

УДК 621.396

И.А. Саитов, Н.И. Мясин, С.И. Саитов

МАКСИМИЗАЦИЯ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ПО ВОСП С МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕМ ПО ДЛИНЕ ВОЛНЫ И ЛИНЕЙНЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ УСИЛИТЕЛЯМИ

Предлагается новый подход к решению задачи максимизации скорости передачи сигналов в мультипротокольной волоконно-оптической системе передачи посредством оптимизации характеристик активных компонентов волоконно-оптического линейного тракта с мультиплексированием по длине волны и линейными волоконно-оптическими усилителями с учетом влияния эффекта вынужденного комбинационного рассеяния.

Ключевые слова: *волоконно-оптический линейный тракт, отношение оптический сигнал-шум, вынужденное комбинационное рассеяние, мультиплексирование по длине волны, спектральный канал, технология переноса.*

Введение. В настоящее время в транспортных сетях (ТС) связи применяются средства не только статического (*SDH*), но и статистического мультиплексирования (*Ethernet*, *ATM* и т.д.), к ТС предъявляется новое требование – инвариантность к применяемым технологиям переноса. В связи с тем, что волоконно-оптические системы передачи (ВОСП) имеют потенциально наивысшее качество образуемых каналов и трактов передачи как с точки зрения модуляционной скорости, так и по параметрам достоверности передачи, их использование в качестве основы ТС является безальтернативным [1].

Для компенсации потерь оптической мощности в ВОСП все чаще используются линейные волоконно-оптические усилители (ВОУ) [2]. Эти устройства обладают рядом достоинств, к основным из которых относятся их "прозрачность" к формату передаваемого сигнала, что в рамках требований к инвариантности ТС к применяемым технологиям переноса привело к постепенной замене электронных регенераторов на линейные ВОУ. Значительный экономический выигрыш от замены электрооптических регенераторов на линейные ВОУ особенно ощутим в ВОСП, где применяются системы мультиплексирования по длине волны (*DWDM* или *CWDM*). При использовании мультиплексирования по длине волны (МДВ) существует возможность внедрения различных технологий переноса в спектральных каналах регенерационной секции (СКРС), сформированных в одном оптическом волокне (ОВ). Таким образом, речь идет о возможности формирования мультипротокольного гетерогенного волоконно-оптического тракта

(ВОЛТ), где скорость передачи оптического сигнала в каждом СКРС может быть различна.

В большинстве существующих подходов к моделированию ВОЛТ считается, что ОВ является *линейной* направляющей средой. Однако на практике возникают ситуации, когда ОВ нельзя считать линейной системой. Оптический сигнал в таких условиях искажается из-за проявления нелинейных свойств среды распространения. В течение последних 10 лет выявлены и описаны нелинейные эффекты в оптическом волокне, обуславливающие искажение оптических сигналов в ВОСП с МДВ [3]. Доказано, что для типовых скоростей передачи и фотоприемных устройств (ФПУ), применяемых в ВОСП, особую важность имеет явление вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР).

Интенсивность продуктов ВКР зависит от вводимой в ОВ мощности и длительности импульсов оптического сигнала. Это непосредственно влияет на достоверность передачи в ВОСП. Следовательно, задачи оптимизации параметров ВОСП с МДВ и линейными ВОУ с учетом ВКР являются актуальными.

Основная часть. Реализация концепции оптических транспортных сетей (*OTN*), организация между оконечными узлами сетевых трактов, "прозрачных" (инвариантных) к протоколам передачи, существенно расширяют потребительские свойства оптических ТС. Однако одновременное использование в разных СКРС нескольких различных форматов сигналов (протоколов передачи) *SDH*, *NG SDH*, *ATM*, *GbE* и др. существенно усложняет задачи управления ВОСП.

Следует отметить, что на моделирование состояний ВОЛТ с МДВ и линейными ВОУ оказывает доминирующее влияние эффекта ВКР. Сущность эффекта *вынужденного комбинационного рассеяния* состоит в том, что вследствие взаимодействия излучения сигнала с молекулярными колебаниями вещества ОВ возникает генерация фотонов более низкой частоты. Величина наблюдаемого частотного сдвига определяется свойствами среды распространения излучения. В ВОСП с МДВ и ВОУ это приводит к тому, что энергия из СКРС с большей несущей частотой переходит в СКРС с меньшей несущей частотой. Первый сигнал деградирует, а во втором СКРС возникает и растет ВКР-помеха.

