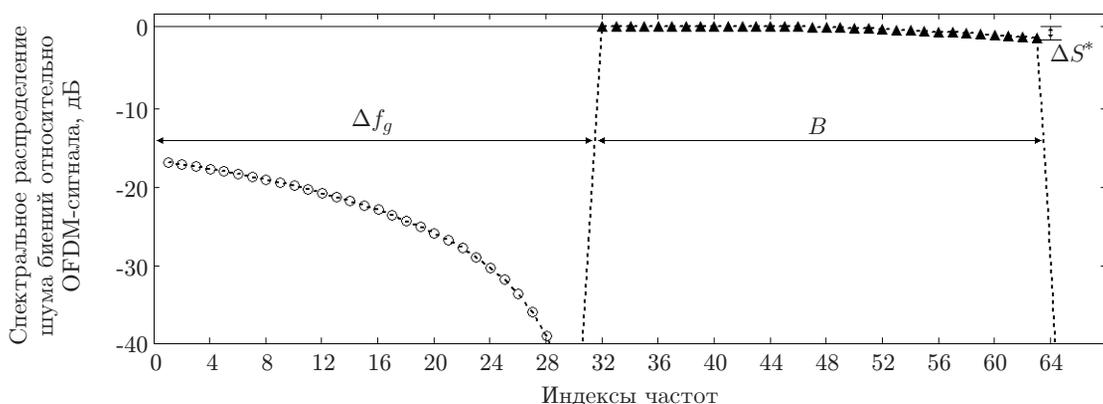


Рис. 3. Спектральное распределение шума биений (круглые метки) относительно уровня 32 поднесущих (треугольные метки) после фотодетектирования при $\Delta f_g = 32\Delta f$

процесса передачи OFDM-сигнала с варьируемой шириной полосы, но не превышающей значения $2B$. Чтобы вероятность появления ошибки (BER — Bit Error Rate) была менее 10^{-12} , величина Q -фактора должна быть выше 17 дБ. Это справедливо, если в аппаратуре системы передачи не применяется цифровая обработка данных — прямая (или упреждающая) коррекция ошибок (FEC — Forward Error-Correction Coding). В предлагаемой работе $Q_0 = 19$ дБ. Алгоритм кодирования FEC первого поколения позволяет при той же величине $BER = 10^{-12}$ уменьшить Q -фактор до 11 дБ, а FEC 2-го поколения — приблизительно до 8,5 дБ [13, 14]. Проводилось компьютерное моделирование передачи в частотной полосе $2B$ однополосного OFDM-сигнала с разными шириной защитной полосы $\Delta f_g < B$ и шагом Δf , где Δf изменялся от 128 МГц до 2048 ГГц с шагом 128 МГц.

На рис. 4, *a* показан пример значений суммарного Q -фактора в каждом поднесущем канале (количество поднесущих равно 64) при параметрах системы $2B = 64\Delta f = 8192$ МГц, $\Delta f = 128$ МГц, $\Delta f_g = 0$. Применение корректирующего кодирования обязательно для каналов с 1 до 56, так как эти поднесущие каналы OFDM-сигнала сильнее других подвержены влиянию шума биений [9]. В поднесущих каналах с индексами от 1 до 14 можно применить FEC 2-го поколения, а в каналах от 15 до 56 — FEC 1-го поколения. Таким образом, применение корректирующего кодирования в каналах позволяет использовать всю полосу $2B$. Если ограничиться только способом кодирования FEC 1-го поколения (по технико-экономическим соображениям), то результаты моделирования показывают, что для достижения необходимого качества передачи сигналов требуется предусмотреть защитную по-

