

## МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛЕНОГО НЕЛІНІЙНО-ОПТИЧНОГО ПІДСИЛЕННЯ У ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ВОЛОКНАХ TRUEWAVE<sup>RS</sup> ТА G.652

*Загальноприйнятими методами моделювання нелінійно-оптичного підсилювача, а саме на основі ефекту вимушеного комбінаційного розсіяння (ВКР), що в англійській літературі має назву Raman effect, незважаючи на простоту його технічної реалізації, є доволі ускладненими і громіздкими через необхідність теоретичного описання нелінійної взаємодії багатьох світлових хвиль накачки та сигналів за допомогою відповідних систем диференціальних рівнянь високого порядку. Принципові обмеження таких методик полягають не тільки у кількості рівнянь, а й у наявності особливих точок у кожному рівнянні динаміки хвиль сигналів (такі точки відповідають пороговим значенням потужності помпування). За цих умов нестійкість розв'язків диференціальних рівнянь та їхня неоднозначність мають іноді руйнівний вплив на результати моделювання. Альтернативна методика моделювання з використанням наближення заданої накачки потребує окремих досліджень своєї практичної застосовності до аналізу динаміки розподіленого оптичного підсилення в телекомунікаційних волокнах.*

*Тому має місце задача визначення критерію застосовності наближення заданої накачки для розробки спрощеної моделі нелінійного оптичного підсилення сигналів в умовах їхнього розповсюдження вздовж стандартних кварцових волокон. Серед незаперечних переваг аналітичних розв'язків, які отримано на основі спрощеної моделі, є усунення зазначених обмежень методики розв'язку систем багатьох диференціальних рівнянь*

*Стаття присвячена моделюванню динаміки розподіленого оптичного підсилення на основі ефекту вимушеного комбінаційного розсіяння (ВКР) залежно від довжини стандартного одномодового волокна (ОМВ) та потужності помпування. В обґрунтуванні методики моделювання, яка пропонується, показано відповідність параметрів активних волокон та схем підсилювачів на основі ефекту вимушеного комбінаційного розсіяння (далі за текстом – ВКР підсилювачів) критерію застосовності наближення заданої накачки.*

*У роботі наведено аналітичний вираз критерію застосовності наближення заданої накачки у вигляді верхньої межі потужності сигналу, який не може перевищувати підсилений сигнал. Представлені результати порівняльного аналізу параметрів розподіленого ВКР підсилення залежно від довжини таких активних волокон як G.652 та TrueWave<sup>RS</sup>.*

*Ключові слова: ВКР підсилювач, підсилення оптичних сигналів, потужність накачки, потужність помпування, телекомунікаційні системи*

**Вступ.** Застосування високих технологій, серед яких виділяються пристрої нелінійної фотоніки – оптичні підсилювачі та лазери, що побудовані на основі ефекту вимушеного комбінаційного розсіяння [1 - 5], забезпечує рекордні швидкості інформаційного обміну [6 - 8] в оптоволоконних телекомунікаційних системах. Широке застосування ВКР фотоніки в сучасних телекомунікаціях обумовлене простотою технічної реалізації пристроїв нелінійного підсилення світла [2 - 4] і лежить в основі єдиної технології, що здатна до освоєння повного вікна прозорості кварцового волокна із шириною смуги ~60 ТГц [3-5,9]. Однак, згідно із останньою редакцією стандарту ІТУ-Т G.652 [10], у цьому документі ще відсутні дані про нелінійні властивості транспортних телекомунікаційних волокон, оскільки вони залишаються предметом інтенсивних світових досліджень, що саме по собі є свідченням актуальності вивчення фізичних принципів та фундаментальних особливостей розробки фотонних пристроїв. Зокрема, проблема оптимізації ефективності та робочої смуги ВКР підсилювачів, зважаючи на досить значний потік наукових публікацій [11 - 22] 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 до сучасних і перспективних потреб.

З метою моделювання параметрів волоконних ВКР підсилювачів раніше [25 - 29] була розроблена і апробована методика аналітичної апроксимації профілів ВКР підсилення складного континуального типу. Проте дослідження динаміки розподіленого комбінаційного підсилення залишається недостатньо вивченою навіть у типових телекомунікаційних волокнах [30 - 31]. У роботі, що пропонується, досліджено основні характеристики ВКР підсилення у волокні типу TrueWave<sup>RS</sup> порівняно з такими ж характеристиками ВКР підсилення у стандартному кварцовому волокні G.652 і надано результати моделювання.

**Постановка задачі.** Провести моделювання динаміки розподіленого ВКР підсилення в залежності від довжини активного волокна ми проводимо за допомогою спрощеної моделі та з використанням реальних параметрів стандартних ОМВ.

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.

