

УВЕЛИЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ СО СПЕКТРАЛЬНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ КАНАЛОВ

Брескин В. А., Розенвассер Д. М.

*Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,
65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1.
rozenvasser@onat.edu.ua*

ЗБІЛЬШЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ЗІ СПЕКТРАЛЬНИМ РОЗДІЛЕННЯМ КАНАЛІВ

Брескін В. О., Розенвассер Д. М.

*Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,
65029, Україна, м. Одеса, вул. Кузнечна, 1.
rozenvasser@onat.edu.ua*

INCREASING THE EFFICIENCY OF THE FIBER-OPTIC TRANSMISSION SYSTEM WITH WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING

Breskin V. A., Rozenvasser D. M.

*O.S. Popov Odessa national academy of telecommunications,
1 Kuznechna St., Odessa, 65029, Ukraine.
rozenvasser@onat.edu.ua*

Аннотация. Наиболее эффективными системами передачи транспортной сети являются сегодня системы передачи оптической транспортной сети OTN, предлагаемые рекомендацией ITU-T G.709, в которой по оптическим каналам волоконно-оптической системы со спектральным разделением передаются структурированные иерархические цифровые потоки, использующие методы корректирующего кодирования. При разработке этой сети начали применять эффективный метод модуляции - КАМ-М. Однако в литературе отсутствуют указания степени КАМ-М, которая определяет количество точек сигнального созвездия, обеспечивает максимальную суммарную скорость передачи всей многоканальной системы, если ограничения в ширине используемого оптического диапазона отсутствуют. Настоящая работа устраняет этот пробел, указывая на существование оптимального КАМ-М, а также соответствующего ему оптимального количества оптических каналов, при котором достигается максимальное значение суммарной скорости всей многоканальной системы передачи и дается оценка величины этого экстремума.

Ключевые слова: спектральное разделение каналов, волоконно-оптическая система передачи, КАМ, OTN, корректирующий код, суммарная скорость.

Анотація. Найбільш ефективними системами передачі транспортної мережі є сьогодні системи передачі оптичної транспортної мережі OTN, пропонувані рекомендацією ITU-T G.709, в якій оптичними каналами волоконно-оптичної системи зі спектральним розподіленням передаються структуровані ієрархічні цифрові потоки, що використовують методи коректувального кодування. При розробці цієї мережі почали застосовувати ефективний метод модуляції - КАМ-М. Проте в літературі відсутні вказівки щодо ступеня КАМ-М, що визначає кількість точок сигнального сузір'я, забезпечує максимальну швидкість передавання всієї багатоканальної системи, якщо обмеження в ширині використовуваного оптичного діапазону відсутні. Дана робота усуває цю прогалину, вказуючи на існування оптимального КАМ-М, а також відповідної йому оптимальної кількості оптичних каналів, за якої досягається максимальне значення сумарної швидкості всієї багатоканальної системи передачі і надається оцінка величини цього екстремуму.

Ключові слова: спектральне розділення каналів, волоконно-оптична система передачі, КАМ, OTN, коректувальний код, сумарна швидкість.

Abstract. The most efficient transmission systems of transport network are currently the optical transport network OTN transmission systems offered by ITU-T Recommendation G.709, in which optical channels of a fiber-optic system with wavelength division multiplexing are transferred by structured hierarchical digital streams using forward error correction coding methods. When developing this network, we began to use the effective modulation method - MQAM. However, there is no indication in the literature of the degree of MQAM that determines the number of points in the signal constellation, which ensures the maximum total rate of the entire multichannel system, if there are no limitations in the width of the optical range used. This work removes this gap, pointing to the existence of the optimal MQAM, as well as the corresponding optimal number of optical channels, in which the maximum total rate of the entire multichannel transmission system is reached and an estimate of the magnitude of this extremum is given.

Key words: wavelength division multiplexing, fiber-optic transmission system, QAM, OTN, error-control code, total rate.

