

УДК 621.396

И.А. Саитов, Н.И. Мясин, К.И. Мясин

МАКСИМИЗАЦИЯ ДЛИНЫ ЛИНЕЙНОГО ТРАКТА ВОСП С МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕМ ПО ДЛИНЕ ВОЛНЫ И ЛИНЕЙНЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ УСИЛИТЕЛЯМИ

Предлагается новый подход к решению задачи повышения дальности передачи сигналов в волоконно-оптической системе передачи посредством оптимизации характеристик активных компонент волоконно-оптического линейного тракта с мультиплексированием по длине волны и линейными волоконно-оптическими усилителями с учетом влияния эффекта вынужденного комбинационного рассеяния. Проведен анализ влияния эффекта вынужденного комбинационного рассеяния на достоверность передачи сигналов в волоконно-оптической системе передачи.

Ключевые слова: *волоконно-оптический линейный тракт; мультиплексирование по длине волны; нелинейные эффекты; вынужденное комбинационное рассеяние; волоконно-оптический усилитель; отношение оптический сигнал-шум.*

Введение

В современных сетях связи в настоящее время нашли широкое применение волоконно-оптические системы передачи (ВОСП). Волоконно-оптические направляющие системы электросвязи имеют потенциально наивысшее качество образуемых каналов и трактов передачи, как с точки зрения модуляционной скорости, так и по параметрам достоверности передачи.

Для компенсации потерь оптической мощности в ВОСП все чаще используются линейные волоконно-оптические усилители (ВОУ). Эти устройства обладают рядом достоинств, к основным из которых относятся их "прозрачность" к формату передаваемого сигнала и относительно невысокая стоимость. Значительный экономический выигрыш от замены электрооптических регенераторов на линейные ВОУ особенно ощутим в ВОСП, где используются системы мультиплексирования по длине волны (*DWDM* или *CWDM*).

В течение последних 10 лет выявлены и описаны нелинейные эффекты в оптическом волокне (ОВ), обуславливающие искажение оптических сигналов в ВОСП с мультиплексированием по длине волны (МДВ). Это эффект вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР), эффект Манделъштама-Бриллюэна, четырехволновое параметрическое смешение, фазовые самомодуляция и кроссмодуляция. Доказано, что для типовых скоростей передачи и фотоприемных устройств (ФПУ), применяемых в ВОСП, особую важность имеет явление ВКР.

Таким образом, задача разработки научно-методического инструментария структурной оптимизации ВОСП с мультиплексированием по длине волны и линейными ВОУ является актуальной.

Основная часть

Анализ существующих подходов к моделированию волоконно-оптического линейного тракта (ВОЛТ) показал, что в большинстве из них, при рассмотрении основных передаточных характеристик ОВ, считается, что ОВ является *линейной* направляющей системой. Однако на практике возникают ситуации, когда ОВ нельзя считать линейной системой. Оптический сигнал в таких условиях искажается из-за проявления нелинейных свойств среды распространения.

Применение ВОУ в ВОЛТ с МДВ позволяет компенсировать затухание оптического сигнала в пассивных элементах оптического тракта. Вместе с этим ВОУ заметно повышают мощность помех, вызванных нелинейными эффектами в ОВ. При этом мощность помех может стать соизмеримой с мощностью оптического сигнала (до нескольких милливольт в нескольких спектральных каналах (СК)) по всей полосе пропускания тракта, что ведет к протяженным участкам их взаимодействия с полезным оптическим излучением [1, 2].

Вынужденное комбинационное рассеяние – нелинейный процесс, называемый также *эффектом Рамана* (*stimulated Raman's scattering*,

SRS), при котором излучение взаимодействует с молекулярными колебаниями вещества ОБ с генерацией фотонов более низкой частоты. Величина наблюдаемого частотного сдвига определяется свойствами среды распространения излучения. В ВОСП с МДВ и ВОУ это приводит, что энергия из СК с несущей большей частоты переходит в СК с несущей меньшей частоты. Первый сигнал деградирует, а во втором СК возникает и растет ВКР-помеха.