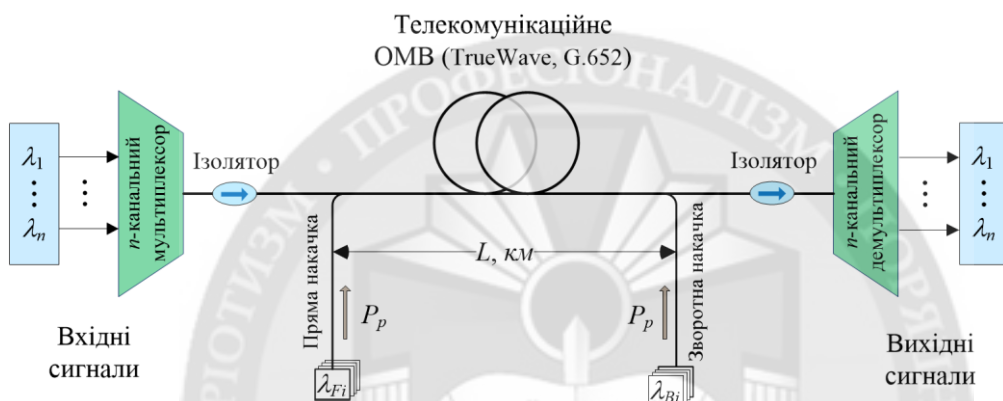


Рисунок 1 - Узагальнена схема багатоканальної оптоволоконної системи з розділенням за довжинами хвилі, в якій застосовуються розподілені ВКР підсилювачі із двосторонньою накачкою.

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 сигнала, 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  $L$ ,  $[\text{км}^{-1}]$  з використанням однієї несучої оптичної частоти  $\omega_s$ , що знаходиться у вікні прозорості волокон на основі кварцового скла (С-вікно,  $\lambda_s = 1,55 \text{ мкм}$ ). Для ВКР підсилення такого сигнала у процесі його розповсюдження вздовж одномодового кварцового волокна досить використати монохроматичне джерело помпування на довжині хвилі  $\lambda_p = 1,425 \text{ мкм}$ . 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  $\omega_s$ ) та хвилі накачки  $\omega_p$ .

**Метою статті** є 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.

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<sup>RS</sup>).

Незабаром з'ясувалось, що для будь-якого ОМВ нелінійний коефіцієнт ВКР підсилення  $g_R$ ,  $[(Вт \cdot км)^{-1}]$  відмінний від нуля, однак він має досить складну залежність від частоти стоксового зсуву  $\Omega$  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  $\Omega$ , 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  $600 \text{ см}^{-1}$  ( $=18 \text{ ТГц}$ ). Ширина профілів на рівні від половини максимуму, яка визначає відповідну робочу смугу ВКР підсилення, складає приблизно  $4 \text{ ТГц}$ . 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.

**Теоретичні основи моделювання.** У найпростішому випадку нелінійного ВКР підсилення однієї стоксової хвилі з потужністю  $P_s$  за рахунок високоінтенсивної хвилі накачування з потужністю  $P_p$  динаміка зміни обох потужностей у процесі їх спільного

розповсюдження в одному напрямку, а саме вздовж  $z$  – координати ( $z \in [0, L]$ ) оптичного волокна, описується системою зв'язаних диференціальних рівнянь [32]:

$$\begin{cases} \frac{dP_s}{dz} = g_R P_p P_s - \alpha_s P_s & (a), \\ \frac{dP_p}{dz} = -\frac{\omega_p}{\omega_s} g_R P_p P_s - \alpha_p P_p & (b), \end{cases} \quad (1)$$

де  $\alpha_s, \alpha_p$ ,  $[км^{-1}]$  – коефіцієнти поглинання світла відповідно на стоксовій частоті  $\omega_s$  і частоті накачування  $\omega_p$ . Формальний зв'язок рівнянь між собою забезпечує нелінійний

коефіцієнт ВКР підсилення  $g_R$ ,  $[(\text{Вт} \cdot \text{км})^{-1}]$ , частотний спектр якого відповідає профілю ВКР підсилення  $g_R = g_R(\Omega)$ .

Зазначимо, що в загальному випадку аналітичні розв'язки навіть найпростішої системи (1) зараз не відомі і це суттєво ускладнює моделювання практичних ВКР підсилювачів для багатоканальних оптоволоконних систем, що показані на рис.1. Розрахунки багатократно ускладнюються у випадку моделювання реальних систем, в яких зараз можуть міститися кількасот стоксових хвиль (по числу каналів) та близько десятка довжин хвилі помпування, а їх сума буде визначати кількість зв'язаних диференціальних рівнянь, які підлягають числовим розв'язкам.