Проблема увеличения суммарной скорости систем передачи, т.е. увеличения эффективности этих систем, является всегда актуальной. Применительно к волоконно-оптическим системам передачи (ВОСП) транспортной сети эта задача решалась в своё время путём переоборудования ВОСП-СЦ (синхронной цифровой иерархии, SDH) на волоконно-оптическую систему со спектральным разделением каналов ВОСП-СРК (WDM) [1], а теперь – переоборудованием ВОСП-СРК на СП оптической транспортной сети (ОТН) [2,3].

ОТН представляет собой ВОСП-СРК, оптические каналы которой используются для передачи структурированных иерархических цифровых потоков, позволяющими осуществлять мониторинг качества передачи клиентской информации и обеспечить, тем самым, её надёжную передачу.

Важной особенностью сети ОТН является замена простого, но не эффективного, метода модуляции по интенсивности (МИ) эффективным цифровым методом модуляции – квадратурно-амплитудной модуляцией (КАМ-М) [4, 5] в сочетании с методами корректирующего кодирования (КК) [6,7].

Известно [8], что увеличение количества точек сигнального созвездия M повышает спектральную эффективность оптического канала (ОК), увеличивая скорость передачи в этом ОК, однако одновременно с этим увеличивается потеря защищённости в ОК, что уменьшает допустимое количество ОК [9], а значит снижает суммарную скорость передачи такой многоканальной системы передачи.

Целью статьи является определение количества M точек сигнального созвездия КАМ-М в каждом оптическом канале ОК ВОСП-СРК, при котором достигается максимальное увеличение суммарной скорости такой системы передачи, и оценка величины соответствующего выигрыша.

Известно, что впервые КАМ стал широко использоваться в высокоскоростных модемах ВМ. В оптике его можно реализовать используя когерентную приёмо-передачу – КПП.

Блок-схема ВМ с КАМ изображена на рис. 1.

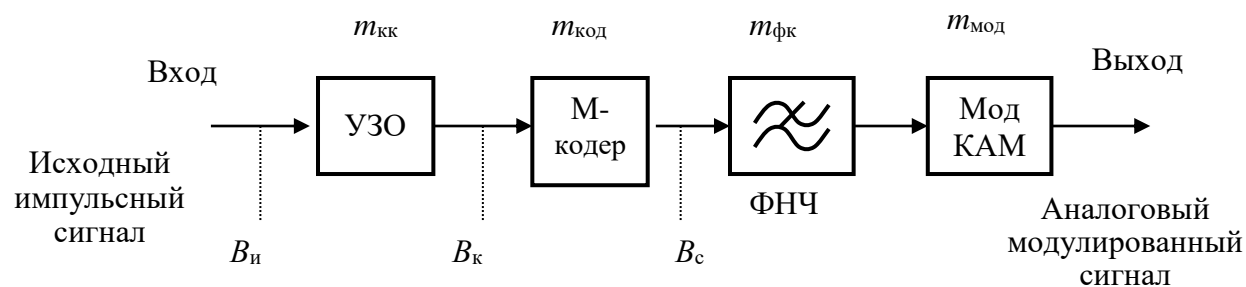


Рисунок 1 – Блок-схема ВМ с КАМ

Здесь

– УЗО – устройство защиты от ошибок, осуществляющее корректирующее кодирование (КК) добавлением к исходному импульсному сигналу с информационной скоростью $B_{и}$ служебные проверочные и исправляющие биты, поэтому канальная скорость $B_{к}$ на выходе УЗО увеличивается ($B_{к} > B_{и}$);

– М-кодер – устройство многопозиционного кодирования, заменяющее двоичный сигнал со скоростью $B_{к}$ многопозиционным сигналом с символьной скоростью $B_{с} < B_{к}$;

– Мод КАМ – устройство, осуществляющее квадратурную амплитудную модуляцию.

Соотношение между этими скоростями определяется коэффициентами:

– защиты от ошибок блоком УЗО

$$m_{кк} = \frac{B_{к}}{B_{и}}; \quad (1)$$

– многопозиционного кодирования М-кодером

$$m_{код} = \frac{B_{к}}{B_{с}}. \quad (2)$$

М-кодер понижает символьную скорость и полосу частот сигнала за счёт многопозиционного кодирования. Коэффициент многопозиционного кодирования $m_{код}$ показывает во сколько раз канальная скорость выше символьной.

