

И.А. Саитов, Н.И. Мясин

СТРУКТУРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ С ЛИНЕЙНЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ УСИЛИТЕЛЯМИ

Предлагается новый подход к решению задачи повышения достоверности передачи сигналов в волоконно-оптической системе передачи посредством оптимизации характеристик линейных волоконно-оптических усилителей. Проведено сравнение величины отношения оптический сигнал/шум при традиционном размещении линейных волоконно-оптических усилителей и при их градиентном размещении.

Введение. 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. Это обусловило их широкое применение в современных сетях связи.

Для компенсации потерь оптической мощности в волоконно-оптических системах передачи (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. Существенная экономия средств от замены электрооптических регенераторов на линейные ВОУ особенно ощутим в ВОСП, где используются системы мультиплексирования по длине волны (DWDM или CWDM). Однако опыт внедрения оптических технологий передачи информации показывает, что при всех достоинствах новой компонентной базы имеется ряд трудностей практического и методического характера [1]. Особенно эти сложности проявляются при необходимости модернизировать часть транспортной сети (например, заменить часть электрооптических регенераторов – линейными ВОУ), а не перестраивать всю сеть. Часто производители и поставщики оборудования на рынке предлагают готовые ВОСП с типовыми параметрами ("под ключ"), которые не

всегда отвечают целям или условиям модернизации сети. Следовательно, задача разработки соответствующего научно-методического инструментария является актуальной.

Общие положения. В настоящее время широко применяются линейные ВОУ на основе оптических волокон (ОВ), легированных эрбием Er^{+3} . К таким усилителям предъявляется ряд

требований, таких как [2]: высокий коэффициент усиления в заданном диапазоне длин волн, минимальный уровень собственных шумов, нечувствительность к поляризации, большой динамический диапазон, минимальные искажения сигналов и т. д. В зависимости от используемой области усиления, определяемой величиной тока накачки ($i_{нх}$), эрбиевые ВОУ могут применяться:

– в режиме насыщения – в качестве усилителя мощности сигнала от источника оптического излучения (ИОИ) на выходе WDM-мультиплексора (МР) передающего оптического модуля (ПОМ);

– в режиме промежуточных значений усиления и шума – в роли линейного усилителя (ЛОУ) ВОСП;

– в режиме, обеспечивающем наименьшую мощность собственного шума, – в качестве предварительного усилителя фотоприемного устройства (ФПУ) на входе WDM-демультиплексора (ДМ) приемного оптического модуля (ПРОМ).

Типовая схема применения линейных эрбиевых ВОУ в волоконно-оптических линейных трактах (ВОЛТ) с мультиплексированием по длине волны (МДВ) представлена на рисунке 1.

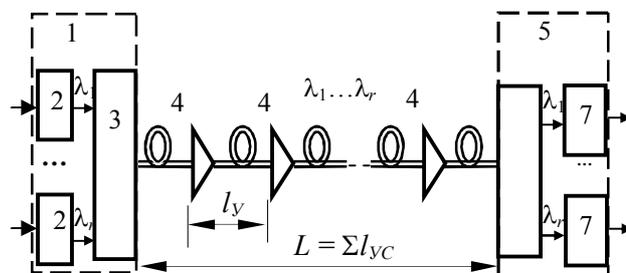


Рисунок 1 – Структура многоволновой ВОСП с усилителями

На рисунке 1 цифрами обозначены: 1 – ПОМ; 2 – ИОИ; 3 – МР; 4 – ЛОУ; 5 – ПРОМ; 6 – ДМ; 7 – ФПУ.