Известна модель [3] для нахождения порога ВКР, представляющая собой, систему уравнений взаимодействия стоксовой волны и волны накачки, которые строго выводятся из уравнений Максвелла:

$$\begin{cases} \frac{dI_C}{dz} = g_p \cdot I_H \cdot I_C - \alpha_C \cdot I_C, \\ \frac{dI_H}{dz} = -\frac{\omega_H}{\omega_C} \cdot g_p \cdot I_H \cdot I_C - \alpha_C \cdot I_H, \end{cases} \quad (1)$$

где I_C – интенсивность стоксовой волны, I_H – интенсивность волны накачки (оптического сигнала), α_C и α_H – коэффициент собственных потерь ОБ соответственно на стоксовой частоте $\omega_C = 2\pi f_C$ и частоте накачке $\omega_H = 2\pi f_H$.

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_1}{\partial z} + \alpha_1 P_1 &= -\frac{g_0}{K \cdot A_{эфф}} \cdot P_1 \sum_{j=2}^N \theta_{1j} P_j, \\ \frac{\partial P_n}{\partial z} + \alpha_n P_n &= \frac{g_0}{K \cdot A_{эфф}} \cdot P_n \left(\sum_{j=1}^{n-1} \delta_{jn} \theta_{jn} P_j - \sum_{j=n+1}^N \theta_{nj} P_j \right), \\ \frac{\partial P_N}{\partial z} + \alpha_N P_N &= -\frac{g_0}{K \cdot A_{эфф}} \cdot P_N \cdot \sum_{j=1}^{N-1} \delta_{jN} \theta_{jN} P_j \end{aligned} \quad (2)$$

где P_n – мощность оптического сигнала n -того канала в произвольной точке z длины ОБ; $n = 1, 2, \dots, N$; $j = 1, 2, \dots, N$; $n \neq j$; $\theta_{jn} = g/g_0$, где g_0 – максимальный коэффициент ВКР, g – коэффициент ВКР в произвольной точке профиля спектральной кривой ВКР; $\delta_{jn} = \lambda_j/\lambda_n$, где $\lambda_1 < \lambda_2 < \dots < \lambda_n < \dots < \lambda_N$ – длины волны спектральных каналов, α_n – затухание оптического сигнала на n -ой длине волны; $A_{эфф}$ – эффективная площадь ОБ, K – поляризационный коэффициент ОБ ($1 < K < 2$).

По расчетам, проведенным авторами для трехканальной ВОЛТ с МДВ протяженностью 100 км со следующими параметрами: $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha = 0,2$ дБ/км; $A_{эфф} = 3,08 \cdot 10^{-11}$ м²; $K = 2$; $g_0 = 6,32 \cdot 10^{-14}$ мВт; $\lambda_1 = 1530$ нм; $\lambda_2 = 1540$ нм; $\lambda_3 = 1550$ нм; при вводимых мощностях 10 и 1 мВт построены графики приведенные на рисунке 1.

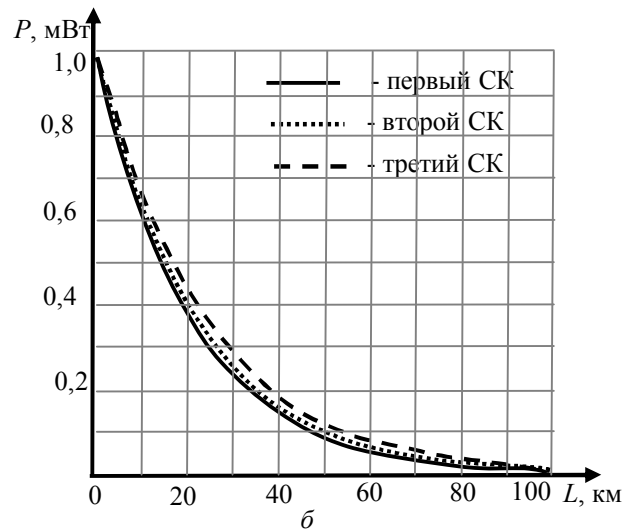
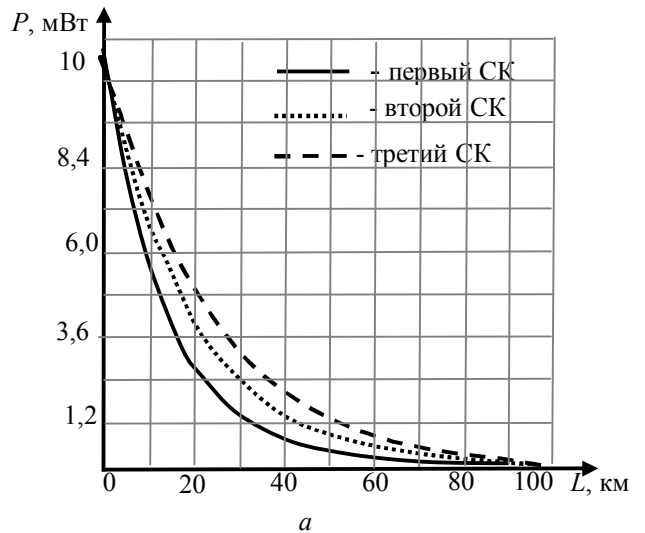


