

7. Тарасова Е. В. Моделирование динамики популяции амурского тигра с помощью матрицы Лесли / Е. В. Тарасова // Вестник развития науки и образования. – 2012. – №1. – С. 9-25.
8. Fujimoto T. Indecomposability and Primitivity of Nonnegative Matrices [Электронный ресурс] / Takao Fujimoto, Fumiko Ekuni // Política y Cultura, primavera 2004, núm. 21, pp. 163-176. – Режим доступа : <http://scielo.unam.mx/pdf/polcul/n21/n21a11.pdf>.
9. Кузнецов В. И. Математическая модель эволюции леса : автореф. диссертации на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук : спец. 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы, комплексы программ» / В. И. Кузнецов. – М., 2000. – 14 с. Библиогр. : с. 14 (12 назв.).
10. Seneta E. Non-negative Matrices and Markov Chains [Электронный ресурс] / E. Seneta, Second edn., Springer, New York, 1981, 2006 (revised printing). Режим доступа : <http://www.leg.ufpr.br/~eder/Markov/Non%20Negative%20Matrices%20and%20Markov%20Chains.pdf>.
11. Румянцева Е. Г. Возрастная структура популяции виноградной улитки *Helix pomatia* L. (Mollusca, Gastropoda) и влияние на нее эксплуатации / Е. Г. Румянцева // Вісник Дніпропетровського університету. Біологія. Екологія. – Дніпропетровськ : Вид-во ДНУ, 2003. – Вип. 11. – Т. 1. – С. 120-124.
12. Zitek A. Introduction to the basic principles of population modelling [Электронный ресурс] – Режим доступа : http://www.boku.ac.at/hfa/lehre/Multiscale%20modelling%20Vorlesung/VU_AHM3_Population_modelling.pdf.

УДК 535.375.54 : 517.988

ОПТИМІЗАЦІЯ ПОВНОЇ СМУГИ ПІДСИЛЕННЯ СВІТЛА В ОДНОМОДОВОМУ ВОЛОКНІ TRUEWAVERS™

Дирів М. Я., аспірант, Коротков П. А., д. ф.-м. н., професор, Фелінський Г. С., д. ф.-м. н., асистент

Київський національний університет ім. Тараса Шевченка

Запропоновано нову методику моделювання повної смуги підсилення світлового сигналу на основі чисельного інтегрування системи зв'язаних диференціальних рівнянь, що описують еволюцію потужностей багатохвильового оптичного випромінювання при ВКР взаємодії в одномодовому волокні. Зокрема, визначено набір потужностей накачування для моделювання оптимальної смуги підсилення сигналу в межах частот, що опиняються у діапазоні сумарного вікна прозорості C+L. Для цього використано шість прямих накачок у кварцовому волокні TrueWaveRS™. Показано, що за загальної потужності накачування до 28 дБм повне підсилення інформаційного сигналу з початковою потужністю –10 дБм становить в середньому 5,7 дБ в області довжин хвиль 1520-1620 нм вікна C+L, а нерівномірність підсилення при цьому не перевищує 0,7 дБ. Розроблений алгоритм моделювання дозволяє здійснити розрахунок вхідних потужностей накачування для підсилення будь-якого рівня слабого сигналу і може бути корисним для аналізу експериментальних смуг підсилення в сучасних надширокопосмугових волоконних ВКР підсилювачах.

Ключові слова: вимушене комбінаційне розсіювання, повна смуга підсилення, одномодове оптичне волокно.

Дыри́в М. Я., Коротков П. А., Фелинский Г. С. ОПТИМИЗАЦИЯ ПОЛНОЙ ПОЛОСЫ УСИЛЕНИЯ СВЕТА В ОДНОМОДОВОМ ВОЛОКНЕ TRUEWAVERS™ / Киевский национальный университет им. Т. Шевченко, Украина

Предложена новая методика моделирования полной полосы усиления светового сигнала на основе численного интегрирования системы связанных дифференциальных уравнений, описывающих эволюцию мощностей многоволнового оптического излучения при ВКР взаимодействии в одномодовом волокне. В частности, определен набор мощностей накачки для моделирования оптимальной полосы усиления сигнала в пределах частот, попадающих в диапазон суммарного окна прозрачности C+L. Для этой цели использовано шесть прямых накачек в кварцевом волокне TrueWaveRS™. Показано, что при общей мощности накачки до 28 дБм полное усиления информационного сигнала с исходной мощностью в –10 дБм составляет в среднем 5,7 дБ в области длин волн 1520-1620 нм окна C+L, при этом неравномерность усиления не превышает 0,7 дБ. Разработанный алгоритм моделирования позволяет осуществить расчет входных мощностей накачки для усиления любого уровня слабого сигнала и может быть полезным для анализа экспериментальных полос усиления в современных сверхширокополосных волоконных ВКР усилителях.