Применение линейных эрбиевых ВОУ сопряжено с проявлением целого комплекса новых факторов, основными из них которых являются [2, 3]:

- однонаправленность распространения оптических сигналов по ОВ с ВОУ. Дуплексная связь может быть организована только по паре ОВ;

- линейные ВОУ являются источником дополнительного типа оптического шума – шума усиленного спонтанного излучения (УСИ), который ухудшает отношение сигнал/шум (ОСШ) на входе решающего устройства приемника;

- высокая мощность оптического сигнала на входе ВОУ может вызвать режим его насыщения, при котором не будет обеспечен требуемый для компенсации затухания ВОЛТ коэффициент усиления;

- каскадное включение ВОУ в протяженных линиях приводит к ощутимому сужению ширины полосы пропускания;

- частотная зависимость коэффициента усиления ВОУ, следовательно, сигналы в одних спектральных каналах усиливаются лучше, чем в других;

- создаются дополнительные условия для возникновения нелинейных оптических эффектов ОВ, при которых "возбуждение" хотя бы одного спектрального канала приводит к "перегрузке" или "истощению" остальных.

Несмотря на выделенные аспекты, достоинства ВОУ способствовали их широкому применению в ВОСП с МДВ. Международные стандарты предписывают для реализации ВОСП с МДВ и ВОУ необходимость выполнения ряда требований:

- характеристики оптических кабелей должны соответствовать стандартам, рекомендованным МСЭ-Т G.652, G.653, G.654, G.655;

- линейные оптические усилители по своим характеристикам должны соответствовать рекомендациям МСЭ-Т G.661, G.662, G.663;

- пассивные оптические компоненты волоконно-оптического линейного тракта (ВОЛТ) должны соответствовать по своим характеристикам рекомендациям МСЭ-Т G.671;

- ВОЛТ должны быть резервированы частично или полностью (схемы резервирования 1 : n и 1 + 1).

Рекомендациями МСЭ-Т установлено три варианта структурного построения ВОЛТ с МДВ:

L (long) – длинная линия с пассивным участком длиной до 80 км и общими потерями до 22 дБ, в которой допускается включение до семи линейных ОУ при максимальной длине линии до 640 км;

V (very) – очень длинная линия с пассивным участком до 120 км и потерями до 33 дБ, при этом допускается включение до четырех линейных ВОУ при общей длине линии до 600 км;

U (ultra) – сверхдлинная линия, состоящая из одного пассивного участка длиной 160 км без линейных ВОУ при допустимом затухании 44 дБ.

Таким образом, замена электрооптических регенераторов на линейные ВОУ приводит к существенному усложнению вопросов проектирования и организации эксплуатации ВОСП с МДВ. В данных условиях необходима разработка специализированного научно-методического аппарата оптимизации характеристик ВОЛТ, учитывающего выделенные выше особенности применения эрбиевых ВОУ.

Достоверность приема сигналов в ВОЛТ с ВОУ определяется величиной ОСШ на входе решающего устройства ПРОМ, поэтому в дальнейшем задача повышения достоверности передачи информации будет рассматриваться как задача максимизации ОСШ.

Основными источниками шума ВОСП наряду с шумами УСИ ВОУ являются дробовый шум, шум биения составляющих спонтанного излучения, шум биения сигнала с составляющими спонтанного излучения, интерференционный и избыточный шум [2–4]. Однако, как показывают исследования, определяющим является шум спонтанного излучения, связанный с биениями сигнала с составляющими УСИ.

Основным параметром ВОУ, неразрывно с которым связано УСИ, является коэффициент усиления оптического сигнала $G_{\text{ВОУ}}$, определяемый выражением [2–4, 7]:

$$G_{\text{ВОУ}} = (P_{\text{вых}} - P_{\text{УСИ}}) / P_{\text{вх}},$$

$$g = 10 \lg G, \quad (1)$$

где $P_{\text{вх}}$, $P_{\text{вых}}$ – мощность входного и выходного сигналов соответственно; $P_{\text{УСИ}}$ – мощность шума, генерированного усилителем, который находится в пределах оптической полосы пропускания. В модели усилителя, свободного от УСИ, усиление определяется выражением [4, 7]:

$$G = G_{\text{max}} \exp \left[- \frac{(G_{\text{max}} - 1) \cdot P_{\text{вых}}}{G_{\text{max}} \cdot P_{\text{нас}}} \right], \quad (2)$$