Рисунок 1. График зависимости мощности в СК от длины линии при вводимой мощности сигнала: а – 10 мВт; б – 1 мВт

Из анализа рисунка 1 видно, что быстрее всего деградирует мощность в первом СК, а в третьем СК вследствие явления ВКР мощность самая большая. Так же видно, что взаимодействие между СК наиболее сильно проявляется на протяжении первых 30...50 км, а затем с увеличением длины линии заметно снижается вследствие того, что оптические несущие испытывают большое затухание.

Однако явление ВКР может так же использоваться для усиления оптического сигнала, на основе чего разработан ВКР-усилитель. В по-

следнее время ВКР-усилители становятся все более привлекательной технологией для использования на высокоскоростных протяженных ВОСП.

По оценкам некоторых специалистов [1,2] наиболее эффективным является применение ВКР-усилителей в ВОЛТ с МДВ.

По сравнению с широко используемыми эрбиевыми усилителями, ВКР-усилители обладают рядом преимуществ. Они могут обеспечивать достаточно широкую рабочую полосу усиления, особенно при использовании многоканальной схемы накачки. Расположение окна усиления определяется длинами волн накачки и при соответствующем выборе параметров накачки может быть смещено в требуемый диапазон длин волн. Также, коэффициент шума ВКР-усилителя может быть значительно ниже предельного значения 3 дБ для эрбиевого усилителя.

Конструкция ВКР-усилителя достаточно проста и в качестве рабочей среды может применяться стандартное телекоммуникационное волокно. Другое преимущество заключается в том, что при использовании специальных волокон возможно одновременное усиление сигнала и компенсация накопленной дисперсии. Использование в качестве рабочей среды волокна компенсации дисперсии, как правило, имеющего высокий уровень рамановского усиления, позволяет повысить эффективность усилителя.

При строительстве ВОЛТ используются следующие конфигурации ВКР-усилителей: распределенный усилитель, сосредоточенный (дискретный) усилитель или гибридный усилитель. В ряде работ [2] были продемонстрированы преимущества использования распределенных ВКР-усилителей на ВОЛП. Применение ВКР-усилителей приводит к увеличению отношения оптический сигнал-шум (ООСШ) и снижению влияния нелинейных эффектов, что позволяет увеличить протяженность усилительных участков и повысить скорость передачи.

В ряде работ была описана динамика ВКР-усиления и произведен анализ параметров передачи [1, 2]. Следует отметить, что ВКР-усилителям присущ еще один вид шумов – шумы двойного рэлеевского рассеяния. В этих работах оценка качества передачи была основана на определении оптического отношения сигнал-шум и эквивалентного коэффициента шума. Для оценки качества передачи с учетом дисперсионных и нелинейных эффектов, а также специфических шумов, возникающих в ВКР-усилителе, необходимо разработать более полную модель, описывающую распространение сигналов в оптическом волокне с ВКР-усилением.

В соответствии с принятым в предметной области программно-целевым подходом, эффективность ВОСП будет определяться степенью достижения ее целей функционирования.

Авторами разработана модель многопролетной ВОЛТ с МДВ и линейными ВОУ, учитывающая доминирующее влияние эффекта ВКР на характеристики оптического сигнала. Эта модель является дальнейшим развитием модели [4] и представляет собой четыре системы дифференциальных уравнений, которые при известной зависимости выходной мощности передающего оптического модуля (ПОМ) от величины токов накачки ИОИ, коэффициента усиления линейных ВОУ от токов накачки активной области, связывают системные параметры с управляемыми характеристиками ВОЛТ.

На этапе **проектирования** под эффективностью построения ВОСП с МДВ и ВОУ считается задача максимизации ООСШ на входе решающего устройства приемного оптического модуля (ПРОМ) для данного числа СК и заданной длине усилительной секции (УС).