Ключевые слова: вынужденное комбинационное рассеивание, полная полоса усиления, одномодовое оптическое волокно.

Dyriv M. Y., Korotkov P. A., Felinskiy G. S. OPTIMIZATION OF OPTICAL NET GAIN PROFILE IN SINGLE-MODE FIBER / Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine

A new simulation technique of optical net gain profile based on numerical integration of coupled differential equations for the evolution of multiwave optical powers at SRS interaction in single-mode fiber is proposed. The set of pump powers for modeling of optimal gain bandwidth in frequency range within full C+L telecom window waveband is estimated. We used six forward-propagating pumps in silica fiber TrueWaveRS™ in our optimization. It's shown that the optical net gain for weak data signal with input power -10 dBm is average 5,7 dB in the range 1520-1620 nm of C+L window when the total pump power is 28 dBm and net gain ripple is less than 0,7 dB. Our algorithm is applied to the calculation of input pump powers for amplification of any weak optical signal and may be useful for analysis of experimental gain bands modern wideband fiber Raman amplifiers.

Key words: stimulated Raman scattering, net gain, single-mode optical fiber.

ВСТУП

Вже досить тривалий час волоконні підсилювачі на ефекті вимушеного комбінаційного розсіювання світла (ВКРП) є найбільш ефективними підсилювачами оптичного випромінювання в діапазоні частот телекомунікаційного вікна C+L, де втрати на згасання суттєво менші порівняно з іншими спектральними вікнами. З кожним роком якісна передача все більшого обсягу інформації потребує вдосконалення оптико-електронних телекомунікаційних систем, зокрема волоконних ВКР підсилювачів. Тому, важливим є розширення пропускну здатності таких підсилювачів у межах C+L вікна прозорості, а також зменшення нерівномірності смуги ВКР підсилення та, відповідно, повної смуги підсилення сигналу завдяки застосуванню не однієї, а одразу декількох накачок. Ця робота присвячена оптимізації потужностей помпування з огляду на мінімальність відношення нерівномірності смуги підсилення до її середнього значення в області досліджуваних довжин хвиль.

В основі дослідження характеристик ВКРП лежить чимала кількість праць, зокрема [1-5]. Експериментальним шляхом отримано повну смугу підсилення шириною 80 нм з нерівномірністю до 1 дБ із застосуванням 12-ти джерел помпування та 25-км волокна DSF, при цьому смуга ВКР підсилення має нерівномірність порядку 0.1 дБ [2]. У пізніших працях, зокрема [6-13], проблема оптимізації повної смуги підсилення сигналу (net gain profile) не вирішена. Для зменшення нерівномірності повної смуги підсилення до рівня менше 0.1 дБ потрібно як мінімум 8-16 накачок [5], а при використанні всього 2-3 накачок, смуга підсилення є надто вузькою для ефективної роботи широкосмугових WDM систем [7, 8]. Нещодавно розраховано оптимізовану смугу ВКР підсилення з нерівномірністю підсилення менше 0.5 дБ у межах 1530-1562 нм [14] з використанням 4 накачок. При цьому кількість підсиленних каналів становить 40 з частотним інтервалом у 102 ГГц. Якщо ж оптимальна смуга ВКР підсилення становитиме 100 нм (від 1520 до 1620 нм), то з таким частотним інтервалом можна підсилувати до 120 сигнальних каналів. З вищесказаного випливає, що оптимізація смуги ВКР підсилення і, в свою чергу, повної смуги підсилення оптичного сигналу є досить актуальною на сьогодні і тому потребує додаткового вивчення.

У зв'язку з цим, проаналізувавши ряд робіт [1-14], ми запропонували новий підхід щодо покращення смуги ВКР підсилення та повної смуги підсилення волоконних ВКРП. З огляду на попередні досягнення, нами розроблена наочна методика оптимізації експериментальної повної смуги підсилення шириною 80 нм [2] та розрахунку надширокої смуги підсилення корисного сигналу (до 100 нм) з нерівномірністю < 1 дБ, а також проведена мінімізація вхідних параметрів накачування для її реалізації.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ. СПРОЩЕНА ТЕОРЕТИЧНА МОДЕЛЬ