От величины $m_{код}$ зависит количество точек сигнального созвездия М КАМ

$$M = 2^{2 \cdot m_{код}}. \quad (3)$$

Обозначим b – увеличение скорости передачи информационного сигнала в одном канале WDM при использовании КАМ $B_{и} = B_{ОК/КАМ}$ по сравнению со скоростью $B_{ОК/АМ-2}$, которая реализуется при использовании АМ-2, т.е. увеличение спектральной эффективности этого оптического канала ОК

$$b = B_{и} / B_{АМ-2}. \quad (4)$$

Использование КАМ со степенью кодирования $m_{код}$ даёт выигрыш

$$b = 2m_{код}, \quad (5)$$

при этом количество точек сигнального созвездия $M = 2^b$.

Относительная скорость передачи ВМ определяется выражением:

$$B_{и} / \Delta F = m_{кк} \cdot m_{фк} \cdot m_{код} \cdot m_{мод}, \quad (6)$$

где ΔF – используемая полоса частот канала; $m_{фк}$ – коэффициент, показывающий относительную скорость передачи $B_{с}$ символьного сигнала в ограниченной полосе частот Δf_0 ,

$$m_{фк} = B_{с} / \Delta f_0; \quad m_{фк} < 2;$$

$m_{мод}$ – коэффициент, учитывающий соотношение полос на входе Δf_0 и выходе $\Delta f_{м}$ модулятора ($\Delta f_{м} = \Delta F$)

$$m_{мод} = \Delta f_0 / \Delta f_{м},$$

$$m_{мод} = \begin{cases} 0,5 & \text{для АМ-М} \\ 1 & \text{для КАМ-М.} \end{cases} \quad (7)$$

Видно, что если даже канальная скорость $B_{к}$ и символьная $B_{с}$ одинаковы ($m_{код} = 1$), то выигрыш в скорости КАМ по сравнению с АМ-2 равен $b = 2$, что достигается за счёт использования фазовой селекции в модуляторе – демодуляторе КАМ.

Увеличение относительной скорости (6) увеличением степени кодирования ($m_{код} > 1$) приводит к увеличению количества М-точек сигнального созвездия КАМ, что при ограниченном уровне передачи ухудшает защищённость принимаемого сигнала [8] на величину $\Delta A_{мод}$ (см. табл. 1).

Видно, что использование КАМ-4 увеличивая канальную скорость в два раза увеличивает защищённость сигнала от помех на величину $\Delta A_{\text{мод}} = 3$ дБ, а переход к КАМ- M с $M > 4$ ухудшает защищённость, увеличивая потери защищённости $\Delta A_{\text{мод}}$. Выходом из этого положения является использование корректирующего кодирования КК (Forward error correction - FEC).

Таблица 1 – Соотношение между параметрами КАМ

$m_{\text{код}}$	1	2	3
b	2	4	6
M	4	16	64
$\Delta A_{\text{мод}}$, дБ	-3	+7	+12

В работе [8] показано, что энергетический выигрыш кодирования (ЭВК) от применения КК кода Рида-Соломона, аппроксимируется выражением

$$\Delta A_{\text{кк}}(m_{\text{кк}}) = \left(\frac{1 - m_{\text{кк}}}{c} \right)^d, \quad (8)$$

где коэффициенты аппроксимации c и d при длине блока $n = 255$ и достоверности $p = 10^{-10}$ [10] равны соответственно $c = 4,088 \cdot 10^{-4}$, $d = 0,368$, а оптимальное значение $m_{\text{кк}}$, при котором достигается максимум b , равно $m_{\text{кк}} = 0,85$. Обычно выбирают значение $m_{\text{кк}} = 0,94$, при этом $\Delta A_{\text{кк}} = 6$ дБ. Эта величина выигрыша не может полностью компенсировать $\Delta A_{\text{мод}} = 7$ дБ, вносимые КАМ-16.