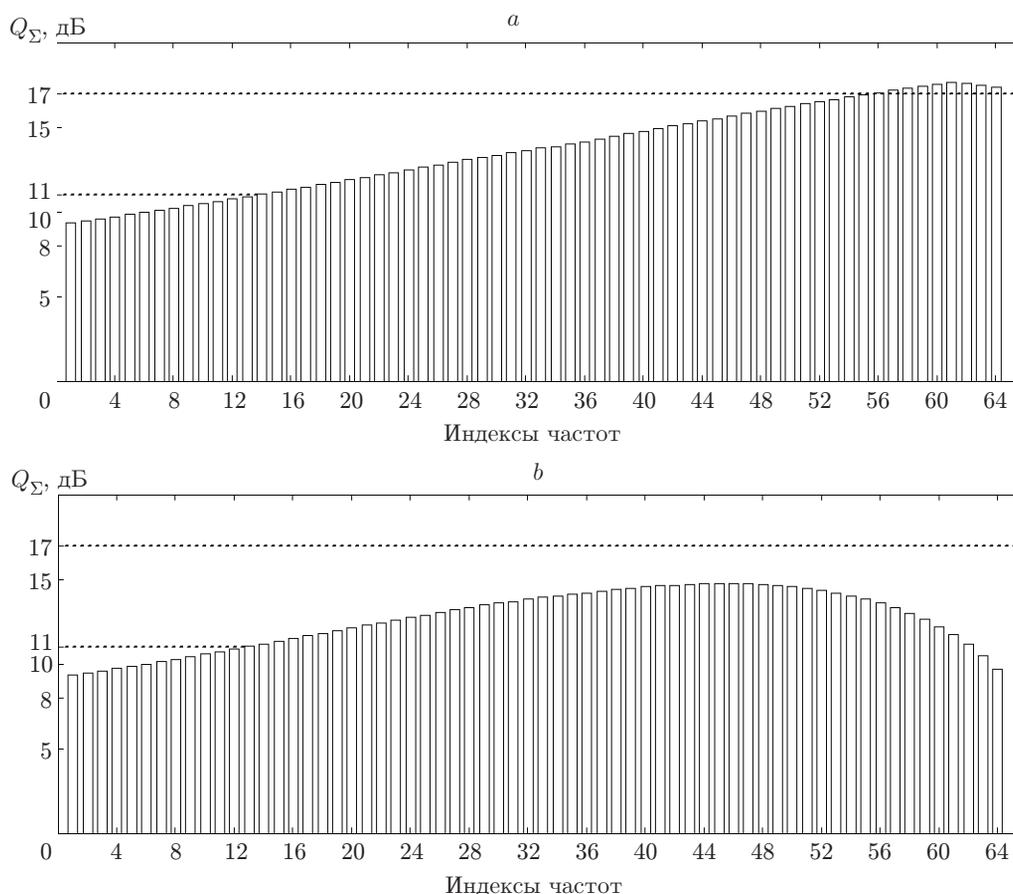


Рис. 4. Значения суммарного Q -фактора в 64 поднесущих при передаче OFDM-сигнала: *a* — на расстояние $L = 20$ км, *b* — $L = 40$ км

Типы ВОСП OFDM		Суммарная полоса	Полоса OFDM-сигнала	Защитная полоса Δf_g	Спектральная эффективность
ВОСП OFDM без FEC		$2B$	B	B	50 %
ВОСП OFDM с FEC	FEC 1-го поколения	$2B$	$(3/2)B$	$(1/2)B$	75 %
	FEC 2-го поколения	$2B$	$2B$	0	100 %

лосу, составляющую не менее четвертой части всей полосы $2B$ (индексы частот находятся между 1–16). Искажения поднесущих проявляются также в ВЧ-области спектра OFDM-сигнала, что связано с дисперсионными искажениями сигнала. Моделирование процесса передачи на ещё большие расстояния показало, что использование корректирующего кодирования во всех каналах OFDM-сигнала приводит к увеличению дальности передачи в 2 раза при той же частотной полосе сигнала $2B$ (рис. 4, б).

Для сетей доступа, где дальность передачи не превышает, как правило, 20 км, в худшем состоянии оказывается первый (в частотной области) поднесущий канал OFDM-сигнала. Рассчитывая $Q_\Sigma \approx Q_1^{\text{SSBI}}$ в этом канале при разных параметрах защитной полосы Δf_g и ширины полосы OFDM-сигнала, получим максимально возможную спектральную эффективность использования всей полосы $2B$.

В таблице приводится сравнение спектральной эффективности использования полосы пропускания для ВОСП OFDM без применения и с применением FEC при $L \leq 40$ км. Как видно из таблицы, существующие ВОСП с прямым фотодетектированием и с однополосной модуляцией OFDM-сигнала (без применения специальных мер для увеличения пропускной способности) обеспечивают только 50 % спектральной эффективности. Использование FEC 1-го и 2-го поколения позволяет увеличить спектральную эффективность до 75 и 100 % соответственно. При применении только FEC 1-го поколения защитная полоса составляет $\Delta f_g = (1/2)B$, а при FEC 2-го поколения она может отсутствовать, что соответствует 100 % использования полосы $2B$.