Теоретичне пояснення дії ВКРП полягає в описі нелінійних процесів, які і визначають характеристики таких підсилювачів. Запропонована математична модель є прикладним інструментом для відтворення поведінки потужностей оптичних променів при проходженні через одномодове волокно певної довжини. За допомогою такої моделі можна розрахувати смугу підсилення, якщо відомий набір потужностей хвиль накачування та сигналу на вході волокна. Маючи точні значення вхідних оптичних потужностей і відповідних довжин хвиль, та знаючи фізичний механізм перетворення вхідних потужностей на вихідні, ми можемо обчислити значення оптичних потужностей на виході волокна, використовуючи таку систему зв'язаних диференціальних рівнянь [2, 15, 16]:

$$\frac{dP_v^\pm}{dz} = -\alpha_v P_v^\pm + \epsilon_v P_v^\mp + P_v^\pm \sum_{\mu > \nu} \frac{g_{\mu\nu}}{A_\mu} (P_\mu^+ + P_\mu^-) + 2h\nu \sum_{\mu > \nu} \frac{g_{\mu\nu}}{A_\mu} (P_\mu^+ + P_\mu^-) \cdot \left[1 + \frac{1}{\exp\left[\frac{h(\mu - \nu)}{kT}\right] - 1} \right] -$$

$$-P_v^{\pm} \sum_{\mu < \nu} \frac{\nu}{\mu} \frac{g_{v\mu}}{A_v} (P_{\mu}^{+} + P_{\mu}^{-}) - 4h\nu h_{\nu}^{\pm} \sum_{\mu < \nu} \frac{g_{v\mu}}{A_v} \left[1 + \frac{1}{\exp\left[\frac{h(\nu - \mu)}{kT}\right] - 1} \right], \quad (1)$$

де індекси ν та μ позначають частоти оптичних хвиль, які беруть участь у процесі ВКР, знаки «+» та «-» визначають прямий та зворотній напрямки поширення оптичної хвилі, P_{ν} – потужність оптичної хвилі, α_{ν} – коефіцієнт згасання, ϵ_{ν} – коефіцієнт зворотного Релеївського розсіювання, $A_{\nu,\mu}$ – ефективна площа взаємодії волокна, $g_{v\mu}$ – коефіцієнт ВКР підсилення, h – стала Планка, k – стала Больцмана, T – абсолютна температура підсилювача. В даній системі рівнянь враховується підсилення довгохвильового світлового випромінювання та загасання короткохвильового завдяки нелінійній ВКР взаємодії між ними, оптичні втрати, Релеївське розсіювання, підсилене спонтанне випромінювання (ASE) та тепловий шум [2]. Оскільки в роботі ми застосовуємо систему рівнянь (1) тільки у випадку прямого поширення випромінювання від оптичних джерел, то внесок у потужність кожної окремої хвилі здійснює лише подвійне Релеївське розсіювання. Одинарне розсіювання враховане в коефіцієнті α_{ν} першого доданку системи (1). Однак, вплив процесів Релеївського розсіювання та підсиленого спонтанного випромінювання на потужність накачування, є мізерним [5, 17, 18] у порівнянні з власними втратами в волокну. При нехтуванні доданків у системі рівнянь (1), які відповідають за ці процеси, поведінка потужностей накачування і сигналу практично не змінюється. В результаті, систему (1) можна спростити до такого вигляду:

$$\frac{dP_{\nu}}{dz} = -\alpha_{\nu} P_{\nu} + P_{\nu} \sum_{\mu > \nu} \frac{g_{\mu\nu}}{A_{\mu}} P_{\mu} - P_{\nu} \sum_{\mu < \nu} \frac{\nu}{\mu} \frac{g_{v\mu}}{A_{\nu}} P_{\mu}. \quad (2)$$

Використовуючи чисельні методи для розв'язку отриманої системи рівнянь (2), ми можемо визначити локальні значення потужності накачування і сигналу в будь-якій точці перерізу волокна за відомими значеннями вхідних потужностей. Останні, в свою чергу, і будуть забезпечувати необхідну смугу ВКР підсилення G_R (в англійській літературі «on/off Raman gain») та смугу повного підсилення G («net gain») [19]:

$$G_R = 10 \lg \frac{P_s(L) \Big|_{\text{нак. вкл.}}}{P_s(L) \Big|_{\text{нак. викл.}}}, \quad (3)$$

$$G = 10 \lg \frac{P_s(L)}{P_s(0)}, \quad (4)$$

де $P_s(L) \Big|_{\text{нак. вкл.}}$ – потужність сигналу на виході волокна при наявності накачування, $P_s(L) \Big|_{\text{нак. викл.}}$ – потужність сигналу на виході волокна при відсутності накачування, $P_s(0)$ – потужність сигналу на вході волокна, L – довжина волокна.

МОДЕЛЮВАННЯ І ОПТИМІЗАЦІЯ СМУГИ ПІДСИЛЕННЯ

Завдання нашого моделювання полягає в розрахунку повної смуги підсилення сигналу в межах вікна прозорості $C+L$ і подальшою оптимізацією кількості джерел накачування, ширини смуги підсилення та її нерівномірності в досліджуваному діапазоні довжин хвиль.