Лучшие результаты КК дают рекомендованные [10] усовершенствованные методы кодирования, которые обеспечивают выигрыш $\Delta A_{\text{кк}} = 9$ дБ при той же вероятности ошибки. Это такие коды, как:

- расширенный Рида-Соломона (2720, 2550) со скоростью $m_{\text{кк}} = 0,938$;
- каскадный код (внутренний БЧХ (2047, 1959) и внешний Рида-Соломона (1023, 1007)) со скоростью $m_{\text{кк}} = 0,957 \cdot 0,984 = 0,942$;
- код с низкой плотностью проверок на четность (LDPC(32640, 30592)) со скоростью $m_{\text{кк}} = 0,937$.

Таким образом, использование в ОТН указанных усовершенствованных корректирующих кодов делает целесообразным применять КАМ-16 для операторов, поскольку это позволяет увеличить канальный трафик в 4 раза.

Возможность дальнейшего увеличения суммарной канальной скорости, использованием КАМ- M с $M > 16$, определяется запасом по защищённости [11] на худшей секции сети и поэтому должна определяться расчётом для конкретного требуемого фрагмента этой сети.

В многоканальной системе передачи ВОСП-СРК важно оценить эффект увеличения суммарной скорости всей системы передачи от использования КАМ- M во всех оптических каналах этой ВОСП. При этом надо иметь в виду, что увеличение канальных скоростей в каждом ОК за счет использования многопозиционного КАМ- M , уменьшает запас защищённости в этих ОК и, тем самым, уменьшает допустимое количество таких ОК. Уменьшение запаса по защищённости связано с увеличением количества точек сигнального созвездия. В этом случае:

- если сохранять расстояние между этими точками, то растёт пиковое значение группового сигнала многоканальной ВОСП-СРК, что увеличивает нелинейные искажения и соответственно увеличивает уровень нелинейных помех;
- если сохранять величину пикового значения группового сигнала, то уменьшается расстояние между точками сигнального созвездия, т.е. уменьшается отношение сигнал/ шум.

Наличие этих противоречивых факторов определяет существование оптимального значения M для КАМ- M и соответствующее ему оптимальное количество ОК – $N_{\text{ОК/КАМ}}$.

Определим эти оптимумы. Для этого обозначим $V_{\text{ОК/МИ}}$ – скорость передачи в одном ОК с помощью МИ, $N_{\text{ОК/МИ}}$ – количество ОК WDM, которые реализуется при использовании МИ. Результирующая (суммарная) скорость передачи в такой системе СРК равна

$$V_{\Sigma/\text{МИ}} = V_{\text{ОК/МИ}} \cdot N_{\text{ОК/МИ}}. \quad (9)$$

Пусть $V_{\text{ОК/КАМ}}(b)$ – скорость передачи в одном ОК с помощью КАМ, которая зависит от степени многопозиционного кодирования $m_{\text{код}}$ и соответственно от величины выигрыша в скорости передачи b ; $N_{\text{ОК/КАМ}}(b)$ – количество ОК WDM, соответствующее значению b при использовании КАМ.

Результирующая (суммарная) скорость передачи в WDM с КАМ равна

$$V_{\Sigma/\text{КАМ}}(b) = V_{\text{ОК/КАМ}}(b) \cdot N_{\text{ОК/КАМ}}(b). \quad (10)$$

Относительную величину выигрыша $\gamma(b)$ логично оценивать отношением:

$$\gamma(b) = \frac{V_{\Sigma/\text{КАМ}}(b)}{V_{\Sigma/\text{МИ}}}; \quad (11)$$

$$\gamma(b) = \left[\frac{V_{\text{ОК/КАМ}}}{V_{\text{ОК/МИ}}} \right] \cdot \left[\frac{N_{\text{ОК/КАМ}}(b)}{N_{\text{ОК/МИ}}} \right].$$

Учитывая, что в соответствии с (4)

$$V_{\text{ОК/КАМ}}(b) = V_{\text{ОК/АМ-2}}(b) \cdot b$$

имеем

$$\gamma(b) = \left[\frac{V_{\text{ОК/АМ-2}} \cdot b}{V_{\text{ОК/МИ}}} \right] \cdot \left[\frac{N_{\text{ОК/КАМ}}(b)}{N_{\text{ОК/МИ}}} \right]. \quad (12)$$

Для ОК с одинаковой полосой частот скорости передачи $V_{\text{ОК/АМ-2}}$ и $V_{\text{ОК/МИ}}$ одинаковы, т.е.

