

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

ФАКУЛЬТЕТ РАДІОФІЗИКИ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ

Кафедра радіотехніки та радіоелектронних систем

«На правах рукопису»

Робота допущена до захисту в ЕК
рішенням кафедри радіотехніки та радіоелектронних систем
від _____ 2024 року, протокол № _____
Завідувач кафедри доктор фіз.-мат. наук, професор
_____ Ігор АНІСІМОВ

ДИПЛОМНА РОБОТА МАГІСТРА

на тему:

**«МОДЕЛЬ СЛАБКОГО СИГНАЛУ ТА КРИТЕРІЙ ЇЇ ЗАСТОСУВАННЯ ДЛЯ
АНАЛІЗУ НЕЛІНІЙНОГО ОПТИЧНОГО ПІДСИЛЮВАЧА У
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ»**

Виконав:

студент 2-го курсу магістратури
денної форми навчання
спеціальності 172 - Телекомунікації та радіотехніка
ОНП «Інформаційна безпека телекомунікаційних систем і мереж»
Кононенко Артем Андрійович _____

Науковий керівник:

кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри теоретичних основ
високих технологій Навчально-наукового інституту високих технологій
Резніков Михайло Ігорович _____

Рецензент:

Начальник конструкторського відділу “ТОВ “ПАРАЛЛАКС”
кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Володимир СЕМИГЛАЗОВ _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань

Студент _____ Артем КОНОНЕНКО

РЕФЕРАТ

Дипломна робота: 39 с., 2 табл., 5 рис., 35 джерел.

МОДЕЛЬ СЛАБКОГО СИГНАЛУ ТА КРИТЕРІЙ ЇЇ ЗАСТОСУВАННЯ ДЛЯ АНАЛІЗУ НЕЛІНІЙНОГО ОПТИЧНОГО ПІДСИЛЮВАЧА У ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ.

Об'єкт дослідження – модель розподіленого нелінійно-оптичного підсилення у телекомунікаційних волокнах True Wave^{RS} та G.652.

Мета роботи – розробка критерію застосовності спрощеної моделі нелінійного оптичного підсилення для стандартних волокон на основі кварцового скла, моделювання динаміки та порівняльний аналіз параметрів розподіленого ВКР підсилення залежно від довжини таких активних волокон.

В роботі представлено результати моделювання динаміки розподіленого ВКР підсилення за різних потужностей помпування та паралельного його розповсюдження із сигналом вздовж довжини двох типів кварцових волокон – TrueWave^{RS} та стандартного G.652. Обґрунтовано можливість використання спрощеної аналітичної моделі нелінійного ВКР підсилення оптичних сигналів, як ефективної альтернативи більш поширеній моделі прямого числового розв'язку складних систем диференційних рівнянь із загальної теорії нелінійної взаємодії довільної кількості хвиль сигналів та накачки.

Вперше проаналізовано придатність наближення заданої накачки із теорії ВКР взаємодії в умовах практичної реалізації нелінійного підсилення оптичного сигналу в системах далекого зв'язку. Шляхом введення критичної потужності сигналу P_s^{cr} , як нового характеристичного параметра активного волокна, запропоновано кількісний критерій застосовності моделі для описання динаміки нелінійного оптичного підсилення сигналу. Показано, що критерій застосовності моделі строго виконується для модельних волокон, причому в обох волоконних конфігураціях ВКР підсилювача – як із прямою, так і зустрічною накачкою.

Отримані результати моделювання динаміки нелінійного підсилення однозначно підтверджують значний ріст ефективності підсилення ВКР в активному волокні TrueWave^{RS} у порівнянні зі стандартним ОМВ із чистого кварцового скла, але при суттєво більших обмеженнях на максимальну потужність помпування.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	5
ВСТУП	6
1. ЗАГАЛЬНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ	9
1. 1. Принцип роботи ВКР-підсилювача.....	9
1. 2. Теорія процедура Гаусової декомпозиції	13
1. 3. Абсолютна прозорість ВКР підсилення світла у волокнах.....	15
2. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ	18
2. 1. Процедура Гаусової декомпозиції	18
2. 2. Динамічні рівняння для розподіленого ВКР підсилення.....	20
2. 3. Критерій застосовності моделі слабкого сигналу для ВКР підсилення.....	22
2. 4. Динаміка розповсюдження в розподіленому ВКР підсилювачі.....	28
2. 5. 2D коефіцієнти підсилення $G_{on/off}$	30
ВИСНОВКИ.....	33
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	35

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- ОМВ – одномодові волокна;
- ВКР – вимушене комбінаційне розсіяння;
- КР – комбінаційне розсіяння;
- ω_s – стоксова частота;
- ω_p – частота накачки;
- α_s – коефіцієнт поглинання на стоксовій частоті;
- α_p – коефіцієнт поглинання на частоті накачування;
- λ_s – довжина хвилі сигналу;
- λ_p – довжина хвилі накачування;
- P_s – потужність сигналу;
- P_p – потужність помпування;
- P_0 – потужність помпування на вході в волокно;
- $g_R(\Omega)$ – коефіцієнт ВКР підсилення;
- $g_{Rmax}(\Omega)$ – максимум профілю ВКР підсилення;
- I_s – інтенсивність стокової хвилі;
- I_p – інтенсивність накачки;
- A_{eff} – ефективна площа волокна;
- A_i – амплітуда нормованого профілю Лоренца;
- L – довжина волокна;
- L_{eff} – ефективна довжина взаємодії між стоксовою хвилею та хвилею накачки;
- $L_{1/2}$ – довжина волокна на якій потужність накачки зменшується у 2 рази;
- P_s^{cr} – критичну потужність сигналу;
- P_{th} – порогова потужність накачки для ВКР підсилення;

ВСТУП

Застосування високих технологій, у тому числі таких пристроїв нелінійної фотоніки, як оптичні підсилювачі та лазери на основі вимушеного комбінаційного розсіяння (ВКР), дозволяє досягти рекордних швидкостей обміну інформацією в волоконно-оптичних телекомунікаційних системах [1, 2]. Використання практично в усіх сучасних телекомунікаціях нелінійної фотоніки пояснюється простотою технічної реалізації пристроїв нелінійного підсилення світла. Саме вони складають основу єдиної технології, що здатна освоїти для інформаційного обміну повне вікно прозорості кварцового волокна зі смугою пропускання приблизно 60 ТГц [3, 4]. Утім навіть в останній редакції стандарту ITU-T G.652 відсутня інформація щодо нелінійних властивостей телекомунікаційних волокон, оскільки вони все ще залишаються предметом інтенсивних досліджень у всьому світі [5]. Це вказує на незмінну актуальність дослідження фізичних принципів і фундаментальних особливостей нелінійного підсилення світла для розроблення фотонних пристроїв.

Водночас, певні особливості розподілених волоконних ВКР підсилювачів, що виникають за нелінійного обміну потужністю між накачуванням і сигналом, особливо в умовах розповсюдження вздовж одномодових волокон (ОМВ), залишаються недостатньо дослідженими [6]. Якщо до того ж брати до уваги фундаментальні властивості ВКР підсилення, то для моделювання відповідних пристроїв можливо застосування інноваційних методів, які не містять обмежень, притаманних прямим чисельним методам, що натепер переважно використовуються для розв'язування складних систем диференціальних рівнянь [7-10].

Проблема оптимізації ефективності та робочої смуги ВКР підсилювачів, зважаючи на велику кількість наукових публікацій в останні два десятиліття, з одного боку зустрічає фундаментальні ускладнення в процесі свого вирішення, а з іншого – вказує на важливість цього етапу моделювання для модернізації

існуючих телекомунікаційних систем відповідно до сучасних і перспективних потреб [11-29].

З метою моделювання параметрів волоконних ВКР підсилювачів раніше була розроблена і апробована методика аналітичної апроксимації профілів ВКР підсилення складного континуального типу [25-29]. Проте динаміка розподіленого комбінаційного підсилення залишається недостатньо дослідженою навіть у типових телекомунікаційних волокнах [30-33].

У роботі передбачається проведення дослідження основних характеристик ВКР підсилення у волокні типу TrueWave RS™ порівняно з такими ж характеристиками ВКР підсилення у стандартному кварцовому волокні G.652 і надати результати моделювання.

Метою дипломної роботи є доведення застосовності спрощеної моделі нелінійного оптичного підсилення для стандартних волокон на основі кварцового скла.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішується **актуальне науково-технічне завдання**, яке полягає у визначенні критерію застосовності спрощеної моделі ВКР підсилення для стандартних волокон на основі кварцового скла.

Сформульоване завдання передбачає вирішення низки часткових (конкретних) завдань:

- проведення процедури Гаусової декомпозиція;
- визначення критичної потужності сигналу для описання номінальних режимів нелінійного підсилення;
- аналіз практичного застосування критерію малості сигналу для кожного типу волокна;
- моделювання спектральної та просторової (2D) динаміки розподіленого ВКР підсилення;
- тестування моделі для підтвердження можливості її застосування для стандартних кварцових волокон.

Об'єктом дослідження в роботі є розподілене волоконно-оптичне підсилення в стандартних одномодових волокнах на основі кварцового скла.

Предметом дослідження в роботі є можливість застосування спрощеної моделі нелінійного оптичного підсилення для стандартних волокон на основі кварцового скла.

1. ЗАГАЛЬНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1. 1. Принцип роботи ВКР-підсилювача

Під час проходження світла через оптичне волокно, випромінювання взаємодіє з матеріалом волокна. Основні волокна виготовляються з кварцу (SiO_2), а для підвищення показника заломлення і створення хвилеводу до серцевини додається германій (GeO_2). Це скло має складну аморфну структуру, що включає зв'язки типу Si-O-Si , Si-O-Ge та іноді Ge-O-Ge . Взаємодія оптичного поля та коливань у цих аморфних сполуках призводить до комбінаційного розсіяння. Для кількісного опису цього процесу використовується модель, де два атоми кремнію або германію з'єднані пружинним зв'язком з атомом кисню. Найбільш ймовірний процес передбачає передачу енергії від поля випромінювання до осцилятора, внаслідок чого розсіяне світло набуває нижчої оптичної частоти. Потім відбувається релаксація осцилятора до рівноважного стану через взаємодію з іншими осциляторами.