Метод компенсации шума биений на принимающей стороне. Отметим, что для частичного или полного устранения шума биений на принимающей стороне существуют технические решения [15–17]. Приведём пример схемной реализации компенсации шума биений, основанный на анализе формулы (9). Как видно из выражения (9), на полезный OFDM-сигнал влияет аддитивный шум биений (второе слагаемое), поэтому можно частично или полностью удалить данный шум из фототока с помощью выделения его на принимающей стороне и вычитания из фототока. Как следует из (7), с точки зрения предложенной математической модели шум биений формируется без участия несущей частоты при взаимодействии во время фотодетектирования парных коэффициентов Фурье $a_l a_{l+i}$, $l, i \neq 0$, что соответствует смещению разных пар поднесущих в фотодиоде [6]. Как видно из (8), уровни поднесущих OFDM-сигнала зависят от коэффициентов Фурье $a_0 a_i$, $i \neq 0$, где a_0 соответствует несущей частоте [6], т. е. без несущей частоты регистрация сигнала невозможна. Из вышеизложенного следует, что можно выделить из фототока шум биений, если фотодетектировать только OFDM-сигнал без несущей частоты.

На рис. 5 показана структурная схема оптического приёмника, состоящая из двух одинаковых фотодетекторов ($\Phi Д_1$ и $\Phi Д_2$), позволяющая компенсировать шум биений. На входе расположен направленный ответвитель (НО), который делит оптическую мощность на две параллельные ветви. С верхней ветви оптический сигнал непосредственно попадает на $\Phi Д_1$, а с нижней ветви после прохождения оптического фильтра (ОФ) — на $\Phi Д_2$.

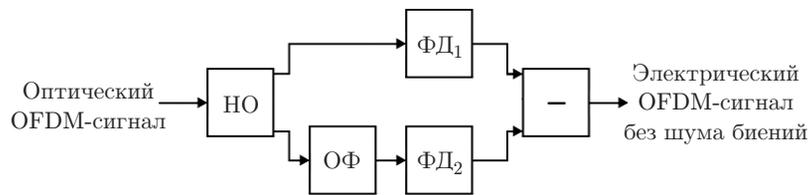


Рис. 5. Структурная схема оптического приёмника с компенсацией шума биений

Функциональное назначение ОФ — удалить несущую частоту из спектра однополосного оптического сигнала. На выходе ФД₂ имеем шум биений между поднесущими. Вычитая этот шум из фототока первой ветви, на выходе получаем электрическую копию переданного оптического однополосного OFDM-сигнала.

Отметим, что при технической реализации такой схемы необходимо предусмотреть точность изготовления симметричных ветвей и использование одинаковых фотодетекторов. Несмотря на то что существующие ОФ имеют определённые нормативные погрешности, что может привести к появлению на выходе ОФ остатка несущей частоты и произойдёт частичная, а не полная компенсация шума биений, ожидаемые показатели качества передачи сигналов улучшатся. Минимизация этих погрешностей возможна при современном уровне производства фотоприёмных модулей.

Заключение. Предложенная математическая модель для расчёта фототока на принимающей стороне при передаче по оптическому волокну однополосного OFDM-сигнала позволяет определить спектральное распределение шумов биений, а также искажение сигнала из-за хроматической дисперсии волокна. Расчёты показывают, что частотная полоса OFDM-сигнала ограничена снизу шумами биений, а сверху хроматической дисперсией.

Таким образом, с помощью предложенной методики можно рассчитать показатели качества сигнала в поднесущих каналах. Более того, методика позволяет оценить уровень шумов биений между поднесущими OFDM-сигнала, что даёт возможность увеличить полосу OFDM-сигнала в 2 раза за счёт уменьшения ширины защитной полосы. Для оценки ухудшения показателей качества сигнала сложно практически реализовать разделение сигнала и шума. Предложенный метод позволяет предсказать данное ухудшение и обосновывает применение определённых упреждающих методов кодирования в поднесущих каналах для достижения требуемых показателей качества.