$$\frac{V_{\text{ОК/АМ-2}}}{V_{\text{ОК/МИ}}} = 1.$$

Поэтому

$$\gamma(b) = N_{\text{ОК/КАМ}}(b) \cdot b / N_{\text{ОК/МИ}}(b). \quad (13)$$

Величину $N_{\text{ОК/МИ}}$ будем оценивать, используя методику [9, 11], в которой рассматривается переоборудование фрагмента сети с ВОСП-SDH на ВОСП-WDM и учитывается влияние:

- нелинейных помех, зависящих от уровня передачи P_w группового сигнала WDM, дисперсионных искажений, присущих различным типам оптических волокон ОВ, эффекта накопления этих помех, вызванного заменой участков регенерации ВОСП-SDH на усилительные участки (пролёты) ВОСП-WDM;

- запаса по защищённости, который определяется разностью номинального затухания участка исходной, переоборудованной ВОСП-SDH, и фактического затухания этого участка при переходе к ВОСП-СРК, использующей 3-е окно прозрачности;

- изменения уровня чувствительности приёмника регенерационной секции WDM $P_{\text{ч-w}}$ по сравнению с чувствительностью приемного оптического модуля (ПРОМ) регенерационной секции SDH – $P_{\text{ч-s}}$ на величину $\Delta p_{\text{ч}} = p_{\text{ч-s}} - p_{\text{ч-w}}$;

- допустимой защищённостью – $A_{\text{доп}}$, которая определяется требуемым значением коэффициента BER (bit error ratio – вероятностью ошибки бита).

При оценке величины $N_{\text{ОК/КАМ}}(b)$ необходимо учесть:

- изменение допустимой защищённости $A_{\text{доп}}$ и изменение чувствительности $\Delta p_{\text{ч}}$, которые вызваны разными способами приёма-передачи – МИ и КПП;

– ухудшение защищённости на величину $\Delta A_{\text{МОД-М}}$ за счёт увеличения степени многопозиционного кодирования $m_{\text{код}}$ с целью увеличения спектральной эффективности оптического канал ОК в b раз;

– улучшения защищённости на величину $\Delta A_{\text{КК}}(m_{\text{КК}})$ за счёт использования корректирующего кодирования КК (ФЕС).

Допустимая защищённость $A_{\text{доп}}$ определяется требуемым значением коэффициента ошибок BER, выбранным запасом защищённости и методом приёма-передачи. Для КПП при запасе 3 дБ и $\text{BER} = 10^{-12}$ $A_{\text{доп}} = 23$ дБ. При переходе на МИ, с учётом связи оптических и электрических дБ [12], разность уровней сигнала и шума уменьшается вдвое, поэтому при том же запасе и BER, $A_{\text{доп}} = 13$ дБ.

Чувствительность приёмника определяется $A_{\text{доп}}$ и уровнем шумов, приведенным к его входу, который зависит от типа приёмника излучения ПИ и способа приёма-передачи.

Будем ориентироваться на численные значения чувствительности (табл. 2), приведенные в [13], которые несколько изменены с учётом дополнительных данных, приведенных в [14,15,16].

Таблица 2 – Чувствительность приемного оптического модуля

Метод приёма			
Чувствительность ПРОМ с $p-i-n$ -ФД $p_{\text{ч}}$ (дБм)	Прямой (МИ)		Когерентный (АМ-2)
	Выигрыш в чувствительности ($\Delta p_{\text{ч}}$) по сравнению $p-i-n$ -ФД при использовании:		
		ЛФД	ПОУ
$-23 + 10\lg\Delta f$ (ГГц)	10 дБ	20 дБ	25 дБ

В оптических мультиплексорах ввода/вывода ВОСП–СРК используют предварительные оптические усилители (ПОУ), поэтому при переоборудовании ВОСП-SDH на WDM необходимо учитывать изменение чувствительности $\Delta p_{\text{ч}} = 20$ дБ. Когерентная приёмо-передача КПП характеризуется большой чувствительностью, изменение которой $\Delta p_{\text{ч}} = 25$ дБ. Казалось бы, что такие разные величины этих параметров должны были дать разные значения величин допустимого количества ОК при двоичной передаче.