Однак, головна проблема моделювання полягає не у застосуванні більш ефективних алгоритмів розв'язку складних систем диференціальних 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 диференціальних 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 диференціальних рівнянь, що опубліковані за останні два десятиліття [4,5,11], проблема залишається ще дуже далекою від свого остаточного вирішення.

Альтернативно, в даній роботі використовувалась модель заданої накачки, фундаментальні основи якої ми ілюструємо за допомогою наближеного розв'язку базової системи рівнянь (1). Наближення, як відомо [32], полягає у тому, що розгляд обмежується випадком, коли першим членом у правій частині рівняння (1b) можна знехтувати, тобто при:

$$\frac{\omega_p}{\omega_s} g_R P_s \ll \alpha_p \quad (2)$$

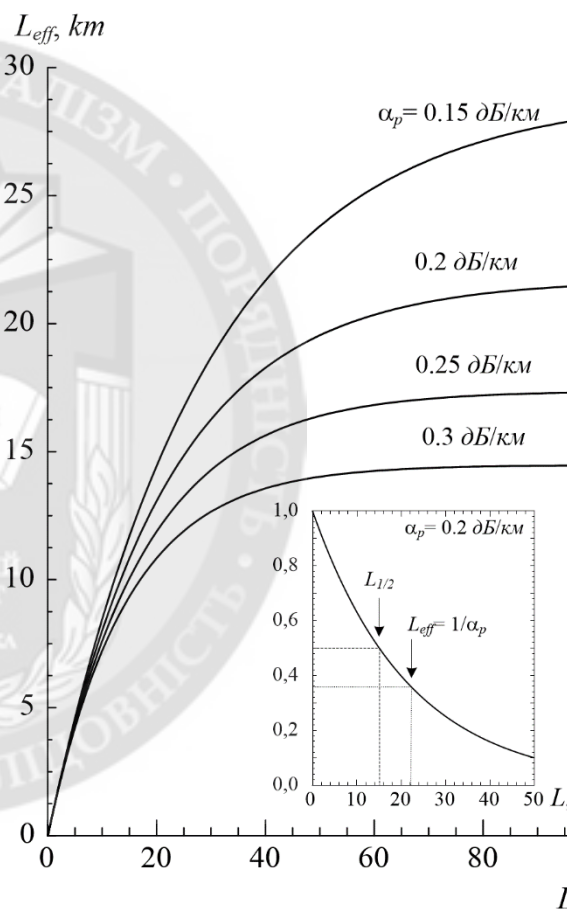


Рисунок - 3 Ефективна довжина взаємодії стоксової хвилі та накачки вздовж волокна довжиною  $L$ . На вставці показано співвідношення між характеристичними довжинами загасання  $L_{1/2}$  та  $L_{eff}$  без ВКР підсилення

виснаження потужності накачування шляхом прямого її використання тільки на підсилення сигналу стає зневажливо малим у порівнянні із власним загасанням  $\alpha_p$  для поточного значення потужності  $P_p$ . Без першого доданку у правій частині рівняння (1b) спрощене рівняння вже не зв'язане із рівнянням (1a). В результаті рівняння (1b) стає еквівалентним випадку вільного розповсюдження накачки у дисипативному середовищі із загасанням  $\alpha_p$ , тобто накачка залишається заданою і не залежною від наявності нелінійної взаємодії. Розв'язок спрощеного рівняння є добре відомим і має вигляд:  $P_p(z) = P_0 e^{-\alpha_p z}$ , де  $P_0 = P_p(z=0)$ ,  $[Bm]$  - початкове значення потужності помпування у точці введення його до волокна. Підставляючи цей розв'язок у рівняння (1a), одержуємо шукане рівняння динаміки зміни потужності сигналу вздовж довжини волокна  $L$ :

$$P_s(L) = P_s(0) \exp(g_R P_0 L_{eff} - \alpha_s L), \quad (3)$$

де  $L_{eff} = [1 - \exp(-\alpha_p L)] / \alpha_p$  - ефективна довжина взаємодії стоксової хвилі та накачки, [км], яка на початку волокна (при  $\alpha_p L \ll 1$ ) дорівнює його фактичній довжині  $L_{eff} \cong L$  (рис.3), але не перевищує асимптотичного значення  $L_{eff} = 1/\alpha_p$  при  $L \rightarrow \infty$ . Отже, при великих  $L \rightarrow \infty$  значення  $L_{eff}$  співпадає із довжиною, на якій потужність помпування зменшується в  $e$  разів. Тоді довжина  $L_{1/2}$ , на якій потужність накачки зменшується у 2 рази дорівнює  $L_{1/2} = \ln(2) L_{eff} = 0,69 L_{eff}$ . Співвідношення між характеристичними довжинами загасання  $L_{1/2}$  та  $L_{eff}$  без ВКР підсилення ми показуємо на вставці рис.3. Слід зазначити, що в (3)  $P_s(0)$  та  $P_s(L)$  - це відповідні потужності сигналу на вході (при  $z = 0$ ) та підсиленого на довжині  $L$  вихідного (при  $z = L$ ) сигналу. Тоді, з урахуванням виразу (3), безрозмірний коефіцієнт підсилення стоксової хвилі  $G_{on/off}(L) = P_s(L)/P_s(0)$  можна представити в аналітичному вигляді, як:

$$G_{on/off}(L) = \exp\left\{\frac{g_R}{\alpha_p} P_0 [1 - \exp(-\alpha_p L)] - \alpha_s L\right\}, \quad (4)$$

що в межах зроблених наближень (застосовність яких ми аналізуємо нижче) дозволяє отримати досить точні результати при моделюванні процесів нелінійного оптичного підсилення шляхом вимушеного комбінаційного розсіяння в поширених одномодових волокнах, таких як TrueWave<sup>RS</sup> та кварцове волокно G.652.

В логарифмічному масштабі вираз (4) для підсилення  $G_{on/off}$  в [dB] прийме вигляд:

$$G_{on/off}[dB] = 4,343 \cdot \left\{ \frac{g_R}{\alpha_p} P_0 [1 - \exp(-\alpha_p L)] - \alpha_s L \right\}, \quad (5)$$

де числовий коефіцієнт - це  $10 \log_{10} e = 4,343$ . Аналітичні вирази (4) і (5) покладені в основу нашої спрощеної моделі для описання динаміки ВКР підсилення залежно від довжини волокна  $L$ . Моделювання враховує наявність оптичних втрат електромагнітного випромінювання у реальних волокнах як для накачки з коефіцієнтом загасання  $\alpha_p$ , так і для сигналу із коефіцієнтом загасання  $\alpha_s$ , а потужність накачки  $P_0$  на вході до активного волокна є параметром моделі, що дозволяє налаштовувати величину  $G_{on/off}$  підсилення у реальному пристрої.

**Параметри моделювання.** Числові параметри волокон, для яких проводилось моделювання зведено до Табл. 1.

Таблиця 1.

Параметри волокон, що були використані для моделювання динаміки розподіленого ВКР підсилення монохроматичного сигналу з  $\lambda_s = 1,55$  мкм при помпуванні на довжині хвилі  $\lambda_p = 1,425$  мкм.

Параметр	Тип волокна	
	G.652	TrueWave <sup>RS</sup>
<i>l</i>	2	3
1. Вхідна потужність сигналу, $P_p$ , мВт	1	1
$\delta Бм$	0	0
2. Частота сигналу, $\omega_s$ , ТГц	193,5	193,5
3. Загасання сигналу, $\alpha_s$ , дБ/км	0,2	0,2
$км^{-1}$	0,046	0,046
4. Частота накачки, $\omega_p$ , ТГц	210,5	210,5
5. Загасання накачки, $\alpha_p$ , дБ/км	0,25	0,3
$км^{-1}$	0,058	0,069
6. Довжина вільного загасання накачки, $L_{eff}$ , км	17,4	14,5
$L_{1/2}$ , км	12,0	10,0
7. Максимум профілю ВКР підсилення, $g_{Rmax}$ , (Вт·км) <sup>-1</sup>	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	132,3	85,8
$\delta Бм$	21,2	19,3

**Критерій застосовності моделі.** Однак, при цілком очевидних перевагах аналітичного моделювання, що проявляються, зокрема, при порівняльному аналізі різних волокон в якості активного середовища нелінійного оптичного підсилювача, слід враховувати обмеження, тобто виконання нерівності (2), яка має сенс критерію застосовності самої моделі. Якщо ввести значення критичної потужності сигналу  $P_s^{cr}$ :

$$P_s^{cr} = \frac{\omega_s}{\omega_p} \frac{\alpha_p}{g_{Rmax}}, \quad (6)$$

то нерівність

$$P_s \leq P_s^{cr} \quad (7)$$

можна розглядати як критерій застосовності аналітичної моделі. За своїм фізичним змістом потужність стоксової хвилі  $P_s^{cr}$ , згідно з (2) та (6), відповідає граничному значенню сигналу у підсилювачі, починаючи від якого підсилення сигналу набуває домінуючого характеру, оскільки відбір потужності сигналом [ліва частина (2)] починає перевищувати дисипативні втрати у волокні із сталою загасання  $\alpha_p$ . Якщо зростання  $P_s$  приводить до обернення знаку нерівності (7), тобто при  $P_s \gg P_s^{cr}$ , то настає режим генерації, за якого в результаті конкуренції мод практично вся потужність помпування перетікає лише у вузький діапазон частот на максимумі профілю ВКР підсилення. Оскільки генерація в середині смуги частот будь-якого підсилювача (самозбудження) є вкрай небажаним режимом роботи, то можна сподіватись, що для забезпечення робочих режимів ширококугових ВКР підсилювачів значення  $P_s$  і в загальному випадку (див. рис.1) повинно задовольняти нерівності типу (7).