Кількісне описання КР-підсилення зазвичай базується на рівняннях поширення, які моделюють передачу інформації в сигналовому промені. У подальшому розгляді ми будемо припускати, що процес ВКР-підсилення можна моделювати за допомогою безперервних хвиль як накачування, так і сигналу. Це припущення є виправданим при інтерпретації експериментальних даних для сигналів, частоти яких досягають кількох десятків ГГц.

Елементарний акт комбінаційного розсіяння (КР) полягає в тому, що фотон з кутовою частотою ω_p взаємодіє з молекулою, викликаючи два можливі процеси. У першому випадку створюється фонon з кутовою частотою ω_v , а фотон отримує нижчу кутову частоту $\omega_s = \omega_p - \omega_v$, що називається стоксовим процесом. У другому, антистоксовому процесі, фотон поглинає енергію фонона і отримує вищу кутову частоту $\omega_{as} = \omega_p + \omega_v$. Ці процеси можуть виникати як спонтанно, так і під впливом фотонів на відповідних стоксових чи антистоксових частотах.

Розглянемо багатоканальну оптоволоконну систему з розділенням за довжинами хвилі, модернізацію якої здійснено за допомогою розподілених ВКР підсилювачів. На рис. 1 зображено узагальнену схему такої системи.

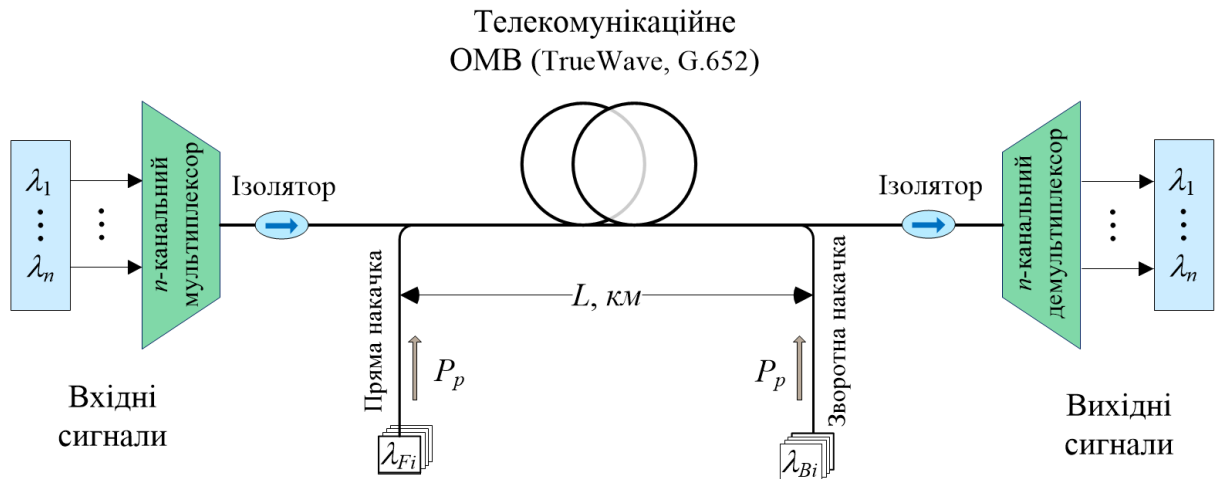


Рисунок 1 – Узагальнена схема багатоканальної оптоволоконної системи з розділенням за довжинами хвилі, в якій застосовуються розподілені ВКР підсилювачі із двосторонньою накачкою.

З технічної точки зору розподілене ВКР підсилення (див. рис.1) реалізується за допомогою простого введення до волокна випромінювання накачки середньої потужності ($0,1 \div 1 \text{ Вт}$) у прямому та/або зустрічному напрямку до сигналу, причому ефект можливий у будь-якому волокні. ВКР підсилювач, особливо в разі застосування двосторонньої накачки, радикально збільшує відстань L між ретрансляторами, а мультихвильове джерело помпування дозволяє розширити смугу підсилення аж до 13 ТГц, причому у будь-якій частині повного вікна прозорості телекомунікаційного волокна. Однак, незважаючи на граничну простоту практичної реалізації ВКР підсилювачів за схемою на рис.1, моделювання динамічних параметрів підсилювачів залишається актуальною задачею, що вкрай ускладнюється необхідністю теоретичного описання фундаментальних процесів нелінійної взаємодії багатьох хвиль як накачки, так і сигналів.

Спрощення узагальненої схеми, що представлена на рис.1, полягає у розгляді одноканальної системи, в якій груповий цифровий сигнал із часовим ущільненням передається через одномодове волокно на відстань L , [км⁻¹] з використанням однієї несучої оптичної частоти ω_s , що знаходиться у вікні прозорості волокон на основі кварцового скла (С-вікно, $\lambda_s = 1,55$ мкм). Для ВКР підсилення такого сигналу у процесі його розповсюдження вздовж одномодового кварцового волокна досить використати монохроматичне джерело помпування на довжині хвилі $\lambda_p = 1,425$ мкм. За таких умов кількісний аналіз динаміки розподіленого ВКР підсилення залежно від довжини оптичного волокна можна проводити за допомогою системи двох диференціальних рівнянь для нелінійної ВКР взаємодії двох хвиль – стоксової хвилі (на частоті корисного сигналу ω_s) та хвилі накачки ω_p .

Зазначимо, що активним середовищем для моделювання розподіленого ВКР підсилювача вибрано стандартні ОМВ, які досить давно були розроблені і вже тривалий час використовуються як дуже прозорий носій оптичних сигналів (ОМВ із «чистого» кварцового скла стандарту G.652) та потім вдосконалювали системи дальнього зв'язку шляхом одночасного зменшення шкідливого впливу дисперсії на швидкісні параметри систем інформаційного обміну (кварцове ОМВ типу TrueWave^{RS}).

Незабаром з'ясувалось, що для будь-якого ОМВ нелінійний коефіцієнт ВКР підсилення g_R , [(Вт · км)⁻¹] відмінний від нуля, однак він має досить складну залежність від частоти стоксового зсуву Ω і в цьому випадку функція $g_R = g_R(\Omega)$ отримала назву профілю ВКР підсилення. Реальні профілі ВКР підсилення всіх кварцових волокон, незважаючи на досить значимі відмінності для різних типів волокна, забезпечують на практиці можливість спільного використання таких волокон не тільки для передачі оптичних імпульсів на великі відстані, а й для одночасного їх підсилення для компенсації неминучих втрат потужності світлових сигналів.

На рис.2 представлено профілі ВКР підсилення $g_R(\Omega)$ в абсолютних одиницях, $[(Вт \cdot км)^{-1}]$ для обох типів ОМВ, що були прийняті для моделювання. На осі абсцис подано незалежну змінну - частоту стоксового зсуву Ω , яка для зручності представлена як у спектроскопічних одиницях, $[см^{-1}]$ на нижній осі, так і в $[ТГц]$ – на верхній осі.

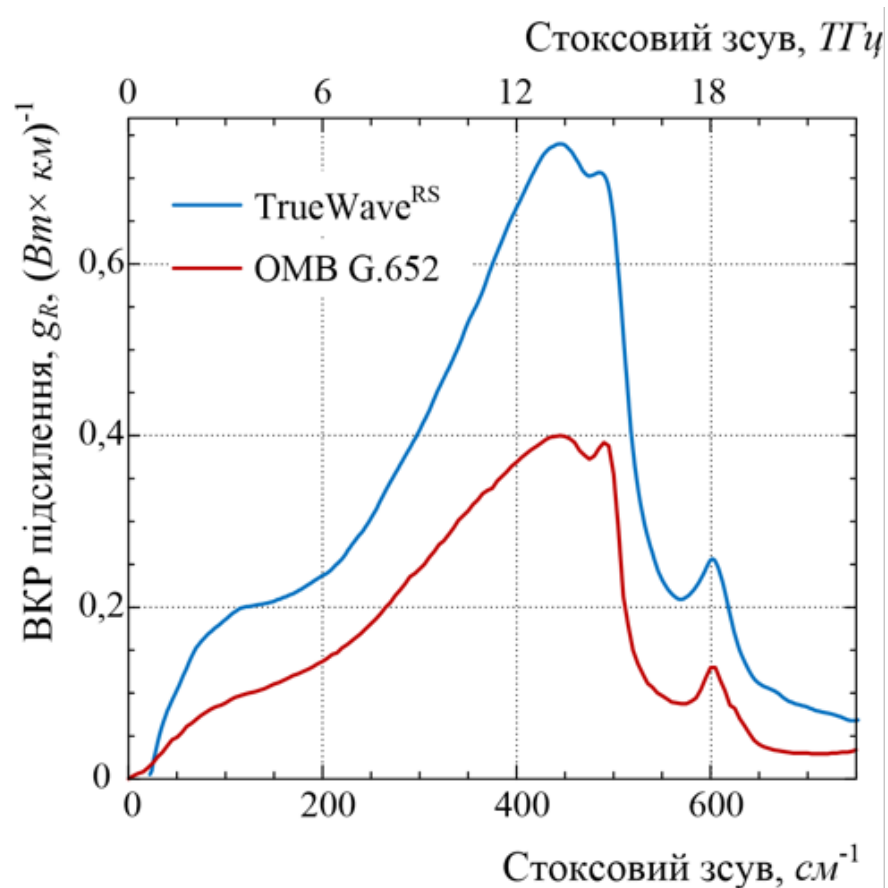


Рисунок 2 – Профілі ВКР підсилення двох стандартних одномодових волокон на основі кварцового скла.