Аналогичная задача для ВОЛТ с МДВ и М линейными ВОУ поставлена и решена авторами.

$$\max_{P_{i_n}, G_i, l_k} \left\{ \min_{n} Ho_n \right\}, \quad n \in \overline{1, N}, \quad i \in \overline{1, M}, \quad k \in \overline{1, M+1},$$

при следующих ограничениях:

$$\sum_{k=1}^{M+1} l_k = L^*, \quad k \in \overline{1, M+1}, \quad (4)$$

$$\sum_{n=1}^N P_{\Sigma, n} \leq P_{нас}, \quad n \in \overline{1, N}, \quad (5)$$

$$G_i \leq G_{max}, \quad i \in \overline{1, M}. \quad (6)$$

Здесь Ho_n – значение ООСШ в n -ом СК, $n \in \overline{1, N}$, где N – число спектральных каналов; P_{i_n} – мощность вводимая в n -ый СК, $n \in \overline{1, N}$; G_i – коэффициент усиления i -го линейного ВОУ, $i \in \overline{1, M}$, где M – число линейных ВОУ; l_k длина k ой УС, $k \in \overline{1, M+1}$; L^* – заданная протяженность ВОЛТ с МДВ и линейными ВОУ; $P_{\Sigma, n}$ – суммарная мощность в n -ом СК, $n \in \overline{1, N}$; $P_{нас}$ – мощность насыщения линейного ВОУ; G_{max} – максимальный коэффициент усиления линейного ВОУ.

Возросшая вычислительная сложность сформулированной задачи обусловила необходимость ее решения численными методами [5].

Полученное решение такой системы показало, что снизить влияние ВКР можно посредством повышения мощности сигнала, вводимой в длинноволновые СК с соответствующим понижением мощности сигнала, вводимой в коротковолновые СК. Это позволит выровнять оптические мощности на входе первого ВОУ и снизить величину помех ВКР на его входе, и, следовательно, выходе тракта в целом.

Иногда задача проектирования ставится как обеспечение заданных расчетных значений дальности связи, общей пропускной способности и достоверности передачи в СК при минимуме первичной стоимости линии. Последнее обеспечивается минимальным числом активных компонентов, т. е. максимальной длиной УС.

Таким образом, необходимо максимизировать протяженность линии связи при заданной достоверности в n -ом СК, которая выражается через ООСШ – Ho_n , где $n = \overline{1, N}$.

Очевидно, что решение такой задачи для всей протяженности ВОЛТ с МДВ и линейными ВОУ будет более предпочтительным, чем оптимизация длины каждой УС в отдельности. При этом следует учесть, что увеличивается длина взаимодействия оптических сигналов, а, следовательно, возрастает мощность ВКР-помех.

Это позволяет сформулировать следующую оптимизационную задачу: определить оптимальные значения мощности сигналов Pi_n , вводимых в каждый СК, максимальную протяженность ВОЛТ L и значения коэффициентов G_i усиления ВОУ, обеспечивающих требуемое значение ООСШ – Ho_n^* на выходе n -го СК. Исходными данными для такой задачи будут являться: число спектральных каналов – N ; требуемая протяженность ВОЛТ – L^* ; количество ВОУ – M , потери мощности между которыми определяются как $\exp(-l_k)$, где α – коэффициент затухания ВОУ; l_k – длина k -й усилительной секции, $k = \overline{1, M+1}$; Pi_n – мощность сигнала вводимая в n -й СК, $n = \overline{1, N}$, заданное значение ООСШ на выходе n -го СК – Ho_n^* , $n = \overline{1, N}$.

Данную задачу можно решить, используя разработанную авторами модель и используя результаты задачи максимизации ООСШ на входе решающего устройства ПРОМ для заданного числа СК и заданной протяженности ВОЛТ. Для этого необходимо ввести ограничение на значение минимального ООСШ, а максимизируемым параметром является длина ВОЛТ.

Формально условие такой оптимизационной задачи целесообразно записать в следующем виде:

$$L \rightarrow \max_{Pi_n, G_i}, \quad (7)$$

при следующих ограничениях:

$$Ho_n \geq Ho_n^*, \quad n = \overline{1, N}, \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^{M+1} l_k > L^*, \quad k = \overline{1, M+1}, \quad (9)$$

$$G_i \leq G_{\max}, \quad i = \overline{1, M}. \quad (10)$$

$$\sum_{n=1}^N P_{\Sigma, n} \leq P_{\text{нас}}, \quad n = \overline{1, N} \quad (11)$$