где G – коэффициент усиления слабого сигнала, $P_{\text{нас}}$ – мощность насыщения. Мощность насыщения $P_{\text{нас}}$ является важным параметром ВОУ и определяется как значение мощности сигнала на выходе, при котором коэффициент усиления G в

два раза (g на 3дБ) меньше максимального значения G_{max} , достигаемого при малом входном сигнале.

$$P_{нас} = Ah\nu / \sigma_a \tau_{sp}, \quad (3)$$

где σ_a – сечение области стимулированной эмиссии, τ_{sp} – время жизни иона в нестабильном состоянии, h – постоянная Планка, ν – частота оптического сигнала, A – коэффициент стимулированной эмиссии.

Следует учитывать, что с повышением оптической мощности полезного сигнала ВОУ увеличивают мощность помех и шумов, попадающих в их полосу усиления. Шум УСИ, генерируемый в каждом ВОУ, повторяет цикл ослабления и усиления аналогично тому, как это происходит с полезным информационным сигналом [4]. Увеличение мощности УСИ приводит к увеличению шума на входе решающего устройства фотоприемника. Этот шум является источником ошибок в цифровых системах связи, следовательно снижает достоверность передачи в ВОЛТ с ВОУ.

Мощность УСИ связана с коэффициентом усиления формулой [6]:

$$P_{УСИ} = h\nu \cdot \frac{n_{sp}}{\eta} \cdot (G-1), \quad (4)$$

где $P_{УСИ}$ – мощность усиленного спонтанного излучения, η – квантовая эффективность ВОУ, n_{sp} – коэффициент спонтанной эмиссии, G – коэффициент усиления ВОУ.

Мощность шума УСИ в полосе усиления ВОУ [2] выражается как

$$P_{УСИ} = 4h\nu \cdot B_0 \cdot (G-1), \quad (5)$$

где B_0 – полоса усиления ВОУ.

Для характеристики качества ВОУ вводится параметр NF , получивший название шум-фактор

$$NF = \frac{P_{сиг}^{вх}}{P_{ш}^{вх}} \bigg/ \frac{P_{сиг}^{вых}}{P_{ш}^{вых}}. \quad (6)$$

Так как одной из основных составляющих мощности шума на выходе является мощность УСИ, то можно записать:

$$NF = \frac{1}{G} \left(1 + \frac{P_{УСИ}}{h\nu} \right). \quad (7)$$

Учитывая это, а также то, что в каждом следующем ВОУ добавляется собственный шум, можно сделать вывод, что общая мощность шума УСИ увеличивается пропорционально числу ВОУ. Так, например, для каскада из двух ВОУ с коэффициентами усиления G_1 и G_2 и показателями шум-фактора NF_1 и NF_2 шум на выходе может быть найден по формуле [6]:

$$P_{ш}^{вых} = h\nu \cdot B_0 (NF_1 \cdot G_1 \cdot G_2 + (NF_2 - 1) \cdot G_2). \quad (8)$$

Соответственно общий шум-фактор для каскада из двух ВОУ определяется выражением:

$$NF_{общ} = NF_1 + \frac{(NF_2 - 1)}{G_1}. \quad (9)$$

Таким образом, основным шумом, определяющим достоверность передачи цифровых сигналов в ВОЛТ с ВОУ, является шум УСИ. Каскадное включение ВОУ существенно усложняет шумовую картину в ВОЛТ, так как ВОУ усиливают не только полезный сигнал, но шумовые компоненты, попадающие в его полосу усиления, в том числе шум УСИ предшествующих каскадов усиления.

Постановка задачи оптимизации характеристик ВОСП с линейными ВОУ. Типовые ВОСП предполагают равномерное размещение линейных ВОУ по ВОЛТ.