Спільною особливістю обох профілів ВКР підсилення є їх досить складна, дифузна структура континуального типу, яка неперервно поширюється на дуже широку область частот стоксового зсуву $\Omega = \omega_p - \omega_s$ – від нуля до понад $600 см^{-1}$ ($=18 ТГц$). Ширина профілів на рівні від половини максимуму, яка визначає відповідну робочу смугу ВКР підсилення, складає приблизно $4 ТГц$. Головна відмінність між волокнами – це 2-х кратна різниця у числових значеннях максимумів g_{Rmax} . Урахування зазначених обставин набуває принципового

значення для моделювання динаміки розподіленого ВКР підсилення в процесі розповсюдження світлового сигналу вздовж активного волокна.

1. 2. Теорія процедура Гаусової декомпозиції

Аналіз спектра комбінаційного розсіяння (КР) за допомогою гаусових профілів ліній базується на наступному виразі:

$$g_R(\omega) = \sum_{i=0}^{Nm} A_i \exp \left[-\frac{(\omega - \omega_{v,i})^2}{\Gamma_i^2} \right], \quad (1)$$

де Nm – кількість мод, використуваних для декомпозиції;

$\omega_{v,i}$ – центральна частота i -ого гаусового профілю;

$$\Gamma_i = \frac{FWHM_i}{2\sqrt{\ln 2}} \approx 0,6 \cdot FWHM_i,$$

де $FWHM_i$ – повна ширина на половині максимуму для i -ого гаусового профілю.

При однорідному розширенні коливальних частот для декомпозиції складного спектрального контуру зазвичай використовують лоренцівську форму лінії. В цьому випадку апроксимація профілю комбінаційного розсіяння (КР) виглядає наступним чином:

$$g_R(\omega) = \sum_{i=0}^{Nm} A_i \cdot \frac{(\gamma_i / 2)^2}{(\omega - \omega_{v,i})^2 + (\gamma_i / 2)^2}, \quad (2)$$

де A_i – амплітуда нормованого профілю Лоренца,

$\omega_{v,i}$ – частота у центрі лінії,

γ_i – повна ширина на половині максимуму.

Насправді, при однорідному розширенні бажано використовувати набір нормованих функцій фононного осцилятора, що показує, як функція $g_R(\omega)$ виражається в такому вигляді:

$$g_R(\omega) = \sum_{i=1}^{Nm} \frac{A_i}{\omega_{v,i}} \cdot \frac{\omega_{v,i} \gamma_i^2 \omega}{(\omega^2 - \omega_{v,i}^2)^2 + (\omega \gamma_i)^2}, \quad (3)$$

Для апроксимації також використовують наближену модель розширення, але на відміну від вищезазначеного, ми використовуємо інший набір фундаментальних функцій для розкладання спектра ВКР:

$$g_R(\omega) = \sum_{l=1}^{Nm} \frac{A'_l}{2\omega_{v,l}} \int_0^{\infty} \{\cos[(\omega_{v,l} - \omega)t] - \cos[(\omega_{v,l} + \omega)t]\} \cdot \exp(-\gamma_l t) \exp(-\Gamma_l^2 t^2 / 4) dt, \quad (4)$$

де кожний доданок у сумі містить чотири параметри, які мають той же сенс, що і у виразі для профілів Фойгта. Перераховані вище функції далеко не вичерпують список можливостей сучасного програмного забезпечення для обробки спектральної інформації.

$$g_R(\omega) = g_{Rmax} \cdot \sum_{i=1}^{Nm} A_i \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_{v,i})^2}{\Gamma_i^2}\right] = g_{Rmax} \cdot \varphi(\omega), \quad (5)$$

Задача декомпозиції полягає у досягненні найкращої відповідності форм-фактора $\varphi(\omega)$ експериментальному профілю ВКР. На практиці ми вирішили задачу шляхом пошуку оптимального набору із $3 \times Nm$ параметрів формули за

допомогою комп'ютерної процедури нелінійної апроксимації на основі методу Левенберга-Марквардта. Цей метод використовує алгоритм для знаходження пошуку мінімуму суми найменших квадратів методом якнайшвидшого спуску до квадратичної мінімізації відхилень експериментальних точок від функції $g_R(\omega)$, визначеної в (5). З точки зору застосування декомпозиції, метою було, якщо можливо, створити найпростішу функцію $g_R(\omega)$, яка якомога точніше відповідає експериментальному профілю КР підсиленню.

1. 3. Абсолютна прозорість ВКР підсилення світла у волокнах

Для визначення порогу виникнення зворотного комбінаційного розсіювання (ВКР) достатньо розглянути найпростіший випадок, коли взаємодіють одна помпуюча хвиля і одна стоксовська хвиля. В цьому випадку, інтенсивності як стоксової хвилі, так і хвилі накачки у квазінеперервному наближенні та при повільній зміні амплітуд хвиль під час їхнього розповсюдження вздовж волокна (тобто за координатою z) описуються системою двох зв'язаних рівнянь.

$$\frac{dI_S(z, \omega_S)}{dz} = \tilde{g}_R(\omega_v) I_P(z) I_S(z, \omega_S) - \alpha_S I_S(z, \omega_S) \quad (6)$$

$$\frac{dI_P(z, \omega_S)}{dz} = \frac{\omega_P}{\omega_S} \tilde{g}_R(\omega_v) I_P(z) I_S(z, \omega_S) - \alpha_P I_P(z) \quad (7)$$

де α_S та α_P враховують втрати волокна на стоксовій частоті та частоті накачування відповідно; $\tilde{g}_R(\omega_v)$ – коефіцієнт ВКР підсилення, I_P – інтенсивність накачки, I_S – інтенсивність стоксової хвилі.

Рівняння (6) – (7) є наслідком рівнянь Максвелла. Зауважимо, що поточна частота взаємодіючих хвиль входить до рівнянь (6) і (7) як параметр.

Відносно частотної залежності змінних та коефіцієнтів цих рівнянь ми застосовуємо наступні наближення. Ширину смуги накачки можна вважати

нескінченно вузькою у порівнянні зі смугою стоксового випромінювання, тобто накачка залишається локалізованою на своїй частоті ω_p , а $I_p(z, \omega) = I_p(z, \omega)|_{\omega=\omega_p} = I_p(z)$ і не залежить від частоти у будь-якій точці z вздовж волокна. Фактично система рівнянь (6) – (7) описує КР взаємодію монохроматичних хвиль накачки і стоксового випромінювання.

Природно, що ступінь зв'язку хвиль для будь-якої заданої частоти ω в межах нерівномірного континууму стоксово зсунутих частот однозначно визначається значеннями функцій $g_R(\omega) = g_{R\max} \varphi(\omega)|_{\omega=\omega_p}$ в умовах згасання обох хвиль, що визначаються коефіцієнтами поглинання $\alpha_{s,p} = \alpha_{s,p}(\omega)$. Залежність $\alpha_{s,p}(\omega)$, як правило, є достатньо слабкою. У подальшому коефіцієнти поглинання α_s та α_p ми вважали постійними і такими, що не залежать від частоти в рівняннях (6) і (7).

Безпосереднім наслідком (6) є умова абсолютної прозорості волокна, яка за своїм фізичним сенсом відповідає лазерному порогу процесу ВКР. Оскільки потужність помпування $P_p(\omega)$ можна виразити через інтенсивність накачки $I_p(\omega)$ та ефективну площу волокна A_{eff} , то рівність $dI_s/dz = 0$ з урахуванням нерівності $dP_s(\omega)/dz > 0$ дає наступний кількісний вираз:

$$P_p^{th} = \frac{\alpha_s A_{eff}}{\tilde{g}_R(\omega)} = \frac{\alpha_s}{g_R(\omega)} \quad (8)$$

де \tilde{g}_R [м/Вт] та g_R [Вт·км]⁻¹ – дві еквівалентні форми коефіцієнта ВКР підсилення по відношенню до інтенсивності I_p та потужності P_p , відповідно.

Співвідношення (8) визначає спектральну функцію повної прозорості волокна, тобто $P_p^{th} = P_p^{th}(\omega)$ відповідає граничній умові, коли матеріал серцевини

волокна починає переходити від природного стану з ослабленням стоксової хвилі до стану, в якому стоксова хвиля підсилюється за рахунок потужності накачки.

Для величини P_p^{th} зазвичай обирають її мінімальне значення при $g_R(\omega_{max}) = g_{Rmax}$.

Переваги такого визначення порогу підсилення наступні. Нехай нам відоме значення потужності накачки у деякій точці z волокна, отримане в результаті вимірювань або обчислень. Тоді безпосередньою перевіркою нерівності $P_p > (<) P_p^{th}$ за відомої сталої α та функції $g_R(\omega)$ визначаються не тільки частоти, на яких виконується умова повної прозорості волокна, але й смуга підсилення (генерації), яка розташовується між ними.

Таким чином, за допомогою співвідношення (8) та наявних експериментальних даних з профілю $g_R(\omega)$ ВКР підсилення можна безпосередньо обчислити залежність порогу підсилення від частоти (або від довжини хвилі) в області стоксового зсуву для довільної довжини хвилі джерела помпування.

2. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

В якості активного середовища для моделювання FRA обрано стандартні одномодові волокна (ОМВ). Це волокно було розроблено досить давно і раніше використовувалося тільки як високо прозорий носій оптичних сигналів. Спочатку ОМВ виготовлялися із «чистого» кварцового скла за стандартом G.652 і з часом системи зв'язку були вдосконалені шляхом одночасного зменшення негативного впливу дисперсії на швидкісні параметри обміну інформацією (кварцове ОМВ типу TrueWave RS™). Першим і критично важливим етапом аналізу частотно-просторової динаміки в розподілених ВКР підсилювачах є застосування раніше розробленого методу [9] для аналітичного представлення профілів підсилення у цих волокнах.