Схема моделювання є такою. Для оптимізації повної смуги підсилення перш за все потрібно визначити оптимальну кількість вхідних потужностей накачування та відповідні довжини хвиль. Для цього достатньо здійснити апроксимацію смуги підсилення суперпозицією індивідуальних профілів коефіцієнта ВКР підсилення g_R без врахування перекачування енергії між накачками. Профілі коефіцієнта ВКР підсилення, які формують смугу підсилення, точно відповідають експериментально вимірним профілям (метод спектральної 10-компонентної гаусової декомпозиції [20]).

Розрахунок довжин хвиль накачування. Ми задали прямокутну смугу підсилення на рівні близько 6.5 дБ (середнє значення повної смуги коефіцієнта підсилення \bar{G} , виміряної у 25-км волокну TrueWaveRSTM [2]), тобто з нульовою нерівномірністю в межах 1520-1620 нм (ширина 100 нм). За допомогою методу нелінійної регресії Левенберга-Марквардта апроксимували дану смугу суперпозицією профілів коефіцієнта g_R . Кількість профілів (кількість лазерів накачування) було обрано від 5 до 12. Оптимізація полягає в зменшенні кількості джерел накачування з огляду на мінімізацію нерівномірності

підсилення в діапазоні 1520-1620 нм. Результати обчислень показують, що оптимальна смуга підсилення 100 нм може бути отримана при застосуванні всього 6-ти накачок: нерівномірність апроксимованої смуги підсилення G^a становить $\Delta = G_{\max}^a - G_{\min}^a < 0.3$ дБ (див. Рис. 1). У даному випадку похибка апроксимації не перевищує 1%.

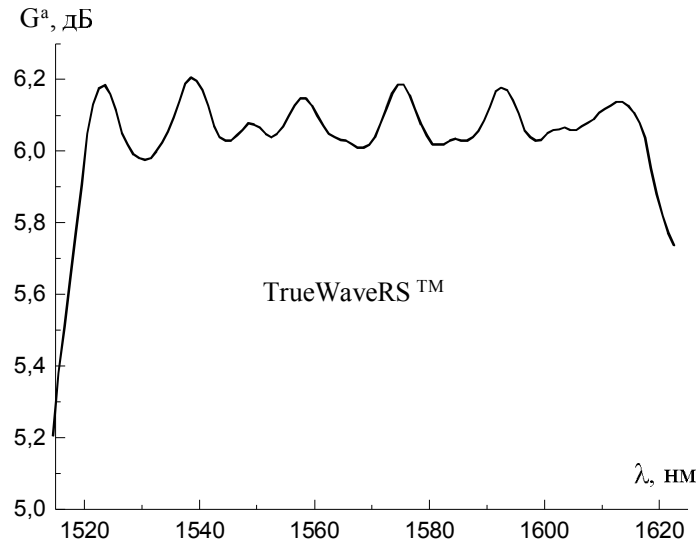


Рис. 1. Суперпозиція шести профілів коефіцієнта ВКР підсилення в одномодовому волокні TrueWaveRS™

У досліджуваному діапазоні довжин хвиль можна отримати й меншу нерівномірність смуги підсилення, збільшуючи кількість накачок. Зокрема, згідно з нашою моделлю, якщо кількість накачок становить від 10 до 12, то нерівномірність підсилення становитиме менше 0.1 дБ, що підтверджується експериментально на прикладі смуги ВКР підсилення шириною 80 нм [2]. Проте, використання накачок більше 6-ти при ширині бажаної смуги в 100 нм веде до перекривання довгохвильової частини спектру хвиль накачування із короткохвильовим спектром хвиль підсилюваних сигналів, що, в свою чергу, призводить до небажаного впливу потужності накачування на потужність підсилюваного корисного сигналу. Тому, з обмеженням нерівномірності в 0.3 дБ, оптимальна повна смуга підсилення створюється саме за рахунок 6-ти лазерів накачування. Розраховані довжини хвиль потужностей накачування при цьому становлять 1416, 1429, 1445, 1460, 1476 та 1506 нм.