Введену критичну потужність сигналу  $P_s^{cr}$  слід віднести до характеристикних параметрів волокна, яке буде використовуватись в якості активного середовища для нелінійного оптичного підсилення сигналу. Дійсно, оскільки  $\omega_s/\omega_p \cong 1$ , тобто майже не залежить від параметрів та схеми помпування, то числове значення  $P_s^{cr}$  на практиці є індивідуальним для кожного волокна. Воно визначається відношенням лінійного параметра

загасання  $\alpha_p$  до нелінійного коефіцієнта ВКР підсилення  $g_{R_{max}}$ , де  $g_{R_{max}}$  - максимум на профілі ВКР підсилення  $g_R = g_R(\Omega)$ . Згідно до співвідношень (2) та (6) виконання нерівності (7) при  $g_R = g_{R_{max}}$  гарантовано виконується для всіх інших частот із смуги ВКР підсилення, тобто для всіх  $g_R = g_R(\Omega)$ .

Слід зазначити, що згідно із критерієм (7) порівнянню підлягають значення потужності сигналу  $P_s$  після підсилення на довжині  $L$ , а результати вважаються достовірними тільки за умови виконання цієї нерівності. Характеристичні параметри  $P_s^{cr}$  для досліджуваних волокон визначаються на попередньому етапі моделювання з урахуванням відповідних констант загасання  $\alpha_p$  на довжині хвилі помпування. Числові значення цих параметрів наведено у Таблиці 1 для зручності перевірки виконання критерію (7) щодо підтвердження застосовності запропонованої моделі до кожного волокна. Зокрема, тверде виконання нерівності (7) в умовах нашого моделювання, коли потужність  $P_s$  виявляється практично на 2 порядки меншою за  $P_s^{cr}$  в обох волокнах, є незаперечним фактором на користь правомірності застосування наближеної моделі із гарантією достатньої точності представлених числових обчислень.

**Результати моделювання та їх обговорення.** Моделювання проводилось за схемою розподіленого підсилення із прямою накачкою, коли сигнал з  $\lambda_s = 1,55$  мкм та потужністю  $P_s = 1$  мВт розповсюджувався вздовж волокна разом із хвилею помпування з  $\lambda_p = 1,425$  мкм значно більшої потужності. Обидві хвилі розповсюджувались в одному напрямі, а потужність накачки могла збільшуватись, починаючи від  $P_p = 100$  мВт. Вхідні дані, що використані для нашого моделювання динаміки розподіленого ВКР підсилення, зведено до таблиці 1, які з метою порівняльного аналізу представлені для двох модельних волокон, а саме для волокон типу TrueWave<sup>RS</sup> та чистого кварцового волокна стандарту G.652.

На попередньому етапі ми провели оцінку допустимого рівня збільшення підсилення в межах застосовності нашої аналітичної моделі. У результаті, згідно із (7), модель заданої накачки, при розрахунку параметрів схеми із прямою накачкою на основі (4) та (5), є придатною для моделювання, якщо коефіцієнт підсилення  $G_{on/off}$  сигналу потужністю 1 мВт не перевищує  $\sim 120$  (21 дБ) у стандартному волокні G.652, а для волокна типу TrueWave<sup>RS</sup> - не перевищує  $\sim 70$  (18 дБ). Зазначимо також, що для накачки потужністю  $P_p = 100$  мВт поріг ВКР підсилення досягається тільки у волокні типу TrueWave<sup>RS</sup> ( $P_{th} = 62$  мВт), але не досягається у волокні G.652, оскільки  $P_p < P_{th} = 109$  мВт і тоді  $G_{on/off} < 1$  по всій довжині волокна, тобто нелінійність ефекту ВКР у допороговому режимі накачки приводить не до підсилення сигналу, а лише до зменшення його загасання у процесі розповсюдження вздовж волокна.

Результати моделювання динаміки розподіленого ВКР підсилення у волокнах типу TrueWave<sup>RS</sup> та G.652 при розповсюдженні сигналу вздовж довжини  $L$  волокна для різних значень потужності накачування ілюструє рис. 4. Відповідні залежності коефіцієнтів  $G_{on/off}(L)$  оптичного підсилення від довжини волокна лінії зв'язку зображено на рис. 4 для трьох значень  $P_0 = 100; 200$  та  $300$  мВт: (a) – за лінійною шкалою, (b) – за логарифмічною шкалою, [у дБ].