Однако видно (см. рис. 2), что если оптимизировать уровень передачи $P_{\text{пр}}$, то максимальные величины $N_{\text{ОК}}$ получаются одинаковыми.

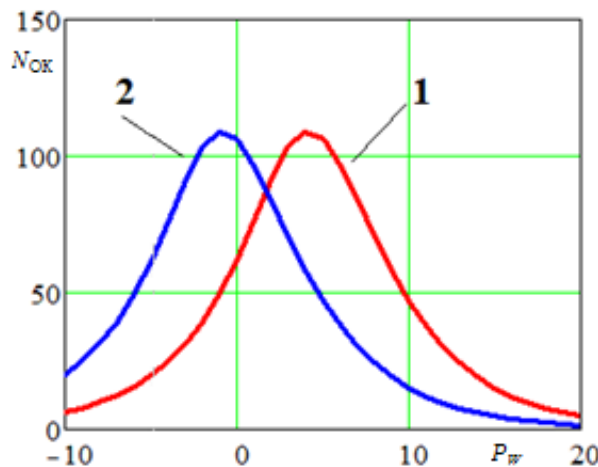


Рисунок 2 – Сравнение максимальных величин $N_{\text{ОК}}$, оптимизированных уровнем передачи для МИ (1) и АМ-2 с КПП (2)

Нижче приведені залежності відносного вииграшу в сумарній швидкості системи передачі ВОСП-СРК $\gamma(b)$ (рис. 3) від збільшення спектральної ефективності ОК СРК – b при використанні КАМ, розраховані в відповідності з формулами (11) і (13), а також відносно кількості оптичних каналів ОК $N_\gamma(b) = N(b) / N(b = 2)$, (рис. 4).

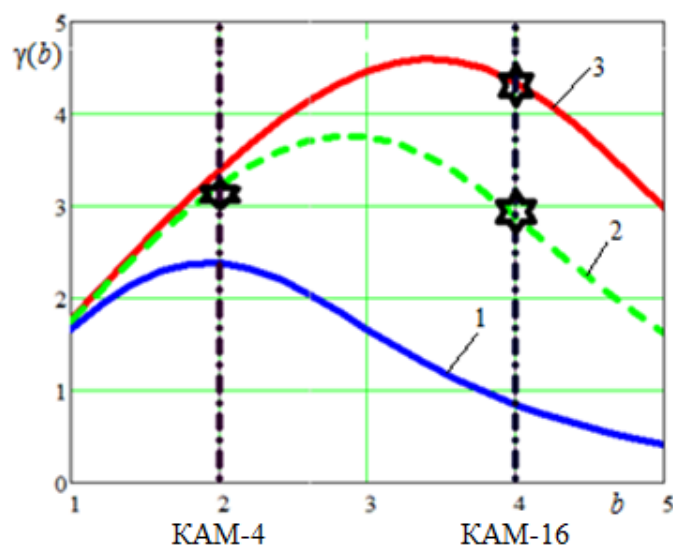


Рисунок 3 – Залежність відносного вииграшу в сумарній швидкості ВОСП-СРК $\gamma(b)$ від збільшення b СРК при використанні КАМ (1 – без КК, 2 – ЭВК 6 дБ, 3 – ЭВК 9 дБ)