Масштабування коефіцієнта ВКР підсилення. Для покращення точності обчислення потрібно врахувати залежність коефіцієнта ВКР підсилення g_R від довжини хвилі [4, 21]. Поправка за довжиною хвилі у величину коефіцієнта g_R задається наступним виразом [4]:

$$g_R(\Delta\nu, \Lambda_p) = g_R(\Delta\nu, \lambda_p) \cdot \left(\frac{\lambda_s}{\Lambda_s}\right) \cdot \left[\frac{A_{\text{eff}}(\Delta\nu, \lambda_p)}{A_{\text{eff}}(\Delta\nu, \Lambda_p)}\right], \quad (5)$$

де λ_p , Λ_p – суміжні довжини хвиль накачування; λ_s , Λ_s – суміжні довжини сигнальних хвиль; A_{eff} – ефективна площа взаємодії волокна. Як було показано в [4], A_{eff} практично лінійно залежить від довжини хвилі, тому її можна достатньо точно (з похибкою 0,56%) апроксимувати прямою лінією:

$$A_{\text{eff}}(\lambda) = b(\lambda - \lambda_0) + A_{\text{eff}}^0, \quad (6)$$

де $b = 76.79 \mu\text{m}$ – коефіцієнт пропорційності, $\lambda_0 = 1.42 \mu\text{m}$ та $A_{\text{eff}}^0 = 43.06 \mu\text{m}^2$ – початкові значення довжини хвилі та ефективної площі взаємодії, відповідно. Як наслідок, для волокна TrueWaveRS™ поправки у коефіцієнт g_R на розрахованих довжинах хвиль будуть такими: {**1; 0.967; 0.930; 0.898; 0.865; 0.807**}. Це означає, що величина коефіцієнта g_R зменшується з довжиною хвилі, хоч і не суттєво.

Оптимізація потужностей помпування. Ідея застосування числових методів для вирішення прямої та оберненої задач інтегрування при знаходженні параметрів накачування описана в [5]. В [5] здійснено оптимізацію смуги повного коефіцієнта підсилення сигналу G шириною 83 нм за допомогою 4, 8 та 16

накачок. Використовуючи всього 6 накачок, ми розширили смугу підсилення до 100 нм і оптимізували вхідні потужності накачування з виконанням критерію мінімізації:

$$\delta_{NG} = \Delta_{NG} / \bar{G} \rightarrow \min, \quad (7)$$

де $\Delta_{NG} = G_{\max} - G_{\min}$ – нерівномірність смуги повного підсилення сигналу, \bar{G} – середнє значення підсилення в смугі. Для обчислення вихідних потужностей P_v^{out} накачування на розрахованих довжинах хвиль, нами використана система з 7-ми зв'язаних диференціальних рівнянь (2) для випадку прямого накачування і застосований метод Рунге-Кутти четвертого порядку. Шість рівнянь відповідають потужностям шістьох хвиль накачування, а 7-ме – потужності сигнальної хвилі. В процесі оптимізації вхідна потужність накачування змінювалась від 30 до 250 мВт, зважаючи на дані експерименту з використанням 12 накачок [2] та чисельний розрахунок з використанням 6 накачок сумарної потужності 620 мВт [19]. Для моделювання ефективного процесу підсилення вхідна потужність сигналу встановлювалась на рівні -10 дБм (0.1 мВт), тобто на декілька порядків слабшою від кожної із потужностей накачування. Інші параметри, використані в моделюванні, наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Вхідні параметри моделювання смуги підсилення 100 нм у волокні TrueWaveRS™ для світлового сигналу потужністю $P_s = 0.1$ мВт у діапазоні від 1520 до 1620 нм і оптичним згасанням від 52 до $54 \cdot 10^{-3}$ km^{-1} , відповідно. Потужність кожної накачки змінювалась в межах $\{ P_{\text{first}}^{\text{in}} \dots P_{\text{last}}^{\text{in}} \}$

Параметр помпування	Значення					
λ , нм	1416	1429	1445	1460	1476	1506
$\alpha_v \cdot 10^{-3}$, km^{-1}	70	67	62	58	56	53
$\{ P_{\text{first}}^{\text{in}} \dots P_{\text{last}}^{\text{in}} \}$, мВт	250..190	150..90	110..60	100..50	100..30	100..60
g_R , $(\text{Вт} \cdot \text{км})^{-1}$	0.765	0.740	0.711	0.687	0.662	0.617

Алгоритм оптимізації. Процес оптимізації зводиться до розрахунку мінімальної величини δ_{NG} з урахуванням комбінації всіх можливих значень потужностей накачування в діапазонах, вказаних у таблиці 1: програма автоматично перебирає всі потужності накачування, починаючи від потужності P_6 на довжині хвилі 1506 нм, закінчуючи потужністю P_1 на – 1416 нм. При кроці інтегрування (крок потужності накачування) $k = 1$ мВт, загальна кількість операцій N становить більше $28 \cdot 10^9$. Обробка такої величезної кількості операцій лімітована обчислювальною потужністю ЕОМ, тому нами обрано більший початковий крок інтегрування, а саме $k = 30$ мВт і визначено для нього мінімальну величину δ_{NG} . На Рис. 1 зображено графік залежності $\delta_{NG} = f(N)$, на якому виділені області відповідають потужностям накачування $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$, при яких отримана дана залежність; межі потужностей накачок P_4, P_5, P_6 на графіку не вказані з огляду на масштаб рисунка. Як видно з Рис. 1, глобальний мінімум величини $\delta_{NG} = 0.1265$ обчислений для шести хвиль накачування з потужностями 220, 150, 80, 70, 40 та 70 мВт.