На основе анализа предложенной математической модели приводится пример компенсации шума биений на принимающей стороне с помощью схемы с двумя фотодетекторами. Несмотря на то что в схеме используются два фотодиода, её внедрение может быть экономически оправдано, так как для компенсации шума биений не требуются сложные алгоритмы и преобразования сигнала в оптическом или электрическом диапазонах частот.

Разработанная математическая модель может использоваться для имитационного моделирования ВОСП OFDM и оценки пропускной способности таких систем передачи. Приведённые в данной работе формулы расчёта шума биений могут применяться для оценки помехозащищённости при проектировании фотоприёмных модулей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трещиков В. Н., Наний О. Е. Новое поколение DWDM-систем связи // Фотон-Экспресс. 2014. 116, № 4. С. 18–23.
2. Pataca D. M., Hecker C. L. H., Adami C. B. F. et al. Transmission of 1.12 Tb/s superchannel over 452 km fiber // Journ. Microwaves, Optoelectron. and Electromagnetic Appl. 2013. 12, N 2. P. 524–532.

3. **Варданян В. А.** Оценка пропускной способности пассивной оптической сети доступа с частотным разделением поднесущих каналов // *Электросвязь*. 2017. № 7. С. 61–66.
4. **Варданян В. А.** Определение максимального количества поднесущих каналов в волоконно-оптических системах передачи с прямым фотодетектированием // *Докл. ТУСУР*. 2017. **20**, № 1. С. 33–37.
5. **Armstrong J.** OFDM for optical communications // *Journ. Lightwave Technol.* 2009. **27**, N 3. P. 189–204.
6. **Варданян В. А.** Имитационное моделирование процесса передачи OFDM сигналов по дисперсионному волоконно-оптическому тракту // *T-comm: Телекоммуникации и Транспорт*. 2017. **11**, № 11. С. 18–24.
7. **Варданян В. А.** Оценка количества спектральных и поднесущих каналов в волоконно-оптических сетях доступа при однополосной оптической модуляции // *Автометрия*. 2016. **52**, № 3. С. 116–124.
8. **Gutierrez F. A., Perry P., Smyth F. et al.** Impact of band rejection in multichannel broadband subcarrier multiplexing // *Journ. Opt. Commun. and Networking*. 2015. **7**, N 4. P. 248–252.
9. **Erkilinc M. S., Pachnicke S., Griesser H. et al.** Performance comparison of single-sideband direct detection Nyquist-subcarrier modulation and OFDM // *Journ. Lightwave Technol.* 2015. **33**, N 10. P. 2038–2046.
10. **Barros D. J. F., Kahn J. M.** Comparison of orthogonal frequency-division multiplexing and on-off keying in amplified direct-detection single-mode fiber systems // *Journ. Lightwave Technol.* 2010. **28**, N 12. P. 1811–1820.
11. **Гоноровский И. С.** Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов. М.: Радио и связь, 1986. 512 с.
12. **Agrawal G. P.** *Lightwave Technology: Telecommunication Systems*. New Jersey: John Wiley and Sons, 2005. 461 p.
13. **Листвин В. Н., Трещиков В. Н.** *DWDM системы*. М.: Наука, 2013. 267 с.
14. **ITU-T** G-series Recommendation — Supplement 39. 2016. URL: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.Sup39-201602-I!!PDF-E&type=items (дата обращения: 9.11.2017).
15. **Zhang X., Li J., Li Z.** SSBI cancellation method for IMDD-OFDM system with a single photodiode // *Proc. of the Progress in Electromagnetics Research Symposium*. Guangzhou, China, 25–28 Aug., 2014. P. 2719–2722.
16. **Nezamalhosseini S. A., Chen L. R., Zhuge Q. et al.** Theoretical and experimental investigation of direct detection optical OFDM transmission using beat interference cancellation receiver // *Opt. Express*. 2013. **21**, N 13. P. 15237–15246.
17. **Li Z., Erkilinc M. S., Pachnicke S. et al.** Signal-signal beat interference cancellation in spectrally-efficient WDM direct-detection Nyquist-pulse-shaped 16-QAM subcarrier modulation // *Opt. Express*. 2015. **23**, N 18. P. 23694–23709.

Поступила в редакцию 9 ноября 2017 г.