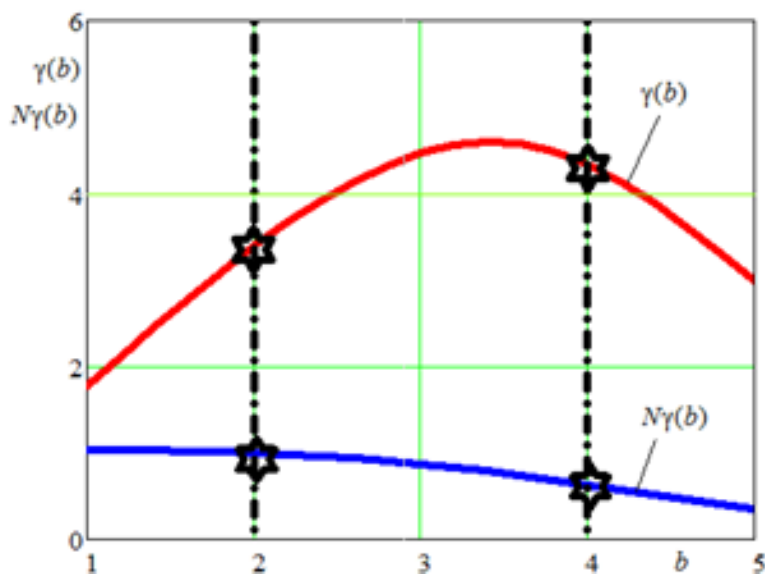


Рисунок 4 – Залежність (1) – $\gamma(b)$ з удосконаленим КК Ріда-Соломона, а також залежність (2) – $N_\gamma(b)$

Із рисунків видно, що:

– використання КАМ-4 в максимально допустимому кількості оптичних каналів ОК ВОСП-СРК забезпечує вииграш в збільшенні сумарної швидкості цієї системи передачі більше ніж в два рази без коректуючого кодування КК;

– поєднання КАМ-4 з звичайним КК Ріда-Соломона (255, 239), який забезпечує вииграш 6 дБ при ймовірності помилки 10^{-12} (вибір даного рівня ймовірності помилки

основан на рекомендації МСЭ-Т G.959.1 [14]), дозволяє збільшити вииграш суммарної швидкості ВОСП-СПК більше ніж в 3 рази, а заміна цього КК удосконаленим кодом (використання такого КК описано в Рекомендації МСЭ-Т G.709 [2] для систем OTN) додаткового суттєвого вииграша не дає;

– поєднання КАМ-16 з удосконаленим КК [2] забезпечує вииграш в збільшенні суммарної швидкості цієї системи передачі більше ніж в чотири рази і при цьому вимагане кількість оптичних каналів ОК скорочується майже вдвічі –

$$N_{\gamma}(b=4) = N(b=4) / N(b=2) = 0,64;$$

– подальше збільшення ступеня кодування $m_{\text{код}}$ і відповідно кількості точок сигнального созвездія КАМ до $M \geq 64$ тільки зменшує цей вииграш.

Приходимо до висновку, що на сучасному етапі розвитку волоконно-оптичних систем передачі переобладнання систем со спектральним розділенням каналів ВОСП-СПК незривно пов'язано з використанням високоскоростних модемів з багатопозиційними – КАМ. Ця тенденція підтверджується джерелами [4, 5] за принципом побудови нової транспортної мережі OTN.

Результати дослідження, наведені в цій статті, уточнюють умови доцільності використання КАМ, показуючи, що якщо відсутні обмеження в ширині використовуваного оптичного діапазону, то:

– перехід до КАМ-4 або до КАМ-16 дозволяє збільшити суммарну швидкість ВОСП-СПК відповідно в 3 і 4 рази;

– подальше збільшення рівня КАМ не доцільно, так як призводить до зниження суммарної швидкості цієї ВОСП.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Однорог П.М. WDM / Однорог П. М., Михайленко. Є. В., Омецінська О. Б.; за ред. В. Б. Каток. – [3-тє вид]. – К., 2005. – 194 с.
2. ITU-T Recommendation G.709. Interfaces for the Optical Transport Network (OTN), 2012.
3. Соломенчук В.Д. Оптичні транспортні мережі / В.Д. Соломенчук, В.А. Мищенко, К.Н. Гура // ЦПО ПАО «Укртелеком». – К., 2014. – 294 с.
4. Величко М.А. Нові формати модуляції в оптичних системах зв'язу / М.А. Величко, О.Е. Наний, А.А. Сусьян // Lightwave Russian Edition. – 2005. – № 4. – С. 21–30.
5. Lach E., Idler W. Modulation formats for 100G and beyond // Optical Fiber Technology 17. (2011). – P. 377 – 386.
6. Морелос-Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение; пер. с англ. В. Б. Афанасьева. — М.: Техносфера, 2006. — 320 с.
7. Конышев В. А. OTN в сетях связи: современные тенденции / В.А. Конышев, А.В. Леонов, М.А. Слепцов // Первая Миля. – 2016. – № 8. – С. 50-55.
8. Брескин В.А. Увеличение пропускной способности оптического канала волоконно-оптической системы передачи / В.А. Брескин, А.Д. Мазур, Д.М. Розенвассер // Электроника и связь. – 2012. – № 6.
9. Брескин В.А. Ресурсы переобладнання на WDM / В. А. Брескин // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2009. – № 2. – С. 62-67.
10. ITU-T Recommendation G.975.1. Forward error correction for high bit-rate DWDM submarine systems, 2004.
11. Брескин В.А. Параметри ланки мультиплексорів WDM / В.А. Брескин // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2013. – № 1 – С. 114-119.
12. Hentschel Christian. Fiber optics handbook: an introduction and reference guide to fiber optic technology and measurement techniques / Christian Hentschel // Boeblingen: Hewlett-Packard, Instruments Division – 1989.
13. Брескин В. А. Влияние чувствительности приемного устройства на пропускную способность волоконно-оптической системы передачи со спектральным разделением каналов / В. А. Брескин, В. И. Корнейчук // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. – 2014. – № 2. – С. 139-146.
14. ITU-T Recommendation G.959.1. Optical transport network physical layer interfaces, 2003.