Использование линейных ВОУ в ВОЛТ с МДВ не только позволяет компенсировать затухание оптического сигнала в пассивных элементах оптического тракта, но и приводит к заметному повышению мощности помех, вызванных нелинейными эффектами в ОВ. Мощность таких помех может быть соизмеримой с мощностью оптического сигнала по всей полосе пропускания тракта [1, 2].

Применение линейных ВОУ определяет увеличение длины нелинейного взаимодействия. Известна модель [3] для нахождения порога ВКР, представляющая собой, систему уравнений взаимодействия стоксовой волны и волны накачки, которые строго выводятся из уравнений Максвелла.

Развитие модель [3] получила в работе [4], где задача анализа взаимодействия оптических несущих в однопролетной ВОЛТ с МДВ, содержащих R спектральных каналов, сводится к решению системы нелинейных дифференциальных уравнений вида:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial P_1}{\partial z} + \alpha_1 P_1 &= -\frac{g_0}{K \cdot A_{эфф}} \cdot P_1 \sum_{j=2}^R \theta_{1j} P_j, \\ \frac{\partial P_r}{\partial z} + \alpha_r P_r &= \frac{g_0}{K \cdot A_{эфф}} \cdot P_r \left(\sum_{j=1}^{r-1} \delta_{jr} \theta_{jr} P_j - \sum_{j=r+1}^R \theta_{rj} P_j \right), \\ \frac{\partial P_R}{\partial z} + \alpha_R P_R &= -\frac{g_0}{K \cdot A_{эфф}} \cdot P_R \cdot \sum_{j=1}^{R-1} \delta_{jR} \theta_{jR} P_j, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где P_r – мощность оптического сигнала r -того канала в произвольной точке z длины ОВ; $r=1,2,\dots,R; j=1,2,\dots,R; r \neq j; \theta_{jr} = g/g_0$, где g_0 – максимальный коэффициент ВКР, g – коэффициент ВКР в произвольной точке профиля спектральной кривой ВКР; $\delta_{jr} = \lambda_j/\lambda_r$, где $\lambda_1 < \lambda_2 < \dots < \lambda_r < \dots < \lambda_R$ – длины волны спектральных каналов, α_r – затухание оптического сигнала на r -й длине волны; $A_{эфф}$ – эффективная площадь оптического

волокна, K – поляризационный коэффициент ОВ ($1 < K < 2$).

Авторами на основе результатов, полученных в работе [4], разработана модель ВОЛТ с МДВ и линейными ВОУ, учитывающая доминирующее влияние ВКР на достоверность передачи оптических сигналов при произвольном количестве M линейных ВОУ [5].

В состав предлагаемой модели входят: система дифференциальных уравнений, описывающая мощности информационного сигнала в начале $M+1$ усилительной секции (УС) с учетом влияния ВКР при использовании произвольного числа линейных ВОУ и постоянной и равной скорости передачи сигнала в каждом СКРС:

$$\left\{ \begin{aligned} P_{s1,M+1} &= G_M P_{s1,M} \cdot e^{-\alpha L_{M+1}} \cdot (1 - (G_M \sum_{j=1}^R \beta_{1j} (P_{s,j,M} + P_{n,j,M}) + (G_M - 1) \times \sum_{j=1}^R \beta_{1j} P_{ASEj})) \cdot (1 - e^{-\alpha L_{M+1}}), \\ P_{sr,M+1} &= G_M P_{sr,M} \cdot e^{-\alpha L_{M+1}} \cdot (1 - (G_M \sum_{j=r+1}^R \beta_{rj} (P_{s,j,M} + P_{n,j,M}) + (G_M - 1) \times \sum_{j=r+1}^R \beta_{rj} P_{ASEj})) \cdot (1 - e^{-\alpha L_{M+1}}), \\ P_{sR,M+1} &= G_M P_{sR,M} \cdot e^{-\alpha L_{M+1}}, \end{aligned} \right.$$