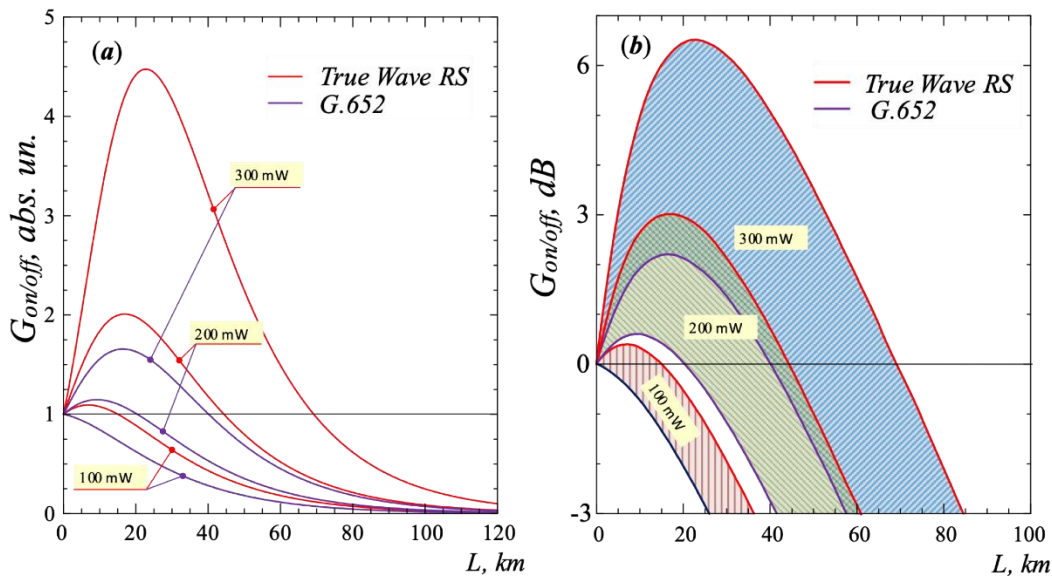


Рисунок - 4. Залежність розподіленого ВКР підсилення від довжини розповсюдження сигналу для трьох потужностей помпування, які генерує єдине джерело на  $\lambda_p = 1425$  нм в ОМВ стандарту G.652 та волокні типу TrueWave<sup>RS</sup>: (a) – за лінійною шкалою, (b) – за логарифмічною шкалою

За виключенням допорогового режиму накачки при  $P_0 = 100$  мВт у волокні G.652, альтернативно в обох волокнах накачка утворює області підсилення (рис.4), які залежно від потужності помпування займають довжину волокна  $L_0$ , яку ми називаємо *довжиною повної прозорості* волокна. Дійсно, оскільки  $G_{on/off}(L_0) = G_{on/off}(0) = 1$ , то сигнал після проходження довжини  $L_0$  буде мати свою початкову потужність, а ділянка транспортного волокна довжиною  $L_0$  буде виглядати абсолютно прозорою, без загасання сигналу. Реально повну прозорість волокна забезпечує ВКР підсилення, причому для повної компенсації власних втрат волокна потужності накачки вистачає тільки на довжині  $L_0$ . Потім при  $L > L_0$  вплив помпування досить швидко зникає, а розповсюдження сигналу мало відрізняється від вільного поширення вздовж волокна без ВКР підсилення. Про це свідчить рис.4б, на якому логарифмічна залежність  $G_{on/off}(L)$  має вигляд паралельних прямих в області  $L > L_0$ . Прямолінійний хід кривої  $G_{on/off}(L)$  на логарифмічній шкалі відповідає звичайному експоненціальному закону загасання сигналу у волокні, а паралельність всіх прямих при  $L > L_0$  свідчить про рівність всіх коефіцієнтів у показнику експоненти. Отже, на великій довжині від джерела помпування сталі загасання сигналу повертаються до своїх значень, які були без ВКР підсилення.

Динаміка компенсації власних втрат на довжині повної прозорості, як бачимо на рис.4, має нерівномірний характер із яскраво вираженим максимумом, що розташований на довжині волокна, яку ми позначаємо  $L_{max}$ . Значення  $L_{max}$ , як і характеристична довжина  $L_{1/2}$ , що відмічає точку половинного загасання сигналу після підсилювача, залежать від потужності помпування та параметрів активного волокна. В результаті моделювання ми отримали числові дані для цих характеристичних довжин волокна, які разом із коефіцієнтами підсилення  $G_{max}$  наведені у Таблиці 2.