15. Gigabit-capable Passive Optical Networks. by Elmar Trojer, Dave Hood. Publisher: John Wiley & Sons. Release Date: April 2012. – 300 p.
16. Broadband Circuits for Optical Fiber Communication. Front Cover • Eduard Säckinger. John Wiley & Sons, May 27, 2005. – Technology & Engineering. – 440 p.

REFERENCES:

1. Odnorog, P.M., Mikhailenko, E.V., Ometsinska, O.B., Ed. Katok, V.B. "WDM." [3rd ed].(2005): 194 p.
2. ITU-T Recommendation G.709. Interfaces for the Optical Transport Network (OTN), 2012.
3. Solomenchuk, V.D., Mishchenko, V.A., Gura, K.N. "Optical transport networks" "Ukrtelecom", Kiev (2014): 294.
4. Velichko, M.A., Nany, O.E., Susjian, A.A. "New modulation formats in optical communication systems." Lightwave Russian Edition. No. 4. (2005): 21-30.
5. Lach E., Idler W. Modulation formats for 100G and beyond // Optical Fiber Technology 17. (2011). – P. 377 – 386.
6. Morelos-Zaragoza Robert "The Art of Error Correcting Coding." 2nd Edition, John Wiley & Sons, Hoboken, 2006.
7. Konyshov, V.A., Leonov, A.V., Sleptsov, M.A. "OTN in communication networks: current trends" First Mile. No. 8. (2016): 50-55.
8. Breskin, V.A., Mazur, A.D., Rosenwasser, D.M. "Increasing capacity of the optical channel of fiber-optic transmission system" Electronics and Communication. Kyiv. № 6 (2012).
9. Breskin, V.A. "WDM Conversion Resources." Proc. of the O.S. Popov ONAT. № 2 (2009): 62-67.
10. ITU-T Recommendation G.975.1. Forward error correction for high bit-rate DWDM submarine systems, 2004.
11. Breskin, V.A. "Parameters of the WDM multiplexers chain." Proc. of the O.S. Popov ONAT. № 1 (2013): 114-119.
12. Hentschel Christian. Fiber optics handbook: an introduction and reference guide to fiber optic technology and measurement techniques / Christian Hentschel // Boeblingen: Hewlett-Packard, Instruments Division – 1989.
13. Breskin, V.A., Korneychuk, V.I. "Effect of sensitivity of transceivers devices to capacity of fiber optic transmission system with WDM." Proc. of the O.S. Popov ONAT. № 2 (2014): 139-146.
14. ITU-T Recommendation G.959.1. Optical transport network physical layer interfaces, 2003.
15. Gigabit-capable Passive Optical Networks. by Elmar Trojer, Dave Hood. Publisher: John Wiley & Sons. Release Date: April 2012- 300 p.
16. Broadband Circuits for Optical Fiber Communication. Front Cover • Eduard Säckinger. John Wiley & Sons, May 27, 2005 - Technology & Engineering. – 440 p.