2. 1. Процедура Гаусової декомпозиції

Профіль ВКР підсилення можна представити в аналітичній формі за допомогою розкладу на кілька гаусових спектральних компонент як [9]:

$$g_R(\omega) = g_{R_{\max}} \cdot \sum_{i=1}^N A_i \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_{v,i})^2}{\Gamma_i^2}\right] = g_{R_{\max}} \cdot \varphi(\omega), \quad (9)$$

Результати нашої апроксимації профілів ВКР підсилення методом гаусової декомпозиції для двох кварцових волокон показані на рис. 3, де обвідні, які показують суму всіх компонент зображені суцільними червоними лініями, а пунктирні лінії відповідають експериментальним спектрам. Усі 10 гаусових коливальних мод G_i як для волокна TrueWave RS™, так і для волокон G.652 представлені відповідними контурами, які зображені суцільними лініями на рис. 2.

Використовуючи (9) та процедуру нелінійної регресії [9], був отриманий оптимальний набір із 30 параметрів для $N = 10$ коливальних мод в обох випадках для спектрального діапазону підсилення від 0 до 800 cm^{-1} . Оскільки похибка апроксимації не перевищує 1%, то в результаті нелінійної регресії

отримано майже точний аналітичний вираз для профілю ВКР підсилення у робочому діапазоні частот до 20 ТГц.

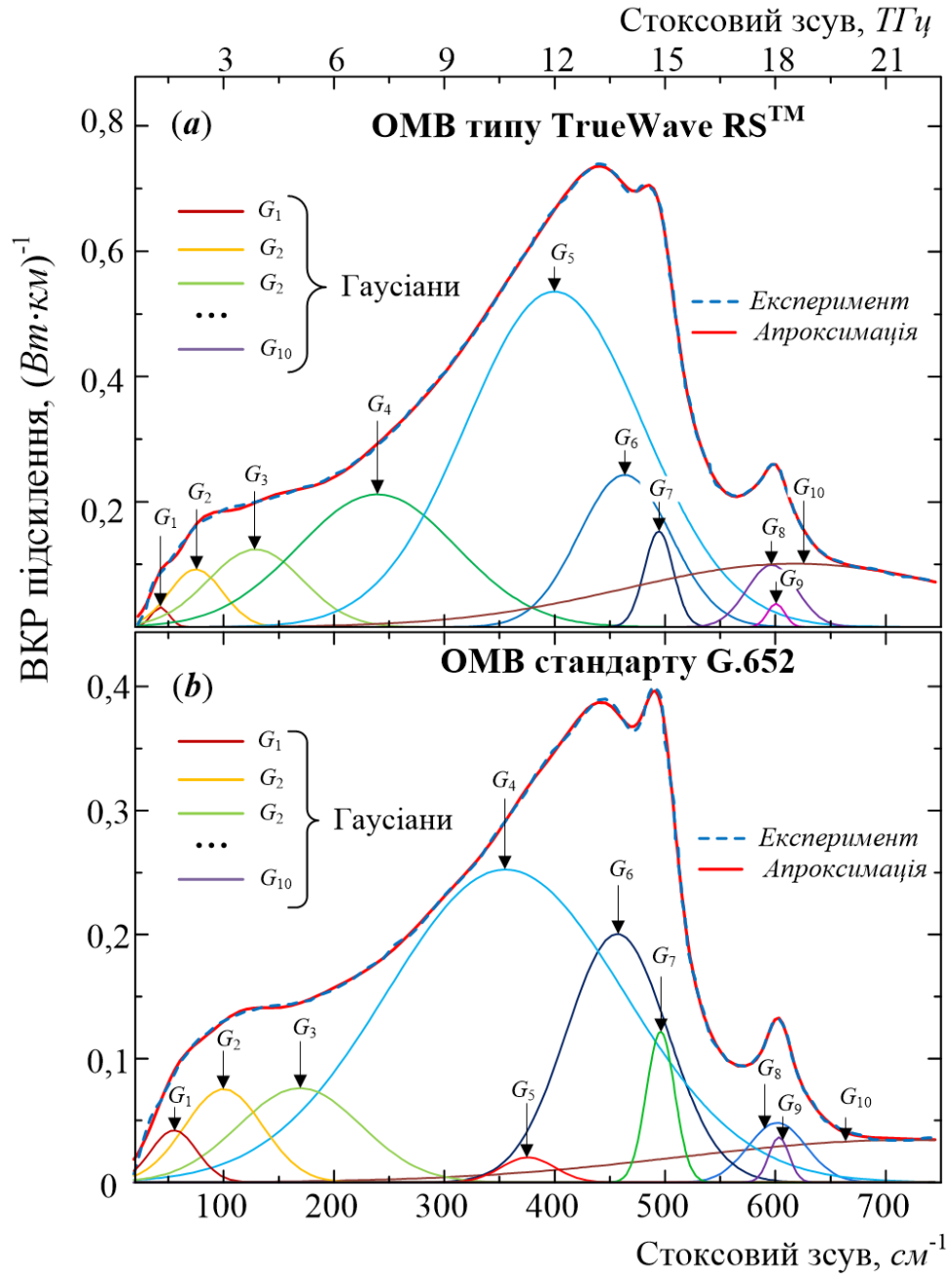


Рисунок 3 – Результат декомпозиції на 10 гаусових компонент, що дає майже точну аналітичну апроксимацію (червоні суцільні лінії для гаусових обвідних) експериментальних профілів ВКР підсилення (пунктир) у двох типів кварцових волокон: (a) TrueWave RS™ та (b) волокно типу G.652.

Дійсно профіль ВКР підсилення можна представити у наступному аналітичному вигляді:

- для стандартного волокна типу G.652:

$$\begin{aligned} \varphi(\omega) = & 0.09e^{-0.01(\omega-21.7)^2} + 0.09e^{-0.8(\omega-18)^2} + 0.1e^{-6.8(\omega-18)^2} \\ & + 0.3e^{-0.05(\omega-15)^2} + 0.5e^{-(\omega-14)^2} + 0.05e^{-0.2(\omega-11)^2} \\ & + 0.6e^{-3(\omega-10.7)^2} + 0.2e^{-0.3(\omega-5)^2} + 0.2e^{-0.5(\omega-3)^2} + 0.1e^{-1.3(\omega-1.7)^2} \end{aligned} \quad (10)$$

- для волокна TrueWave RS™:

$$\begin{aligned} \varphi(\omega) = & 0.1e^{-0.02(\omega-18.5)^2} + 0.05e^{-(\omega-18)^2} + 0.1e^{-9(\omega-18)^2} + \\ & + 0.2e^{-0.09(\omega-15)^2} + 0.3e^{-0.3(\omega-14)^2} + 0.7e^{-0.1(\omega-12)^2} + \\ & 0.3e^{-3(\omega-7)^2} + 0.2e^{-0.3(\omega-4)^2} + 0.1e^{-9(\omega-2)^2} + 0.04e^{-(\omega-1.2)^2} \end{aligned} \quad (11)$$

Зазначимо, що всі числові коефіцієнти в (10) і (11) задля компактності запису представлені в значно округленому вигляді.

2. 2. Динамічні рівняння для розподіленого ВКР підсилення

В найпростішому випадку розподілене ВКР підсилення реалізується як нарощування потужності P_s однієї стоксової хвилі за рахунок нелінійної взаємодії з високо інтенсивною окремою хвилею накачки, що має потужність P_p . Динаміка зміни обох потужностей під час їх спільного розповсюдження в одному напрямку, а саме вздовж координати z ($z \in [0, L]$) оптичного волокна, описується системою зв'язаних диференціальних рівнянь [8]:

$$\begin{cases} \frac{dP_s}{dz} = g_R P_p P_s - \alpha_s P_s & (a) \\ \frac{dP_p}{dz} = -\frac{\omega_p}{\omega_s} g_R P_p P_s - \alpha_p P_p & (b) \end{cases} \quad (12)$$

де α_s та α_p в $[km^{-1}]$ – це коефіцієнти поглинання світла відповідно на стоксовій частоті ω_s та на частоті накачки ω_p . Формальний зв'язок між обома рівняннями забезпечує нелінійний коефіцієнт ВКР підсилення $g_R(\Omega)$, $[(Bm \cdot km)^{-1}]$, а його частотний спектр відповідає профілю ВКР підсилення $g_R = g_R(\Omega)$.

Слід зазначити, що у загальному випадку аналітичні розв'язки навіть для найпростішої системи (12) наразі невідомі і це значно ускладнює моделювання практичного ВКР підсилювача для багатоканальних волоконно-оптичних ліній. Ось чому моделювання реальних систем, які сьогодні можуть містити кілька сотень Стоксових хвиль (по числу каналів) і приблизно десятків довжин хвиль накачування, призводить до надто складних розрахунків. Крім того, кількість зв'язаних диференціальних рівнянь буде дорівнювати сумі числа хвиль сигналу і хвиль накачки, а їх числові розв'язки потребують досить значних витрат.

Однак, головна проблема моделювання полягає не у застосуванні більш ефективних алгоритмів розв'язку складних систем диференційних рівнянь дуже високого рангу, а у наявності особливих точок для кожної сигнальної хвилі. З практичної точки зору особлива точка - це порогові значення потужності накачок, визначення яких відноситься до основних задач моделювання. Але поблизу від цих особливих точок розв'язки системи рівнянь стають нестійкими, тобто отримані числові результати надто сильно відхиляються одне від іншого за малих відхилень у заданих значеннях коефіцієнтів кожного рівняння.