Розподілене ВКР підсилення в обох типах волокон, як свідчать дані нашого моделювання із таблиці 2, дозволяють розширити область повної прозорості волокон на понад 150 км, якщо підсилювач використовується у режимі підсилення потужності вхідних сигналів, яка дорівнює 1 мВт. За майже однакових максимально досяжних значеннях  $L_0$  в обох волокнах, волокно TrueWave<sup>RS</sup> типу майже вдвічі більш ефективно дозволяє використати потужність помпування, ніж ОМВ стандарту G.652. Однак існує суттєва різниця критичних потужностей, а саме  $P_s^{cr} = 86$  мВт для TrueWave<sup>RS</sup> та  $P_s^{cr} = 132$  мВт для ОМВ G.652, перевищення яких вкрай не бажано для підтримання робочих режимів ВКР підсилення.

Таблиця 2.

Динаміка *on/off* коефіцієнтів ВКР підсилення в залежності від зміни потужності помпування та характеристичні відстані максимального підсилення сигналу  $L_{max}$ , повної прозорості  $L_0$  і половинного загасання потужності сигналу  $L_{1/2}$  у волокні *TrueWave RS* порівняно із такими ж даними для *стандартного волокна G.652*.

$P_0$ , <i>mW</i>	<i>True Wave RS</i> волокно $\alpha_p = 0,3$ дБ/км; $\alpha_s = 0,2$ дБ/км					<i>OMB стандарту G.652</i> $\alpha_p = 0,25$ дБ/км; $\alpha_s = 0,2$ дБ/км				
	$G_{max}$	$G_{max}$ , <i>dB</i>	$L_{max}$ , <i>km</i>	$L_0$ , <i>km</i>	$L_{1/2}$ , <i>km</i>	$G_{max}$	$G_{max}$ , <i>dB</i>	$L_{max}$ , <i>km</i>	$L_0$ , <i>km</i>	$L_{1/2}$ , <i>km</i>
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>
100	1,1	0,4	7	15	36,5	1	0	-	-	27
200	2	3	17	44,5	61	1,16	0,6	9,5	21,5	42,5
300	4,5	6,5	23	69	84,5	1,68	2,2	16,5	41	59
500	27,1	14,3	30	116,5	131,5	4,48	6,5	25,5	74,5	90
600	70,1	18,5	33	139,5	154,5	7,76	8,9	28,5	90	105,5
700	184,7	22,7	35	163	178	13,7	11,4	31,5	105,5	120,5
1000	$P_s > P_s^{cr} = 86$ мВт – модель не застосовна					83	19,2	37,5	151	166
1100	$P_s^{cr} = 86$ мВт досягають при $P_0 = 614$ мВт					154,2	21,9	39	166	181
						$P_s > P_s^{cr} = 132$ мВт – модель не застосовна $P_s^{cr} = 132$ мВт досягають при $P_0 = 1075$ мВт				

Примітка: Використано розрахункові параметри:  $\lambda_p = 1425$  нм,  $\lambda_s = 1550$  нм

Загалом дані Табл. 2 підтверджують застосовність нашої моделі для опису динаміки розподіленого ВКР підсилення у досить широкому діапазоні зміни потужностей помпування в обох типах волокон. Зазначимо, що розглянутий випадок підсилення потужності сигналу на вході лінії передачі є найбільш складним для моделювання, оскільки обмеження моделі полягають у не перевищенні критичної потужності  $P_s^{cr}$  сигналу. Тому умови застосовності моделі, очевидно, більш строго виконуються при зустрічному помпуванні сигналу з боку фотоприймача, коли підсилюються сигнали значно послаблені у процесі їх розповсюдження.

**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<sup>RS</sup>* 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.

Вперше проаналізовано придатність наближення заданої накачки із теорії ВКР взаємодії в умовах практичної реалізації нелінійного підсилення оптичного сигналу в системах далекого зв'язку. Шляхом ведення 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<sup>RS</sup>* у порівнянні зі стандартним *OMB* із чистого кварцового скла, але при суттєво більших обмеженнях на максимальну потужність помпування.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Sirleto L. Ferrara M.A. Fiber amplifiers and fiber lasers based on stimulated Raman scattering: A Review. *Micromachines*, 2020, 11(3), 247; <https://doi.org/10.3390/mi11030247>.
2. Коротков П.А., Фелінський. Г. С., Волоконні ВКР лазери неперервної дії // УФЖ. Огляди. – 2007. – Т.4, № 1. – С. 36-60.