Авторами была решена задача оптимизации для трехканальной ВОСП с МДВ, содержащей два линейных ВОУ при следующих исходных данных: затухание ВОУ $\alpha = 0,22$ дБ/км; рабочие длины волн СК $\lambda_1 = 1531,12$ нм, $\lambda_2 = 1531,33$ нм, $\lambda_3 = 1531,90$ нм; коэффициент ВКР $g_0 = 6,32 \cdot 10^{-14}$ м/Вт; поляризационный коэффициент $K = 2$; эффективная площадь поперечного сечения ВОУ $A = 3,08 \cdot 10^{-11}$ м²; мощность шума, вносимая ИОИ 10^{-5} мВт; мощность вводимого сигнала в каждый СК 5 мВт; коэффициенты усиления линейных ВОУ $G_1 = G_2 = 15$ дБ; коэффициенты шума линейных ВОУ $K_{N1} = K_{N2} = 5,5$ дБ. Пусть стоит задача обеспечить максимальную протяженность ВОЛТ, при заданных исходных данных и условии, что значение ООСШ на входе фотоприемного устройства должно быть не ниже 15 дБ.

В ходе расчета по методике [2] установлено, что при приведенных исходных данных и равномерном размещении линейных ВОУ длина усилительных участков составит 66 км, следовательно, общая протяженность линии должна быть не менее 198 км.

Предварительные исследования [6] позволили сформулировать новый подход к решению поставленной выше задачи структурной оптимизации.

В результате решения задачи максимизации длины линии получено, что при мощности вводимого сигнала в СК1 равной 0,204 мВт, в СК2 = 0,335 мВт, в СК3 = 5,2 мВт и при изменении коэффициентов усиления линейных ВОУ $G_1 = 15,574$ дБ, $G_2 = 14,871$ дБ, можно организовать волоконно-оптическую линию связи общей протяженностью 220 км, содержащую две УС протяженностью 77,5 км каждая, и одну УС протяженностью 65 км. При этом будет обеспечиваться $Ho_n = 15,06$ дБ. На рисунке 2 приведен гра-

фик зависимости ООСШ в трех СК оптимизированной ВОСП с учетом влияния ВКР.

Таким образом, из расчетов видно, что при решении задачи структурной оптимизации волоконно-оптической линии связи удалось повысить длину линии на 10 %.

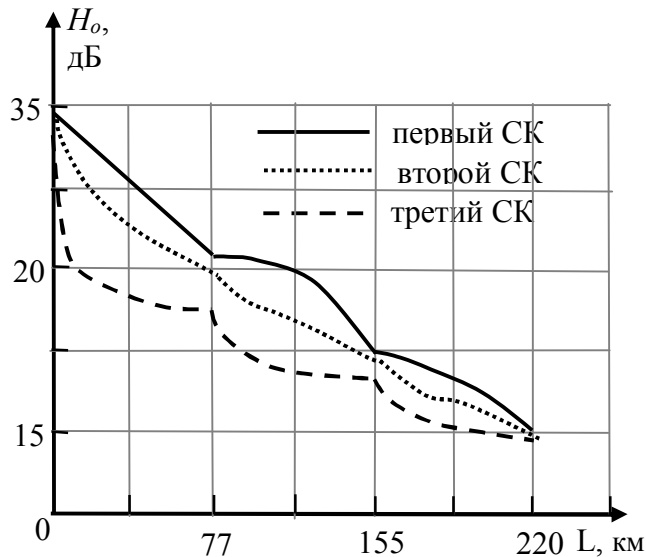


Рисунок 2. График зависимости ООСШ в СК оптимизированной ВОСП с двумя ВОУ с учетом влияния ВКР

Выводы

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что решение задачи структурной оптимизации параметров активных компонентов ВОЛТ с МДВ позволяет значительно повысить дальность передачи информации. Кроме того, на этапе проектирования ВОСП, следует решать задачу оптимизации мощности вводимой в

каждый СК для минимизации эффекта ВКР. в сочетании с задачей по обеспечению максимальной протяженности линии связи при заданной достоверности 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 $p_{ош}$ и скорости передачи в спектральных каналах корпоративных инфокоммуникационных систем

Библиографический список

1. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. – М.: Компания Сайрус Системс, 1999. – 671 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. Калиткин Н.Н. Численные методы. – М.: Наука, 1988. – 512 с.
6. Саитов И.А., Мясин Н.И. Структурная оптимизация характеристик волоконно-оптических систем передачи с линейными оптическими усилителями // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. Рязань, 2007. Выпуск 22. – С. 30-35.