Це обмеження методики диференційних рівнянь має принциповий характер в задачах моделювання ВКР підсилення та може приводити до неоднозначних результатів. Негативний вплив нестійкості розв'язків на результати моделювання, однак, можна дещо зменшити шляхом забезпечення максимальної точності визначення всіх коефіцієнтів g_R в межах робочої смуги частот ВКР підсилювача. Експериментальні залежності $g_R(\Omega)$ показано на рис.2. Обидва профілі, як і для багатьох інших волокон із аморфного кварцового скла, мають вигляд нерівномірного континууму із терагерцовою шириною спектру, що сильно ускладнює проблему їх точного відтворення при моделюванні. Крім того, профіль ВКР підсилення є індивідуальним для кожного типу волокна і методи його максимально точної апроксимації являють собою окрему задачу. У підсумку, зважаючи на досить велику кількість досліджень, присвячених моделюванню динаміки ВКР підсилення для багатоканальних систем методом зв'язаних

диференційних рівнянь, що опубліковані за останні два десятиліття [4,5,11], проблема залишається ще дуже далекою від свого остаточного вирішення.

2. 3. Критерій застосовності моделі слабого сигналу для ВКР підсилення

В роботі використана модель слабого сигналу, заснована на наближенні невиснаженої накачки, як альтернативу поширеним на даний момент методам моделювання. Фундаментальні принципи ВКР підсилення [8] свідчать про спектральну однорідність підсилення всіх складових частот стокового спектру лише для сигналів малої потужності, тобто в межах умов застосовності наближеного розв'язку системи основних рівнянь (12). У цьому наближенні, як відомо [8], розглядають випадок, коли першим членом у правій частині рівняння (12b) можна знехтувати, тобто якщо:

$$\frac{\omega_p}{\omega_s} g_R P_s \ll \alpha_p \quad (13)$$

Нерівність (13), по суті, визначає верхню межу потужності сигналу P_s , коли виснаження потужності помпування P_p через її безпосередні витрати лише на підсилення сигналу залишається ще несуттєво малим порівняно з витратами на власне загасання α_p хвилі накачки. Спрощене рівняння (12b) без першого члена в правій частині більше не зв'язане із рівнянням (12a). У результаті рівняння (12b) стає еквівалентним випадку вільного розповсюдження накачки у дисипативному середовищі із загасанням, тобто накачування залишається заданим і незалежним від наявності нелінійної взаємодії. Розв'язок спрощеного рівняння добре відомий і має вигляд: $P_p(z) = P_0 e^{-\alpha_p z}$, де $P_0 = P_p(z=0)$, [Вт] — початкове значення потужності накачування у точці його введення до волокна. Підставляючи цей розв'язок у рівняння (12a), отримуємо шуканий вираз, що описує динаміку зміни потужності сигналу по довжині волокна L :

$$P_s(L) = P_s(0) \exp(g_R P_0 L_{eff} - \alpha_s L) \quad (14)$$

де $L_{eff} = [1 - \exp(-\alpha_p L)] / \alpha_p$ - ефективна довжина взаємодії між стоксовою хвилею та хвилею накачки, [км]. Вона дорівнює дійсній довжині $L_{eff} \cong L$ на початку волокна (при $\alpha_p L \ll 1$), а потім не перевищує свого асимптотичного значення $L_{eff} = 1/\alpha_p$ при $L \rightarrow \infty$. Отже, L_{eff} при великих значеннях $L \rightarrow \infty$ співпадає із характеристичною довжиною, на якій потужність накачки зменшується у e разів. Тому, довжина $L_{1/2}$, на якій потужність накачки зменшується у 2 рази, дорівнює $L_{1/2} = \ln(2)L_{eff} = 0.69L_{eff}$. Слід зазначити, що в (6) $P_s(0)$ і $P_s(L)$ є потужністю сигналу на вході ($z=0$) і підсиленням на довжині L ($z=L$) вихідним сигналом, відповідно. Тоді, враховуючи вираз (14), безрозмірний коефіцієнт підсилення Стоксової хвилі $G_{on/off}(L) = P_s(L)/P_s(0)$ можна представити в аналітичному вигляді як:

$$G_{on/off}(L) = \exp \left\{ \frac{g_R}{\alpha_p} P_0 [1 - \exp(-\alpha_p L)] - \alpha_s L \right\} \quad (15)$$

У межах зроблених наближень (застосовність яких ми аналізуємо нижче) це дозволяє отримати досить точні результати при моделюванні процесів нелінійного оптичного підсилення шляхом ВКР в таких ОМВ, як TrueWaveRS і кварцове волокно типу G.652. В логарифмічному масштабі вираз (14) для підсилення $G_{on/off}$ в [дБ] приймає вигляд:

$$G_{on/off} [dB] = 4.343 \cdot \left\{ \frac{g_R}{\alpha_p} P_0 [1 - \exp(-\alpha_p L)] - \alpha_s L \right\} \quad (16)$$

де числовий коефіцієнт - це $10 \log_{10} e = 4.34$.

Аналітичні вирази (15) і (16) покладені в основу нашої спрощеної моделі для опису динаміки ВКР підсилення залежно від довжини волокна L . Модель враховує наявність оптичних втрат електромагнітного випромінювання в реальних волокнах, як для накачки з коефіцієнтом загасання α_p , так і для сигналу з

коефіцієнтом загасання α_s . Потужність накачки P_0 на вході в активне волокно є параметром моделі, який дозволяє регулювати значення підсилення $G_{on/off}$ в реальному пристрої.

Однак, незважаючи на явні переваги аналітичного моделювання, особливо очевидні при порівняльному аналізі різних волокон як ВКР активного середовища, важливо враховувати обмеження, а саме виконання нерівності (13), яка має сенс як критерій застосовності самої моделі. Якщо ввести значення критичної потужності сигналу P_s^{cr} :

$$P_s^{cr} = \frac{\omega_s}{\omega_p} \frac{\alpha_p}{g_{R_{\max}}} \quad (17)$$

то нерівність

$$P_s \leq P_s^{cr} \quad (18)$$

розглядається як еквівалентна форма критерію застосовності аналітичної моделі. За своїм фізичним змістом потужність стоксової хвилі P_s^{cr} , згідно з (13) і (17), відповідає критичному значенню сигналу в підсилювачі. У разі перевищення потужності сигналу понад критичну його підсилення набуває домінантного характеру, оскільки відбір потужності сигналом [ліва частина (13)] починає перевищувати дисипативні втрати накачки у волокні з постійним загасанням α_p . Якщо нарощування P_s призводить до зміни знаку нерівності (16), тобто при $P_s \gg P_s^{cr}$, то виникає режим генерації, коли в результаті конкуренції мод майже вся потужність накачки перетікає лише у вузьку смугу частот навколо максимуму профіля ВКР підсилення. Оскільки генерація в межах смуги пропускання будь-якого підсилювача (самозбудження) є вкрай небажаною, можна очікувати, що для забезпечення належної роботи широкосмугових ВКР підсилювачів значення P_s , у загальному випадку, повинні задовольняти нерівності типу (18).

Введену критичну потужність сигналу P_s^{cr} слід віднести до характеристичних параметрів волокна, яке буде використовуватися як активне середовище для ВКР підсилення. Дійсно, оскільки $\omega_s/\omega_p \cong 1$, тобто практично не залежить від параметрів і схеми накачування, числове значення P_s^{cr} практично індивідуальне для кожного волокна. Вона визначається відношенням параметра лінійного загасання α_p до нелінійного коефіцієнта ВКР підсилення g_{Rmax} , де g_{Rmax} є максимумом на профілі ВКР підсилення $g_R = g_R(\Omega)$.

Відповідно до співвідношень (13) і (17), виконання нерівності (18) для $g_R = g_{Rmax}$ гарантується для всіх інших частот у межах смуги ВКР підсилення, тобто для всіх $g_R = g_R(\Omega)$.

Слід зазначити, що за критерієм (18) порівнянню підлягають значення потужності сигналу P_s після підсилення на довжині L , а результати вважаються достовірними лише за умови виконання цієї нерівності. Характеристичні параметри P_s^{cr} для досліджуваних волокон визначаються на попередньому етапі моделювання з урахуванням відповідних констант ослаблення α_p на довжині хвилі накачування. Числові значення цих параметрів наведено в таблиці 1 для зручності перевірки виконання критерію (18) та підтвердження застосовності запропонованої моделі до кожного волокна. Зокрема, жорстке виконання нерівності (18) в умовах нашого моделювання, де потужність P_s практично на два порядки менша за P_s^{cr} в обох волокнах, є незаперечним фактором на користь правомірності застосування наближеної моделі із забезпеченням достатньої точності наведених числових розрахунків.

Моделювання проводилось за схемою розподіленого підсилення з прямою накачкою, коли сигнал на довжині хвилі $\lambda_s=1,52$ мкм потужністю $P_s=1$ мВт розповсюджувався вздовж волокна разом із хвилею накачування на $\lambda_p=1,425$ мкм значно більшої потужності. Обидві хвилі поширювалися в одному напрямку, а потужність накачки можна було збільшувати, починаючи з $P_p=100$ мВт. Вхідні

дані для нашого моделювання динаміки розподіленого ВКР підсилення, підсумовані в таблиці 1. З метою порівняльного аналізу тут представлені дані для двох модельних волокон, а саме для волокна TrueWave RSTM і для волокна із «чистого» кварцу стандарту G.652.

Таблиця 1 – Параметри волокон, що були використані для моделювання динаміки розподіленого ВКР підсилення монохроматичного сигналу з $\lambda_s = 1,52$ мкм при помпуванні на довжині хвилі $\lambda_p = 1,425$ мкм.