система дифференциальных уравнений для определения суммарной мощности информационного сигнала и шумов в начале $M+1$ УС с учетом влияния ВКР:

$$\left\{ \begin{aligned} P_{\Sigma 1,M+1} &= \{G_M P_{\Sigma 1,M} + (G_M - 1) P_{ASE 1,M}\} \cdot \left\{1 - (1 - e^{-\alpha L_{M+1}}) \left[G_M \sum_{j=2}^R \beta_{1j} P_{\Sigma j,M} - (G_M - 1) \sum_{j=2}^R \beta_{1j} P_{ASE j,M} \right] \right\} \cdot e^{-\alpha L_{M+1}}, \\ P_{\Sigma r,M+1} &= \{G_M P_{\Sigma r,M} + (G_M - 1) P_{ASE r,M}\} \cdot \left\{1 + \left[G_M \left(\sum_{j=1}^{r-1} \beta_{rj} P_{\Sigma j,M} - \sum_{j=r+1}^R \beta_{rj} P_{\Sigma j,M} \right) + (G_M - 1) \left(\sum_{j=1}^{r-1} \beta_{rj} P_{ASE j,M} - \sum_{j=r+1}^R \beta_{rj} P_{ASE j,M} \right) \right] (1 - e^{-\alpha L_{M+1}}) \right\} \cdot e^{-\alpha L_{M+1}}, \\ P_{\Sigma R,M+1} &= \{G_M P_{\Sigma R,M} + (G_M - 1) P_{ASE R,M}\} \cdot \left\{1 + (1 - e^{-\alpha L_{M+1}}) \left[G_M \left(\sum_{j=1}^{R-1} \beta_{Rj} P_{\Sigma j,M} + (G_M - 1) \sum_{j=1}^{R-1} \beta_{Rj} P_{ASE j,M} \right) \right] \right\} \cdot e^{-\alpha L_{M+1}}. \end{aligned} \right.$$

Известно, что при одной и той же энергии сигнала E_s , вероятность битовой ошибки в общем случае оказывается зависимой еще и от скорости передачи B .

В ВОСП для обеспечения $p_{ош} = \text{const}$ при возрастании скорости передачи в v раз степень повышения мощности передатчика зависит от соотношения квантовых шумов сигнала и внутренних шумов приемника.

Очевидно, что в таком случае ВКР также будет воздействовать на влияние мощности и скорости передачи оптического сигнала на достоверность передачи оптического сигнала.

Для обеспечения требуемой достоверности передачи оптического сигнала при увеличении скорости передачи в ВОСП в v раз при прочих

равных условиях потребуется увеличение мощности сигнала только в $\sqrt{\nu}$ раз [1]. Следовательно, при условии, что квантовые шумы значительно ниже мощности внутренних шумов приемника $P_{kv} \ll P_{vn}$, увеличение скорости передачи в ВОСП при сохранении постоянной достоверности передачи ведет к снижению энергии оптического сигнала.

Таким образом, зная тип внешнего модулятора (пьезооптический или акустооптический), зависимость скорости передачи от вводимой мощности можно представить выражением:

$$P_{vv,r} = -\chi B^2 + P_{ist,r}, \quad \text{где } r = \overline{1, R}, \quad (2)$$

где $P_{ist,r}$ – мощность ИОИ, излучаемая в r -й СКРС, мВт; B – скорость передачи, Гбит/с, χ – коэффициент зависимости изменения мощности сигнала от скорости модуляции, обусловленный типом внешнего модулятора.

Из выражения (2) следует, что при изменении скорости передачи в ВОСП необходимо изменить вводимую мощность сигнала $P_{vv,r}$ в каждый СКРС, что также приведет к изменению слагаемого, определяющего долю мощности, изменяющуюся вследствие ВКР.

На основании разработанной авторами модели ВОЛТ с МДВ и линейными ВОУ было проведено исследование зависимости значения отношения оптический сигнал-шум (ООСШ) от длины линии при различных номиналах скорости передачи оптического сигнала.