Если рассмотреть ВОЛТ длиной L , содержащий n ВОУ, потери мощности между которыми определяются как $e^{-\alpha l}$, где α – коэффициент затухания ОВ, l – длина усилительной секции, то мощность сигнала на выходе усилительной секции можно записать в виде:

$$P_{вых}^{общ} = (P_{сиг}^{вх} \cdot e^{-\alpha l}) \cdot G + 2 \cdot P_{ш}^{вх} \cdot (G-1). \quad (10)$$

При оценке качества оптического сигнала на выходе ВОУ целесообразно использовать такой показатель как оптическое отношение сигнал/шум ($OSNR_{вых}$) [5]:

$$OSNR_{вых} = \frac{P_{сиг}^{вых} \cdot G}{2h\nu \cdot B_0 + 2P_{УСИ} \cdot n_{sp}}. \quad (11)$$

Так как шум-фактор ВОУ при большом усилении зависит только от соотношения населенностей метастабильного и основного уровней ВОУ, то коэффициент УСИ можно выразить через шум-фактор следующим образом:

$$n_{sp} \approx \frac{NF}{2}. \quad (12)$$

С учетом этого $OSNR$ на выходе оптического усилителя можно записать в виде:

$$OSNR_{вых} = \frac{(P_{сиг}^{вх} \cdot e^{-\alpha l}) \cdot G}{2h\nu \cdot B_0 \cdot (1 + (G-1) \cdot NF)}. \quad (13)$$

$OSNR$ на выходе i -го ВОУ будет определяться выражением:

$$OSNR_{вых}^i = \frac{(P_{сиг}^{вх} \cdot e^{-\alpha l_i}) \cdot G_i}{2h\nu \cdot B_0 \cdot (1 + (G_i - 1) \cdot NF_i)}. \quad (14)$$

Исходя из данного выражения можно, подбирая значения длин усилительных участков l_i и величин коэффициента усиления i -го ВОУ – G_i , можно повысить $OSNR_{вых}^i$. Иначе говоря нужно решить оптимизационную задачу, условие которой целесообразно записать в следующем виде:

$$OSNR_i^{вых} \rightarrow \max_{l_i, G_i}$$

$$\sum_{i=1}^n l_i = L, \quad (15)$$

$$G_i \leq G_{max}$$

В ходе решения задачи необходимо определить длины усилительных участков и значения коэффициентов усиления ВОУ, обеспечивающих максимальную величину оптического ОСШ на входе ПРОМ для ВОЛТ протяженностью L при ограничениях на максимальное значение коэффициентов усиления ВОУ.

Решение задачи оптимизации характеристик ВОСП с линейными ВОУ. Предварительные исследования позволили сформулировать новый подход к решению поставленной выше задачи оптимизации. Он состоит в том, что применение в первых каскадах усиления ВОУ с небольшим коэффициентом усиления (а, следовательно, малым уровнем УСИ) с постепенным их увеличением к следующим каскадам в некотором смысле должно ослабить проблему накопления шумов в ВОЛТ. Соответственно, протяженности усилительных секций должны увеличиваться по мере удаления от ПОМ. Таким образом, для обеспечения наилучшего ОСШ при каскадном включении линейных ВОУ необходимо реализовать принцип градиентного размещения усилителей по ВОЛТ. На рисунке 2 представлена структурная схема построения ВОЛТ с равномерным (рисунок 2, а) и градиентным (рисунок 2, б) размещением ВОУ для $n = 3$.

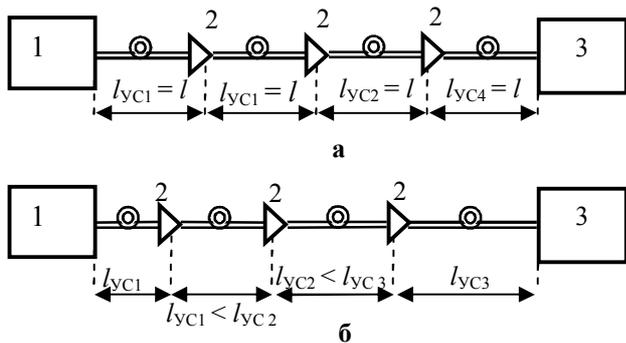


Рисунок 2 – Структурная схема построения ВОЛТ:

а – с равномерным размещением трех ВОУ;
б – с градиентным размещением трех ВОУ

На рисунке 2 цифрами обозначены: 1 – ПОМ; 2 – ЛОУ; 3 – ПРОМ.