Загалом ми здійснили оптимізацію з кроками потужності накачування 30, 15, 5 та 1 мВт. На кожному наступному кроці ми зменшували границі діапазонів $\{ P_{\text{first}}^{\text{in}} \dots P_{\text{last}}^{\text{in}} \}$ вхідних потужностей накачування, обмежуючи їх поблизу N попереднього мінімуму функції δ_{NG} (див. Рис. 1) до подвійного значення кроку, оскільки час виконання програми напряму залежить від $\{ P_{\text{first}}^{\text{in}} \dots P_{\text{last}}^{\text{in}} \}$ тобто від кількості операцій.

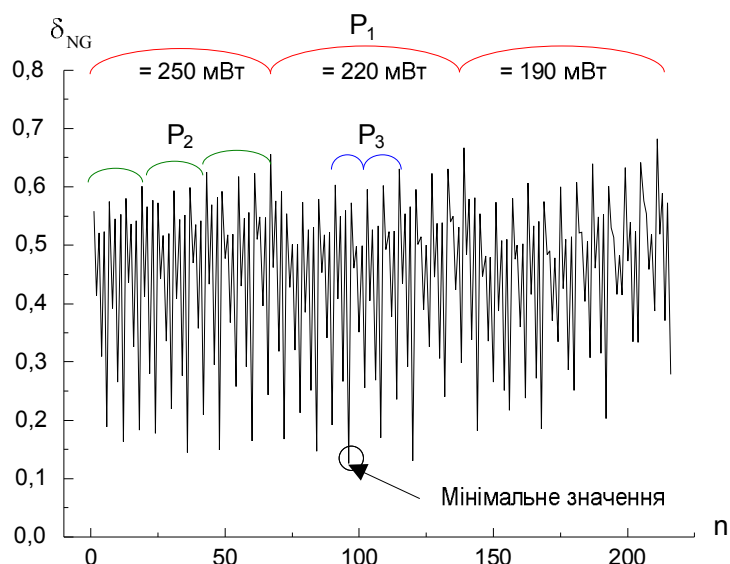


Рис. 2. Діаграма відносної нерівномірності повної смуги підсилення від номеру комбінації потужностей помпування з кроком 30 мВт

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ АНАЛІЗ

На основі викладеного алгоритму та теоретичної моделі, нами оптимізовано повну смугу підсилення: смуга підсилення **100 нм** розрахована з $\delta_{NG}^{opt} = 0.1189$ при потужностях накачування $P_{NG}^{opt} = 219, 140, 85, 74, 41$ та **70 мВт**. Запропонований нами метод використано і для оптимізації експериментально вимірної повної смуги підсилення шириною 80 нм [2]. Для цього випадку ми отримали такі результати: $\delta_{NG}^{opt} = 0.0863$ при потужностях накачування $P_{NG}^{opt} = 241, 146, 76, 94, 74$ та **96 мВт**. Шість лазерів накачування, які були задіяні, мають довжини хвиль **1418, 1433, 1438, 1451, 1466** та **1496 нм**. У Таблиці 2 подано порівняльну характеристику даних експерименту [2] з нашими розрахунками.

На Рис. 2 зображено повну смугу підсилення $G(L)$ слабкого сигналу з вхідною потужністю 0.1 мВт із використанням даних потужностей накачування P_{NG}^{opt} у волокні TrueWaveRSTM довжиною $L = 25$ км. Як бачимо, нижня крива (смуга підсилення 100 нм – показана суцільною лінією) є оптимізацією експериментальної смуги (середня крива) за шириною, нерівномірністю підсилення та вхідною потужністю накачування, а верхня крива – суттєво оптимізує дану експериментальну смугу за середнім значенням підсилення. В обох випадках ми можемо обмежитись усього 6-ма лазерами накачування замість 12-ти. Результати обчислень показують, що повна смуга підсилення не залежить від потужності вхідного сигналу P_s за умови, що $P_s \ll P_i$, i – номер накачування. Отже, отримані оптимальні смуги підсилення можуть бути використані для підсилення слабкого сигналу будь-якої потужності. Є підстави вважати, що цілком реально досягти й кращих характеристик повної смуги підсилення. Проте, для цього потрібно здійснити загальну кількість операцій ($> 28 \cdot 10^9$), що, в свою чергу, суттєво ускладнить обчислення. Отриманих результатів загалом достатньо для практичного використання ВКРП з розрахованими потужностями накачування та відповідними довжинами хвиль. Запропонований метод моделювання може бути використаний і для оптимізації смуги ВКР підсилення, оскільки при визначенні такої смуги використовується система рівнянь (2).