В качестве объекта моделирования был выбран восьмиволновой ($R = 8$) ВОЛТ с двумя ($M = 2$) линейными ВОУ общей протяженностью $L = 72$ км и одинаковыми УС $l_{yc1} = l_{yc2} = l_{yc3} = 24$ км. В качестве исходных данных при моделировании использовались: длины волн СКРС $\lambda_1 = 1531,12$ нм; $\lambda_2 = 1531,33$ нм; $\lambda_3 = 1531,90$ нм; $\lambda_4 = 1532,69$ нм; $\lambda_5 = 1533,47$ нм; $\lambda_6 = 1534,25$ нм; $\lambda_7 = 1535,04$ нм; $\lambda_8 = 1535,82$ нм; затухание ОВ $\alpha = 0,2$ дБ/км; коэффициент ВКР $g_0 = 6,32 \cdot 10^{-14}$ м/Вт; поляризационный коэффициент $K = 2$; эффективная площадь поперечного сечения ОВ $A = 3,08 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$; мощность шума, вносимая ИОИ $P_{n,ist,r} = 10^{-5}$ мВт; мощность источника оптического излучения $P_{ist,r} = 0,425$ мВт; коэффициенты усиления линейных ВОУ $G_1 = 5$ дБ, $G_2 = 8$ дБ; коэффициенты шума линейных ВОУ $K_{N1} = K_{N2} = 5,5$ дБ. При моделировании выполнялось условие, что скорость передачи одинакова во всех СКРС и постоянна, таким образом, моделируемый ВОЛТ является *гомогенным*. Моделирование проводилось для номинала скоростей передачи $B_r = 9,6$ Гбит/с; 10 Гбит/с; 10,4 Гбит/с.

Результаты моделирования представлены на рисунке 1.

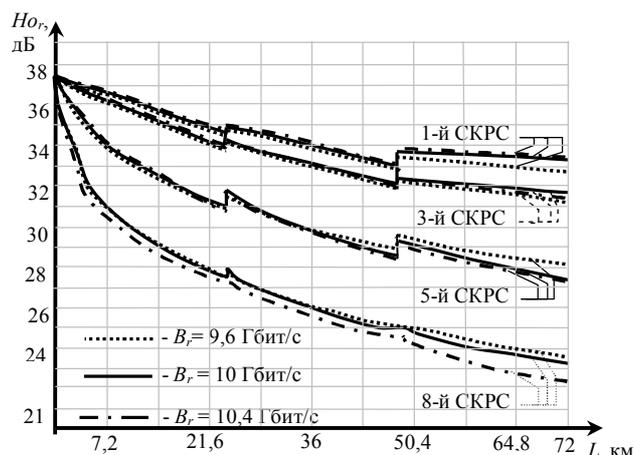


Рисунок 1 – График зависимости значения ООСШ от длины линии при вариации скорости передачи оптического сигнала

Из анализа рисунка 1 видно, что при увеличении скорости передачи оптического сигнала значение ООСШ в более длинноволновых СКРС падает.

В случае если в каждом СКРС будут использоваться различные технологии переноса с различной скоростью передачи оптического сигнала, то такой ВОЛТ является *мультипротокольным* и *гетерогенным*.

Авторами исследовалась достоверность передачи оптического сигнала по мультипротокольному гетерогенному ВОЛТ с МДВ и линейными ВОУ при аналогичных условиях моделирования.

При моделировании были введены дополнительные условия: в СКРС № 1-2 скорость передачи оптического сигнала составляет 9,6 Гбит/с, в СКРС № 3-4 скорость передачи составляет 10 Гбит/с, в СКРС № 5-6 скорость передачи оптического сигнала – 9,8 Гбит/с, для СКРС № 7-8 эта величина составляет 10,2 Гбит/с.

Результаты моделирования приведены в таблице 1.

Таблица 1

СКРС №	1	2	3	4
B_r , Гбит/с	9,6		10	
$P_{vv,r}$, мВт	0,125	0,125	0,1	0,1
No_r , дБ	32,84	32,135	30,867	29,607
СКРС №	5	6	7	8
B_r , Гбит/с	9,8		10,2	
$P_{vv,r}$, мВт	0,112	0,112	0,087	0,087
No_r , дБ	28,436	26,513	23,972	23,115

Анализ данных таблицы 1 показывает, что значение ООСШ для различных СКРС в гетерогенном мультипротокольном ВОЛТ различно.