Параметр	Тип волокна	
	G.652	TrueWave ^{RS}
<i>l</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
1. Вхідна потужність сигналу, P_p , мВт	1	1
$\delta Бм$	0	0
2. Частота сигналу, ω_s , ТГц	197,4	197,4
3. Загасання сигналу, α_s , $\delta Б/км$, $км^{-1}$	0,2 0,046	0,2 0,046
4. Частота накачки, ω_p , ТГц	210,5	210,5
5. Загасання накачки, α_p , $\delta Б/км$, $км^{-1}$	0,4 0,092	0,26 0,06
6. Довжина вільного загасання накачки, L_{eff} , км	10,8	16,7
$L_{1/2}$, км	7,5	11,5
7. Максимум профілю ВКР підсилення, g_{Rmax} , $(Вт \cdot км)^{-1}$	0,4	0,74
8. Порогова потужність накачки для ВКР підсилення, P_{th} , мВт	115,1	62,2
$\delta Бм$	20,6	17,9
9. Критична потужність сигналу, P_s^{cr} , мВт	215,9	75,9
$\delta Бм$	23,3	18,8

Оцінку допустимого рівня підсилення в межах застосовності аналітичної моделі проводиться за допомогою критерію (17) з використанням експериментальних даних з табл. 1. Коефіцієнти підсилення $G_{on/off}$ для схеми прямої накачки були розраховані на основі рівнянь (15) і (16) в припущенні потужності вхідного сигналу 1 мВт. Спрощена модель залишається чинною за цих

умов, якщо підсилення сигналу не перевищує ~ 120 (21 дБ) у стандартному волокні G.652 і не перевищує ~ 70 (18 дБ) у волокні TrueWave RSTM.

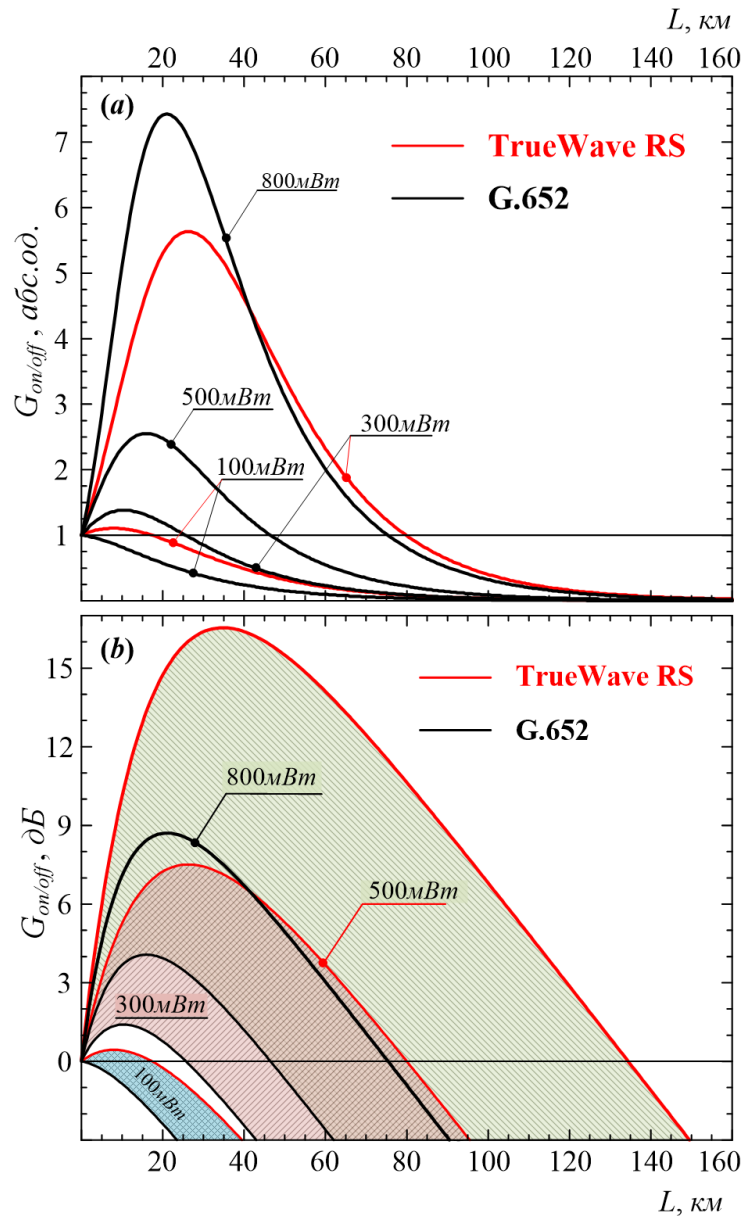


Рисунок 4 – Просторова динаміка оптичного підсилення показана як залежність ВКР підсилення сигналу від довжини його розповсюдження для трьох рівнів потужності від джерела накачки на одній довжині хвилі $\lambda_p=1425$ нм у стандартному ОМВ типу G.652 та волокні типу TrueWave RSTM: (a) лінійна шкала, (b) логарифмічна шкала.

Варто зазначити, що за потужності накачки $P_p=100$ мВт поріг ВКР підсилення досягається лише у волокні TrueWave RSTM, так як $P_{th} = 62$ мВт, але не у волокні G.652, оскільки $P_p < P_{th} = 109$ мВт, в результаті чого $G_{on/off} < 1$ по всій довжині волокна. В останньому випадку ВКР нелінійність в підпороговому режимі накачки призводить не до підсилення сигналу, а лише до зменшення його ослаблення при поширенні вздовж волокна.

2. 4. Динаміка розповсюдження в розподіленому ВКР підсилювачі

Результати моделювання динаміки підсилення FRA у волокнах TrueWave RSTM і G.652 проілюстровані на рис. 4. Показана еволюція сигналу при його поширенні вздовж довжини L волокна для різних значень потужності накачування. Для обох волокон коефіцієнти оптичного підсилення $G_{on/off}(L)$ представлені на рис.2 як функція довжини волокна лінії зв'язку для значень $P_0 = 100; 300; 500$ і 800 мВт: (а) лінійна шкала, (б) логарифмічна шкала, [дБ].

Зазвичай такі рівні потужності накачки створюють області позитивного підсилення (рис. 4) в обох волокнах, за винятком підпорогового режиму помпування при $P_0 = 100$ мВт у волокні G.652. Просторовий розмір таких областей чистого підсилення залежить від потужності накачки, і він покриває довжину волокна, що позначена як L_0 . Прийнято L_0 як довжину повної прозорості у волокні.

Дійсно, оскільки після проходження через довжину L_0 маємо рівність $G_{on/off}(L_0) = G_{on/off}(0) = 1$, тобто сигнал повертає свою початкову потужність. Це означає, що сегмент транспортного волокна довжиною L_0 буде виглядати повністю прозорим без ослаблення сигналу. У дійсності повну прозорість волокна забезпечує ВКР підсилювач, а його підсилення, тобто потужності накачування, достатньо для повної компенсації власних втрат волокна лише на довжині L_0 . Далі при $L > L_0$ вплив накачування швидко зменшується і розповсюдження сигналу мало відрізняється від вільного поширення по волокну ВКР підсилювача.

Це видно на рис. 2b, де в області $L > L_0$ логарифмічна залежність $G_{on/off}(L)$ складається з паралельних прямих. Лінійний хід кривої $G_{on/off}(L)$ в логарифмічному масштабі відповідає звичайному експоненціальному загасанню сигналу у волокні, а паралельність усіх ліній при $L > L_0$ вказує на рівність усіх показників експоненти, тобто на рівність всіх коефіцієнтів загасання сигналу у волокні. Природно, що на великій відстані від джерела накачування загасання сигналу повертається до своїх значень, які були б без ВКР підсилення.

Таблиця 2 – Характеристичні параметри відносно просторової динаміки оптичного підсилення $G_{on/off}$ у двох кварцових волокнах.

P_0 , мВт	<i>TrueWave^{RS} волокно</i>					<i>ОМВ стандарту G.652</i>				
	$\alpha_p = 0,26$ дБ/км; $\alpha_s = 0,2$ дБ/км					$\alpha_p = 0,4$ дБ/км; $\alpha_s = 0,2$ дБ/км				
	G_{max}	G_{max} , дБ	L_{max} , км	L_0 , км	$L_{1/2}$, км	G_{max}	G_{max} , дБ	L_{max} , км	L_0 , км	$L_{1/2}$, км
100	1,1	0,4	8,0	17,5	39,5	1,1	0	-	-	27
300	5,63	7,51	26,5	80	95,5	1,38	1,41	10,5	25,5	43
500	45,1	16,5	35	134	149	2,55	4,07	16,0	46,5	62
800	$P_s > P_s^{cr} = 76$ мВт – модель незастосовна					7,43	8,71	21	75,5	90,5
<i>Примітки:</i>										
1. Використано такі розрахункові параметри: $\lambda_p = 1425$ нм; $\lambda_s = 1525$ нм;										
2. P_s – потужність сигналу; P_s^{cr} – критична потужність сигналу.										

Динаміка компенсації власних втрат на довжині повної прозорості, як видно на рис. 2, має нерівномірний вигляд з чітким максимумом, розташованим на довжині волокна, що позначена як L_{max} . Значення L_{max} , а також іншої характеристичної довжина $L_{1/2}$, що позначає точку половинного ослаблення сигналу після підсилювача, залежать як від потужності накачування, так і від власних параметрів активного волокна. В результаті моделювання було отримано числові дані для зазначених характеристичних довжин волокна і разом із коефіцієнтами підсилення G_{max} , вони представлені в таблиці 2.

Розподілене ВКР підсилення в обох типах волокон, як свідчать дані нашого моделювання, які наведені в табл. 2, дозволяє розширити область повної прозорості волокон до 150 км при роботі підсилювача в режимі підсилення вхідних сигналів з потужністю 1 мВт. Незважаючи на майже однакові

максимально досяжні значення L_0 в обох волокнах, волокно типу TrueWave RS™ дозволяє майже вдвічі ефективніше використовувати потужність накачування порівняно зі стандартним одномодовим волокном G.652. Однак існує значна різниця у критичних потужностях, а саме $P_S^{cr} = 86$ мВт для TrueWave RS™ і $P_S^{cr} = 132$ мВт для ОМВ типу G.652, перевищення яких вкрай небажано для підтримки робочих режимів ВКР підсилювача.