Таблиця 2 – Порівняльна характеристика параметрів повної смуги підсилення оптичного сигналу в одномодовому волокні TrueWaveRSTM довжиною 25 км

Параметр	Оптимізація в межах смуги 100 нм (розрахунок)	Оптимізація в межах смуги 80 нм (розрахунок)	Експеримент [2]
Кількість джерел накачування	6	6	12
Ширина повної смуги підсилення, нм	100	80	80

Δ_{NG} , дБ	0.7	0.7	≈ 1
\bar{G} , дБ	5.7	8.7	6.5
δ_{NG}	0.12	0.09	0.15
Сумарна потужність накачування, мВт	629	727	790

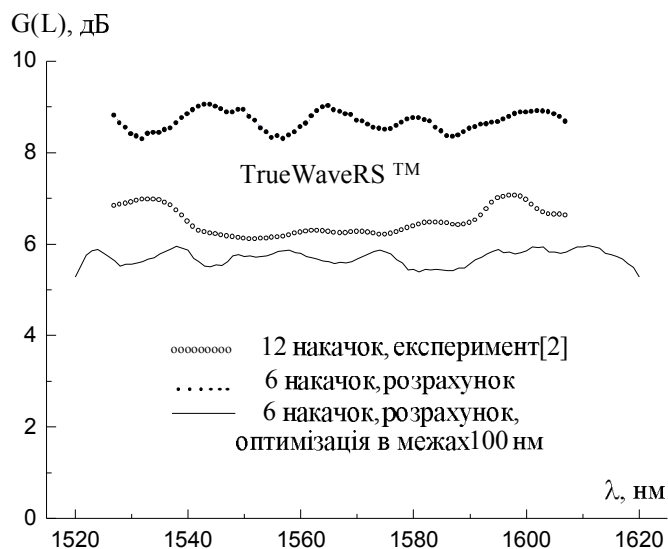


Рис. 3. Порівняння оптимальних розрахункових смуг підсилення оптичного сигналу з експериментальними даними [2] у волокні TrueWaveRS™ довжиною 25-км

ВИСНОВКИ

При моделюванні повної смуги підсилення на основі теоретичної моделі для опису еволюції довільної кількості потужностей накачки розглянуто випадок прямого поширення багатохвильного накачування за наявності одного інформаційного сигналу в межах частотного спектру телекомунікаційного вікна прозорості C+L. Результати моделювання такі:

1. Оптимізовано повну смугу підсилення шириною 80 нм: нерівномірність підсилення становить менше 0.7 дБ. При цьому для синтезу такої смуги використано всього шість потужностей накачування 241, 146, 76, 94, 74 та 96 мВт на відповідних довжинах 1418, 1433, 1438, 1451, 1466 та 1496 нм у волокні TrueWaveRS™ довжиною 25 км.
2. Для даного типу волокна із використанням не більше 6-ти потужностей накачування 219, 140, 85, 74, 41 та 70 мВт з довжинами хвиль 1416, 1429, 1445, 1460, 1476 та 1506 нм, відповідно, повну смугу підсилення розширено до 100 нм, при цьому нерівномірність підсилення не перевищує 0.7 дБ.
3. Підтверджено, що вплив Релеївського розсіювання та підсиленого спонтанного випромінювання є незначним при розрахунку потужностей накачування: більш, ніж на 3 порядки слабший від оптичних втрат. Як наслідок, у подальшому даними процесами можна знехтувати і при моделюванні смуги ВКР підсилення.
4. Показано, що потужність вхідного слабкого сигналу не впливає на повну смугу підсилення.

Отже, ми можемо достатньо точно розрахувати необхідні параметри накачування (вхідні потужності накачування та відповідні довжини хвиль) для отримання бажаної повної смуги підсилення оптичного сигналу. Предметом подальшого наукового дослідження є оптимізація смуги ВКР підсилення.

ЛІТЕРАТУРА

1. H. Kidorf, K. Rottwitz, M. Nissov, M. Ma, and E. Rabarijaona, IEEE Phot. Techn. Lett. – 1999. – Vol. 11, № 5. – P. 530-532.
2. S. Namiki and Y. Emori, IEEE J. Sel. Top. Quant. Electr. – 2001. – Vol. 7, № 1. – P. 3-16.
3. C. Headley, G. P. Agrawal, Elsevier Academic Press, San Diego, CA, 2005.