Следовательно, и достоверность передачи в каждом СКРС разная.

Вышеперечисленные особенности мультипротокольных гетерогенных ВОЛТ с МДВ и линейными ВОУ свидетельствуют о необходимости решать комплекс оптимизационных задач, направленных:

на максимизацию длины ВОЛТ при заданных требованиях к пропускной способности (количеству СКРС и скорости передачи в них) и достоверности передачи;

максимизацию пропускной способности (количества СКРС и скорости передачи в них) ВОЛТ при заданных требованиях к дальности связи и достоверности передачи;

определение оптимальной загрузки спектральных каналов ВОЛТ мультипротокольными данными (в том числе с переменной скоростью передачи) при заданной достоверности передачи;

определение предельных значений скорости передачи мультипротокольных данных в спектральных каналах ВОЛТ при заданной достоверности передачи.

В данной статье рассмотрена задача максимизации пропускной способности ВОЛТ при заданных требованиях к дальности связи и достоверности передачи.

Таким образом, при рассмотрении мультипротокольного ВОЛТ необходимо решить задачу определения значений P_{vvr} вводимой в ОВ мощности и коэффициентов усиления G_m линейных ВОУ, обеспечивающих максимальную суммарную скорость передачи оптического сигнала B_{Σ} при выполнении требований по достоверности Ho_r^* и дальности передачи L , т. е.

$$B_{\Sigma} \xrightarrow{P_{vvr}, G_m, l_t} \max. \quad (3)$$

$$Ho_r \geq Ho_r^*, \quad r = \overline{1, R}, \quad (4)$$

$$\sum_{r=1}^R P_{vvr} \leq P_{max}, \quad r = \overline{1, R} \quad (5)$$

$$G_m \leq G_{max}, \quad m = \overline{1, M}, \quad (6)$$

$$\sum_{t=1}^{M+1} l_t = L, \quad t = \overline{1, M+1}. \quad (7)$$

Поставленную задачу можно решить, опираясь на разработанную авторами модель и используя результаты решения задачи максимизации ООСШ на входе решающего устройства ПРОМ для заданного числа СК и заданной протяженности ВОЛТ. Ввиду вычислительной сложности сформулированной задачи целесообразнее решать ее численными методами [6].

Авторами решена задача максимизации скорости передачи в каждом СКРС мультипротокольного гетерогенного ВОЛТ с МДВ и линей-

ными ВОУ. Схема алгоритма максимизации скорости передачи оптического сигнала в мультипротокольном ВОЛТ представлена на рисунке 2.