Коэффициент неравномерности размещения ВОУ зависит от характеристик используемых оптических компонентов, главным образом ОВ, ВОУ, ПОМ и ПРОМ. Для наглядности ниже произведено сравнение вариантов размещения

ВОУ в одноволновом ВОЛТ, протяженностью 640 км с оптическим волокном, имеющим затухание 0,22 дБ/км. В качестве источника излучения был выбран высокочастотный лазерный модуль ДМПО 155–21, работающий в непрерывном режиме с мощностью излучения 5 мВт. При равномерном размещении ВОУ длина усилительного участка составляла 80 км. В качестве линейного ВОУ использовался эрбиевый оптический усилитель EM 316 EDFA-IP с коэффициентом усиления 5дБ.

Данные расчетов величины $OSNR_i^{вых}$ для обычной расстановки ВОУ и при градиентном их размещении приведены на рисунке 3.

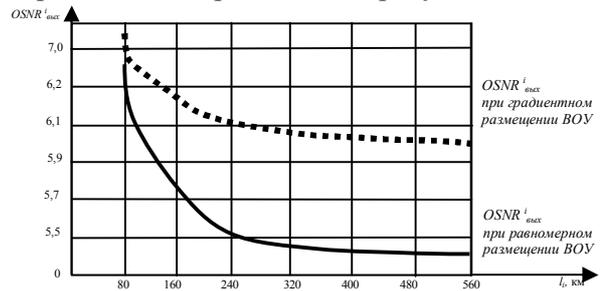


Рисунок 3 – Графики зависимости $OSNR_i^{вых}$ от величины усилительного участка при обычном и градиентном размещении линейных ВОУ

За счет градиентного размещения ВОУ получено снижение мощности шума на входе ФПУ на 8-10 процентов.

В рассматриваемом примере размещение ВОУ носило экспоненциальный характер, однако для более точного и полного описания всех выявленных закономерностей распространения оптических сигналов и шумов в ВОЛТ с МДВ и градиентным размещением ВОУ, а также получения максимального эффекта от применения данного подхода требуется решение комплекса оптимизационных задач.

Заключение. Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что равномерное размещение линейных ВОУ в ВОЛТ не является оптимальным с точки зрения достоверности передачи цифрового сигнала. Выигрыш в ОСШ на входе решающего устройства фотоприемника, полученный за счет градиентного размещения ВОУ в ВОЛТ, зависит от типономиналов применяемой оптической компонентной базы. В некоторых условиях это позволит в ВОЛТ использовать на один ВОУ меньше, чем при типовом равномерном размещении устройств. Дальнейшие исследования ведутся в направлении разработки научно-методического инструментария оптимизации параметров активных оптических компонентов ВОСП с МДВ и ВОУ в условиях

применения пакетных технологий переноса информации непосредственно по волоконно-оптической направляющей системе.

Библиографический список

1. Саитов И.А. Особенности контроля параметров линейных трактов в оптической сети связи без регенераторов // Системы связи. Анализ, синтез, управление. Выпуск 4 / Под ред. В.П. Постюшкова. - СПб.: Тема, 2001.- С. 24 - 26.
2. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. – М.: Компания Сайрус Системс, 1999. – 671 с.
3. Заславский К.Е. Волоконно-оптические систе-

мы передачи со спектральным уплотнением ВОСП-WDM. Новосибирск, 2002.- 320 с.

4. Заркевич Е.А., Скляр О.К., Устинов С.А. Тестирование и мониторинг параметров в сетях WDM. Непрерывный контроль и измерение системных параметров в сетях WDM // Технологии и средства связи. № 2. 2002. – С. 10–14.

5. Курков А.С., Наний О.Е. Эрбиевые волоконно-оптические усилители // *Lightwave Russian edition*. №1. 2003.- С. 14-19.

6. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети. – М.: Эко-Трендз, 2001. – 267 с.

7. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи.– М.: Техносфера, 2003.– 442 с.