4. K. Rottwitt, J. Bromage, A. J. Stentz, L. Leng, M. E. Lines and H. Smith, J. Lightwave Techn. – 2003. – Vol. 21, № 7. – P. 1652-1662.
5. V. E. Perlin, H. G. Winful, IEEE J. Lightwave Techn. – 2002. – Vol. 20, № 2. – P. 250-254.
6. A. R. Bahrapour, A. Ghasempour, L. Rahimi, Opt. Comm. – 2008. – № 281. – P. 1545-1547.
7. T. J. Ellingham, J. D. Ania-Castañón, S. K. Turitsyn, A. Pustovskikh, S. Kobtsev, M. P. Fedoruk, Opt. Expr. – 2005. – Vol. 13, № 4. – P. 1079-1084.
8. J. D. Ania-Castañón, A. A. Pustovskikh, S. M. Kobtsev, S. K. Turitsyn, Opt. Quant. Electron. – 2007. – Vol. 39. – P. 213-220.
9. K. Acharya, M. Y. A. Raja, Opt. Engin. – 2010. – Vol. 49, № 8. – P. 1-9.
10. R. Kumar, Inter. J. Comp. Sci. Tech. – 2010. – Vol. 1, № 1. – P. 64-66.
11. R. F. R. de Farias, P. H. S. Belisario, M. A. G. Martinez, M. T. M. R. Giraldi, M. J. Pontes, in SPIE2010. – 2010. – P. 1-6.
12. F. M. Mustafa, Ashraf A. M. Khalaf, F. A. Elgeldawy, in ICACT2013. – 2013. – P. 122-127.
13. H. Bissessur, in OFCINFOEC Techn. Dig. – 2013.
14. B. O. Rasheed, and P. M. Aljaff, Engin. and Techn. – 2009. – Vol. 30. – P. 963-965.
15. P. A. Korotkov, G. S. Felinskyi, Rev. Ukr. J. Phys. – 2009. – Vol. 5, № 2. – P. 103-169.
16. M. A. Soto, G. Bolognini, F. Di Pasquale, Opt. Expr. – 2011. – Vol. 19, № 5. – P. 4444-4457.
17. V. E. Perlin, H. G. Winful, in OFC2002. – 2002. – P. 57-59.
18. F. S. Gokhan, G. Yilmaz, Int. J. Comp. Math. Electrical and Electronic Engin. – 2012. – Vol. 31, № 2. – P. 330-345.
19. J. Bromage, J. of Light. Techn. – 2004. – Vol. 20, № 1. – P. 79-93.
20. M. Dyriv, P. Korotkov, G. Felinskyi, Bull. of Nat. Taras Shevchenko Univ. of Kyiv: Radiophysics and Electr. – 2012. – Vol. 18. – P. 15-18.
21. P. Belisario, M. Giraldi, R. Farias, and M. Martinez, in IMOC2009. – 2009. – P. 690-694.

УДК 517.764

УПЛОЩАЮЩИЕ СВОЙСТВА ПОЛНОГО ЛИФТА ИНФИНИТЕЗИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИВНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Зубрилин К. М., к. ф.-м. н., ст. преподаватель

*Феодосийский политехнический институт национального университета
кораблестроения им. адм. Макарова*

Данная работа посвящена изучению уплощающих свойств полного лифта инфинитезимального проективного преобразования. Касательное расслоение рассматривается как аффинно-связное пространство со связностью горизонтального лифта. Горизонтальный лифт аффинной связности представляет собой аффинную связность на касательном расслоении с нетривиальным кручением. Поэтому потребовалось распространить понятие E-лифта на случай тензора произвольного типа. Роль, которую играет E-лифт в ковариантном дифференцировании относительно связности горизонтального лифта, иллюстрируют полученные свойства.

Ключевые слова: уплощение, r -геодезическое инфинитезимальное преобразование, касательное расслоение, лифты.

Зубрілін К. М. СПЛОЩУЮЧІ ВЛАСТИВОСТІ ПОВНОГО ЛІФТА ІНФІНІТЕЗИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИВНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ / Феодосійський політехнічний інститут Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Україна

Дана робота присвячена вивченню сплюсуючих властивостей повного ліфта інфінітезимального проективного перетворення. Дотичне розшарування розглядається як афінно-зв'язний простір зі зв'язністю горизонтального ліфта. Горизонтальний ліфт афінної зв'язності є афінною зв'язністю на дотичному розшаруванні з нетривіальним скрутом. Тому треба було поширити поняття E-ліфта на