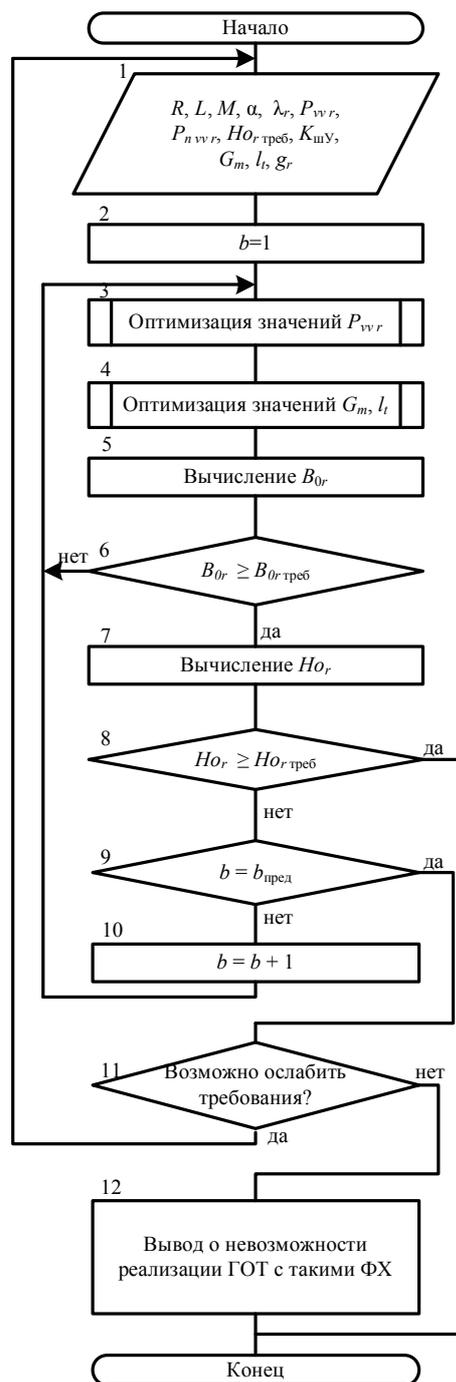


Рисунок 2 – Схема алгоритма оптимизации параметров ВОЛТ по показателю скорости передачи оптического сигнала

Специфика алгоритма заключается в том, что он является итерационным: после оптимизации вводимой мощности (обозначено процедурой в символе 3), коэффициентов усиления линейных ВОУ и длин усилительных секций (обозначено процедурой в символе 4) проводятся проверка на соответствие скорости передачи заданным требованиям и вычисление значения

ОСШ, после чего проверяется количество шагов алгоритма и происходит снова процедура оптимизации параметров ВОЛТ, пока не будет получено максимальное значение B_{Σ} или заданные B_{or} .

Исследования показали, что предлагаемый алгоритм позволяет находить решение за конечное число шагов. Разработанный алгоритм позволяет максимизировать скорость передачи в каждом СКРС гетерогенного мультипротокольного ВОЛТ с МДВ и линейными ВОУ в условиях доминирующего влияния ВКР.

Следует отметить, что разработанный алгоритм может применяться как при решении задач проектирования ВОЛТ, так и при решении задач управления.

При решении задач планирования и проектирования гетерогенного ВОЛТ в представленном алгоритме будут выполняться все процедуры, в качестве исходных данных которых используются типовые функциональные характеристики оптических компонентов.

При решении задачи управления функционирующим мультипротокольным ВОЛТ управляемыми параметрами оказываются только мощность, вводимая в ОВ, и ток накачки ВОУ. Следовательно, в этом случае процедуры выбора оптимальной длины усилительной секции не будут реализованы.

В качестве примера работы алгоритма рассмотрена оптимизация параметров активных компонентов мультипротокольного гетерогенного ВОЛТ с МДВ и линейными ВОУ. Количество СКРС $R = 8$; количество линейных ВОУ $G = 2$; протяженность ВОЛТ $L = 72$ км; длины УС $l_{yc1} = l_{yc2} = l_{yc3} = 24$ км; рабочие длины волн СКРС $\lambda_1 = 1531,12$ нм; $\lambda_2 = 1531,33$ нм; $\lambda_3 = 1531,90$ нм; $\lambda_4 = 1532,69$ нм; $\lambda_5 = 1533,47$ нм; $\lambda_6 = 1534,25$ нм; $\lambda_7 = 1535,04$ нм; $\lambda_8 = 1535,82$ нм; затухание ОВ $\alpha = 0,2$ дБ/км; коэффициент ВКР $g_0 = 6,32 \cdot 10^{-14}$ м/Вт; поляризационный коэффициент $K = 2$; эффективная площадь поперечного сечения ОВ $A = 3,08 \cdot 10^{-11}$ м²; мощность шума, вносимая ИОИ, $P_{n\text{ist } r} = 10^{-5}$ мВт; мощность источника излучения $P_{ist\ r} = 0,425$ мВт; коэффициенты усиления ВОУ $G_1 = 5$ дБ, $G_2 = 8$ дБ; коэффициенты шума линейных ВОУ $K_{N1} = K_{N2} = 5,5$ дБ. При условии, что скорость передачи оптического сигнала в каждом СКРС не ниже 10 Гбит/с.

Результаты расчета значения ООСШ приведены в таблице 2.

Для технологии SDH при скорости передачи сигнала 10 Гбит/с (STM-64) значение ООСШ должно быть не ниже 27 дБ [2]. Из анализа данных таблицы 2 следует, что достоверность пере-

дачи в СКРС № 6-8 не удовлетворяет этим требованиям.