Загалом, дані із таблиці 2 підтверджують застосовність моделі для опису динаміки розподіленого ВКР підсилення в досить широкому діапазоні зміни потужності накачки в обох типах волокон. Варто зазначити, що розглянутий випадок підсилення достатньо сильного сигналу на вході лінії передачі є найважчим з точки зору застосовності моделі, оскільки обмеження моделі передбачають не перевищення критичної потужності P_S^{cr} сигналу. Тому умови застосовності моделі, очевидно, більш суворо виконуються при розгляді зворотної накачки сигналу з боку фотоприймача, де підсилюються сигнали, які вже значно ослаблені після поширення на велику відстань.

2. 5. 2D коефіцієнти підсилення $G_{on/off}$

Наведені розрахунки базуються на описаній моделі підсилення, яка забезпечує достатню точність обчислень в умовах розподіленого підсилення відносно слабкого сигналу за рахунок більш потужного (як мінімум на два порядки вище) помпування. За цих умов 2D коефіцієнт підсилення $G_{on/off}(\lambda, L)$ в децибелах, тобто спектральний розподіл як по довжинах хвиль λ ($\lambda > \lambda_p$), так і в залежності від довжини волокна L , матиме вигляд :

$$G_{on/off}(\lambda, L) = 4.343 \cdot \left\{ g_R \left(\frac{1}{\lambda_p} - \frac{1}{\lambda} \right) P_0 [1 - \exp(-\alpha_p L)] / \alpha_p - \alpha_s L \right\} \quad (19)$$

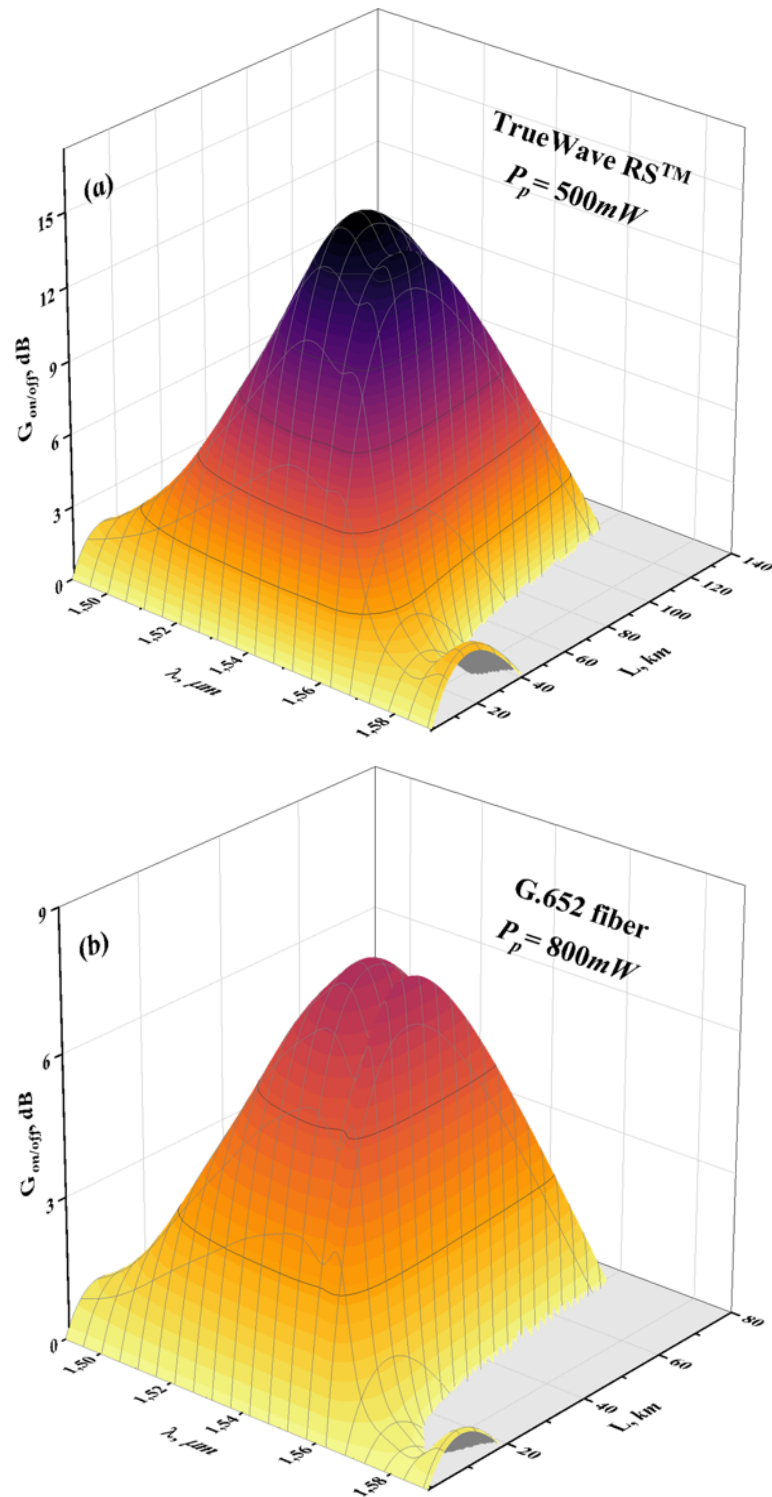


Рисунок 5 – 2D динаміка ВКР підсилення у С-вікні прозорості волокон і з використанням монохроматичної накачки на довжині хвилі $\lambda_p = 1,45$ мкм:

а) ОМВ типу TrueWave RS™ при $P_p = 500$ мВт; б) стандартне ОМВ типу G.652 при $P_p = 800$ мВт

2D динаміку ВКР підсилення у С-вікні прозорості волокон ми ілюструємо на Рис. 5.

Таким чином, обидва стандартні ОМВ на основі кварцового скла можуть бути використані як активне середовище для розподіленого ВКР підсилення оптичних хвиль. Завдяки ВКР підсилювачу довжину повної прозорості цих транспортних волокон можна значно збільшити, а саме на кілька десятків або навіть більше сотні кілометрів.

ВИСНОВКИ

В роботі представлено результати моделювання динаміки розподіленого ВКР підсилення за різних потужностей помпування та паралельного його розповсюдження із сигналом вздовж довжини двох типів кварцових волокон – TrueWave RSTM та стандартного G.652. Обґрунтовано можливість використання спрощеної аналітичної моделі нелінійного ВКР підсилення оптичних сигналів, як ефективної альтернативи більш поширеній моделі прямого числового розв'язку складних систем диференціальних рівнянь із загальної теорії нелінійної взаємодії довільної кількості хвиль сигналів та накачки.

Мета, що була поставлена у дипломній роботі, передбачала доведення застосовності спрощеної моделі нелінійного оптичного підсилення для стандартних волокон на основі кварцового скла.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішене **актуальне науково-технічне завдання** яке полягало у визначенні критерію застосовності спрощеної моделі ВКР підсилення для стандартних волокон на основі кварцового скла, моделюванні динаміки ВКР підсилення та проведенні порівняльного аналізу параметрів залежно від довжини хвилі та довжини активних волокон G.652 та TrueWaveRS.

Основний науковий результат роботи – доведена застосовність моделі слабкого сигналу для стандартних кварцових волокон, які використовуються в телекомунікаційних системах.

Відмінності отриманого наукового результату від раніше відомих, що зумовили його **наукову новизну**, полягають у введенні нового кількісного критерію застосовності моделі слабкого сигналу, а також у визначенні меж потужностей накачки, за яких модель коректно описує нелінійний процес оптичного підсилення в стандартних кварцових волокнах.

Практична цінність отриманого наукового результату роботи полягає у

- покращенні технологій оптичного зв'язку (отримані результати дозволяють вдосконалити конструкцію волоконно-оптичних

підсилювачів, що підвищить ефективність телекомунікаційних систем, зокрема, у довгих лініях зв'язку);

- оптимізації параметрів підсилення (визначення критичних параметрів, таких як потужність сигналу та накачки, дозволяє оптимізувати роботу волоконно-оптичних підсилювачів, забезпечуючи рівномірне підсилення без нелінійної конкуренції мод).

Значення отриманого результату для теорії та практики полягає у подальшому розвитку теорії нелінійного ВКР підсилення, а також у можливості його застосування в існуючих волоконно-оптичних системах (модель може бути використана для аналізу та покращення вже існуючих систем зв'язку, що базуються на стандартних кварцових волокнах, шляхом підвищення їх продуктивності та надійності).

Таким чином, мета роботи досягнута і поставлене науково-технічне завдання виконано.

Результати роботи апробовані на наукових конференціях та опубліковані в науковій статті [30, 33-35].