Таблица 2

СКРС №	1	2	3	4
B_r , Гбит/с	10		10	
$P_{ввр}$, мВт	0,1	0,1	0,1	0,1
Ho_r , дБ	33,211	32,967	31,657	29,612
СКРС №	5	6	7	8
B_r , Гбит/с	10		10	
$P_{ввр}$, мВт	0,1	0,1	0,1	0,1
Ho_r , дБ	27,659	25,958	24,472	23,185

Результаты решения данной задачи с помощью предложенного алгоритма представлены в таблице 3 и на рисунке 3.

Таблица 3

СКРС №	1	2	3	4
B_r , Гбит/с	10,4		10,2	
$P_{ввр}$, мВт	0,023	0,046	0,032	0,049
Ho_r , дБ	27,042	27,091	27,06	27,04
СКРС №	5	6	7	8
B_r , Гбит/с	10,15		10,1	
$P_{ввр}$, мВт	0,039	0,06	0,07	0,157
Ho_r , дБ	27,036	27,025	27,026	27,023

Из анализа данных таблицы 3 видно, что максимально возможная (потенциально достижимая) скорость передачи оптического сигнала при заданных функциональных характеристиках оптических компонентов и требованиях надсистемы может составлять 10,4 Гбит/с.

Минимальная скорость при этом не может быть менее 10,1 Гбит/с (требования модулятора). Общая протяженность ГОТ при этом оказывается 72 км, а значение ООСШ более 27 дБ, что удовлетворяет требованиям по достоверности передачи оптического сигнала.

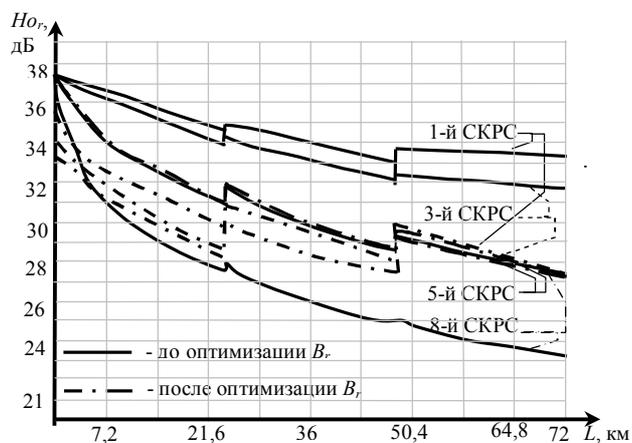


Рисунок 3 – График зависимости ООСШ от длины до и после оптимизации параметров ВОЛТ

Выводы. Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что решение задачи оптимизации параметров активных компонентов мультипротокольного гетерогенного ВОЛТ с МДВ и линейными ВОУ позволяет повысить суммарную скорость передачи информации. На этапе проектирования ВОСП следует решать задачу оптимизации мощности, вводимой в каждый СКРС для минимизации эффекта ВКР, в сочетании с задачей по обеспечению максимальной скорости передачи оптического сигнала при заданной достоверности передачи. Конструктивизм полученного инструментария заключается в том, что решение комплекса оптимизационных задач позволяет аналитически определить рациональные значения *параметров оптических компонентов* для любой совокупности значений ООСШ и, следовательно, для любого набора требований по p_{om} и скорости передачи в спектральных каналах корпоративных инфокоммуникационных систем.

Библиографический список

1. Саитов И.А., Щекотихин В.М. Теоретические основы построения средств связи оптического диапазона: учебн. пособие. – Орел: Академия ФСО России, 2008. – 490 с.
2. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети. – М.: Эко-Трендз, 2001. – 267 с.
3. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика. – М: Мир, 1996. – 234 с.
4. Овчинников А.А., Светиков Ю.В., Синев С.Г. Методика оптимизации параметров линейного тракта ВОСП со спектральным разделением // Электросвязь № 12. 1992. – С. 19–21.
5. Саитов И.А., Мясин Н.И., Мясин К.И. Максимизация длины линейного тракта ВОСП с мультиплексированием по длине волны и линейными оптическими усилителями // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – Рязань, 2008. Выпуск 26. – С. 41–45.
6. Чуличков А.И. Экстремальный анализ. Конспект лекций / А.И. Чуличков. – М., 2007. – 57 с.