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. L. Sirleto, M.A. Ferrara. Fiber amplifiers and fiber lasers based on stimulated Raman scattering: A Review. *Micromachines*, 2020, 11(3), 247; <https://doi.org/10.3390/mi11030247>.
2. П.А. Коротков, Г.С. Фелінський. Волоконні ВКР лазери неперервної дії // УФЖ. Огляди. – 2007. – Т.4, № 1. – С. 36-60.
3. M.N. Islam. Raman amplifiers for telecommunications // *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.* – 2002. – Vol. 8, N 3. – P. 548-559.
4. П.А. Коротков, Г.С. Фелінський. ВКР підсилення світла в одномодових кварцових волокнах // УФЖ. Огляди. – 2009. – т.6, № 2. – С. 103-169.
5. В. І. Григоруk, І. В. Сердега, Г. С. Фелінський, П. А. Коротков «Волоконні ВКР лазери та підсилювачі оптичного випромінювання», Розділ 2 у монографії «Взаємодія фізичних полів з наноструктурованими матеріалами». – К:Каравела, 2018. – 382с., с. 62-128. ISBN 978-966-2229-77-6.
6. B. J. Puttnam, R. S. Luis, G. Rademacher, Y. Awaji and H. Furukawa, "1 Pb/s Transmission in a 125 μ m diameter 4-core MCF," *2022 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, San Jose, CA, USA, 2022, pp. 1-2. <https://www.nict.go.jp/en/press/2022/05/30-1.html>
7. B. J. Puttnam, R. S. Luís, G. Rademacher, Y. Awaji and H. Furukawa, "319 Tb/s Transmission over 3001 km with S, C and L band signals over >120nm bandwidth in 125 μ m wide 4-core fiber," *2021 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, San Francisco, CA, USA, 2021, pp. 1-3.
8. H. Takara, T. Mizuno, H. Kawakami, Y. Miyamoto, H. Masuda, K. Kitamura, H. Ono, S. Asakawa, Y. Amma, K. Hirakawa, S. Matsuo, K. Tsujikawa, and M. Yamada, "120.7-Tb/s MCF-ROPA unrepeated transmission of PDM-32QAM channels over 204 km," *J. Light. Technol.* 33, No. 7, 1473 (2015). DOI: 10.1109/JLT.2015.2397009.
9. Крутінь, Я. В., Корчак, О. В., Резніков, М. І., & Фелінський, Г. С. (2022). Моделювання ВКР підсилювача в активному волокні TrueWave^{RS} з

- рівномірною смугою у C+L телекомунікаційних вікнах. Вісті вищих учбових закладів. *Радіоелектроніка*, 64(12), 715–730.
<https://doi.org/10.20535/S0021347021120013>
10. Recommendation ITU-T G.652. Series G: Transmission systems and media, digital systems and networks. Optical fibre cables. Characteristics of a single-mode optical fibre and cable. Ed.9, **Rec. ITU-T G.652 (11/2016)**.
<https://www.itu.int/itu-t/recommendations/rec.aspx?rec=13076&lang=ru>
 11. J. Yao and H. Deng. “Fiber Raman Amplifier Based on Improved Whale Algorithm” The 2nd International Conference on Electronic Information and Communication Engineering (EICE 2023) 13- 15 Jan 2022 Guangzhou, China, J. Phys.: Conf. Ser. 2525 012016, 2023 DOI: 10.1088/1742-6596/2525/1/012016
 12. H.M. Jiang, K. Xie, Y.F. Wang. Pump scheme for gain-flattened Raman fiber amplifiers using improved particle swarm optimization and modified shooting algorithm. *Optics Express*, 18(11), p.11033-45, 2010.
<https://doi.org/10.1364/OE.18.011033> +
 13. T. Liu, L. Liu, J. Chen, H. Jiang, Q. Sun and Y. Xi. Optimal design of Raman fibre amplifier based on terminal value optimization strategy and shuffled frog leaping algorithm. *Journal of Modern Optics*, 65(14): 1680-7, 2018.
 DOI:10.1080/09500340.2018.1455912 +
 14. H.M. Jiang, K. Xie, Wang Y F. Optimization of pump parameters for gain flattened Raman fiber amplifiers based on artificial fish school algorithm. *Optics Communications*, 284(23): 5480-3, 2011.
<https://doi.org/10.1016/j.optcom.2011.07.074> -
 15. J. Chen, H. Jiang. Optimal Design of Gain-Flattened Raman Fiber Amplifiers Using a Hybrid Approach Combining Randomized Neural Networks and Differential Evolution Algorithm [J]. *IEEE Photonics Journal*, 10(2): 15, 2018.
 DOI: 10.1109/JPHOT.2018.2817843 +
 16. H. R. Tizhoosh, "Opposition-based learning: A new scheme for machine intelligence, " *International Conference on Computational Intelligence for*

- Modelling, Control and Automation and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce (CIMCA-IAWTIC'06)*, Vienna, Austria, 2005, pp. 695-701, doi: 10.1109/CIMCA.2005.1631345. +
17. A.B. Seyedali Mirjalili, A. Lewis. The Whale Optimization Algorithm. *Advances in Engineering Software*. Vol. 95, May 2016, p. 51-67, <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2016.01.008> +
 18. H. Zhou, X. Zeng and Y. Hong, "Adaptive Exact Penalty Design for Constrained Distributed Optimization," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 64, no. 11, pp. 4661-4667, Nov. 2019, doi: 10.1109/TAC.2019.2902612.
 19. K. Singh, M.S. Patterh, M.S. Bhamrah. A Comparative Analysis of Dual-Order Bidirectional Pumping Schemes in Optical Fiber Raman Amplification. *Journal of Optical Communications*, 2019, 40(1): 1-6. <https://doi.org/10.1515/joc-2017-0018>
 20. W. Zhang, X. Feng, J. Peng and X. Liu, "A simple algorithm for gain spectrum adjustment of backward-pumped distributed fiber Raman amplifiers," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 16, no. 1, pp. 69-71, Jan. 2004, doi: 10.1109/LPT.2003.818915 .
 21. M. Achtenhagen, T.G. Chang, B. Nyman, *et al.* "Analysis of a multiple-pump Raman amplifier", *Appl. Phys. Lett.* – 2001. – Vol. 78. – P. 1322–1324. <https://doi.org/10.1063/1.1352665>
 22. M. Yan, J. Chen, W. Jiang, J. Li, J. Chen and X. Li, "Automatic design scheme for optical-fiber Raman amplifiers backward-pumped with multiple laser diode pumps," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 13, no. 9, pp. 948-950, Sept. 2001, doi: 10.1109/68.942656.
 23. P. Xiao, Q. Zeng, J. Huang and J. Liu, "A new optimal algorithm for multipump sources of distributed fiber Raman amplifier," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 15, no. 2, pp. 206-208, Feb. 2003, doi: 10.1109/LPT.2002.806086 .
 24. X. Zhou, C. Lu, P. Shum and T. H. Cheng, "A simplified model and optimal design of a multiwavelength backward-pumped fiber Raman amplifier," in *IEEE*

- Photonics Technology Letters*, vol. 13, no. 9, pp. 945-947, Sept. 2001, doi: 10.1109/68.942655
25. I.V. Serdeha, V.I. Grygoruk, G.S. Felinskyi. Spectroscopic features of Raman gain profiles in single-mode fibers based on silica glass // *Ukr. J. Phys.* 2018. Vol. 63, No. 8, p. 683-700.
 26. G. S. Felinskyi, V. I. Grygoruk, and I. V. Serdeha, "Modelling of gain profiles and Raman lasing in TiO₂/GeO₂-doped silica fibres," *Ukr. J. Phys. Opt.*, vol. 21, no. 1, pp. 15–25, 2020, doi: 10.3116/16091833/21/1/15/2020.
 27. G. S. Felinskyi, V. I. Grygoruk, I. V. Serdeha, O. O. Drobakhin and M. V. Andreev, "Gaussian and Rational Approximation of Raman Gain Profile in TiO₂ Doped Silica Fiber," 2021 IEEE 26th International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED), 2021, pp. 130-133, doi: 10.1109/DIPED53165.2021.9552290
 28. Ya. V. Krutin, O. V. Korchak, M. I. Reznikov, and G. S. Felinskyi "Simulation of Raman amplifier using TrueWave RS active fiber with uniform bandwidth in C+L telecommunication windows", *Radioelectronics and Communications Systems*, 2021, Vol. 64, No. 12, pp. 619–632, ISSN0735-2727, DOI: 10.3103/S0735272721120013
 29. M. V. Petrychuk, V. I. Grygoruk, S. P. Pavlyuk, I. V. Serdeha, G. S. Felinskyi «Interaction of physical fields with nanostructured materials», Chapter 2 «Light amplification based on stimulated Raman effect and spectroscopic modeling of Raman gain in single mode fiber». *Schriften des Forschungszentrums Julich*, 2020, vol.211, p.47-110. ISBN 978-3-95806-450-8.
 30. A.A. Kononenko, G.B. Zhirov, G.S. Felinskyi, O.I. Tytova Dynamics of distributed Raman gain in telecommunication True Wave^{RS} and G.652 fibers // тези Proc. XXIII Int. Young Scientists' Conf. on Applied Physics, ICAP 2023, May, 16-20, 2023, Kyiv, Ukraine, p. 141-142.
 31. M. Reznikov, G. Felinskyi, and A.V. Korchak. Effect of amplified spontaneous emission on fiber span in backward pumped Raman amplifier / 2019 IEEE 8th Int.

- Conf. on Advanced Optoelectronics and Lasers, CAOL*2019, September 6-8, Sozopol, Bulgaria, p. 259-262. DOI: 10.1109/CAOL46282.2019.9019507
32. В.І. Григорук, П.А. Коротков, Г.С. Фелінський. Нелінійні та лазерні процеси в оптичних волокнах. – К.: ВПЦ „Київський університет”, 2008. –576с.
 33. А.А. Kononenko, G.S. Felinskyi, M.I Reznikov, S.G. Felinskyi, Spectral and spatial distribution of fiber raman amplification in telecommunication fibers based on silica glass // Proc. VIII All-Ukrainian Scientific and Practical Conference "Prospective directions of modern electronics, information and of computer systems", MEICS-2023, November 22-24, 2023, Dnipro, Ukraine, p. 166-167.
 34. А.А. Kononenko, G.S. Felinskyi, M.I Reznikov, S.G. Felinskyi, V. I. Grygoruk, Advantages of Weak Signal Model for Analysis of Frequency-to-Spatial Dynamics in Distributed Fiber Raman Amplifiers // Proc. 2024 IEEE 42nd International Conference On Electronics And Nanotechnology (ELNANO), May 13-16, 2024, Kyiv, Ukraine, p.602-607.
 35. А. А. Кононенко, О.В. Корчак, Г.Б. Жиров, М.І. Резніков, Г.С. Фелінський, Моделювання розподіленого нелінійно-оптичного підсилення у телекомунікаційних волокнах True Wave^{RS} та G.652 // Proc. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. К.: ВІКНУ, 2023. № 80. С. 59-71