3. Islam M.N. Raman amplifiers for telecommunications // *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.* – 2002. – Vol. 8, N 3. – P. 548-559.
4. Коротков П.А., Фелінський Г.С. ВКР підсилення світла в одномодових кварцових волокнах // *УФЖ. Огляди.* – 2009. – т.6, № 2. – С. 103-169.
5. Григорук В. І., Сердега І. В., Фелінський Г. С., Коротков П. А. 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. Puttnam B. J., Luis R. S., Rademacher G., Awaji Y., Furukawa H. 1 Pb/s Transmission in a 125 $\mu$ 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. Puttnam B. J., Luis R. S., Rademacher G., Awaji Y., Furukawa H., 319 Tb/s Transmission over 3001 km with S, C and L band signals over >120nm bandwidth in 125  $\mu$ m wide 4-core fiber," *2021 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), San Francisco, CA, USA, 2021*, pp. 1-3.
8. Takara H., Mizuno T., Kawakami H., Miyamoto Y., Masuda H., Kitamura K., Ono H., Asakawa S., Amma Y., Hirakawa K., Matsuo S., Tsujikawa K., Yamada M. 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<sup>RS</sup> 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).
11. Yao J., Deng H. 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. Jiang H.M., Xie K., Wang Y.F. 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. Liu T., Liu L., Chen J., Jiang H., Sun Q., Xi Y. 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. Jiang H.M., Xie K., 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. Chen J., Jiang H. 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. Tizhoosh H. R. 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. Seyedali Mirjalili A.B., Lewis A. 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. Zhou H., Zeng X., Hong Y. 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. Singh K., Patterh M.S., Bhamrah M.S. 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. Zhang W., Feng X, Peng J., Liu X. 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. Achtenhagen M., Chang T.G., Nyman B. Analysis of a multiple-pump Raman amplifier, *Appl. Phys. Lett.* – 2001. – Vol. 78. – P. 1322–1324. <https://doi.org/10.1063/1.1352665>

22. Yan M., Chen J., Jiang W., Li J., Chen J., Li X. 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. Xiao P., Zeng Q., Huang J., Liu J. A new optimal algorithm for multipump sources of distributed fiber Raman amplifier, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 15, no. 2, pp. 206-208, Feb. 2003, doi: 10.1109/LPT.2002.806086.
24. Zhou X., Lu C., Shum P., Cheng T. H. A simplified model and optimal design of a multiwavelength backward-pumped fiber Raman amplifier, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 13, no. 9, pp. 945-947, Sept. 2001, doi: 10.1109/68.942655.
25. Serdeha I.V., Grygoruk V.I., Felinskyi G.S. 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. Felinskyi G. S., Grygoruk V. I., Serdeha I. V. Modelling of gain profiles and Raman lasing in TiO<sub>2</sub>/GeO<sub>2</sub>-doped silica fibres,” *Ukr. J. Phys. Opt.*, vol. 21, no. 1, pp. 15–25, 2020, doi: 10.3116/16091833/21/1/15/2020.
27. Felinskyi G. S., Grygoruk V. I., Serdeha I. V., Drobakhin O. O., Andreev M. V. Gaussian and Rational Approximation of Raman Gain Profile in TiO<sub>2</sub> 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. Krutin Ya. V., Korchak O. V., Reznikov M. I., Felinskyi G. S. 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, ISSN 0735-2727, DOI: 10.3103/S0735272721120013
29. Petrychuk M. V., Grygoruk V. I., Pavlyuk S. P., Serdeha I. V., Felinskyi G. S. 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. Kononenko A.A., Zhirov G.B., Felinskyi G.S., Tytova O.I. Dynamics of distributed Raman gain in telecommunication True Wave<sup>RS</sup> and G.652 fibers // *Proc. XXIII Int. Young Scientists' Conf. on Applied Physics, ICAP 2023*, May, 16-20, 2023, Kyiv, Ukraine, p. 141-142.
31. Reznikov M., Felinskyi G., Korchak A.V. 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. Григорук В.І., Коротков П.А., Фелінський Г.С. Нелінійні та лазерні процеси в оптичних волокнах. – К.: ВПЦ „Київський університет”, 2008. –576с.

#### REFERENCES:

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. P.A. Korotkov, G.S. Felinskyi. Continuous-Wave Fiber Raman Lasers // *Ukrainian Journal of Physics. Reviews.* – 2007. – Vol. 4, No. 1. – P. 36-60.
- 3.N. Islam. Raman amplifiers for telecommunications // *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.* – 2002. – Vol. 8, N 3. – P. 548-559.
4. P. A. Korotkov and G. S. Felinskyi, “Forced-Raman-scattering-based amplification of light in one-mode quartz fibers,” *Ukr. J. Physics. Rev.* 6, No. 2, 103-169 (2009).
5. V. I. Grygoruk, I. V. Serdeha, G. S. Felinskyi, P. A. Korotkov, "Fiber Raman Lasers and Amplifiers of Optical Radiation," Chapter 2 in the monograph "Interaction of Physical Fields with Nanostructured Materials." - Kyiv: Karavella, 2018. - 382 p., pp. 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 125µm 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 µm 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. Krutin, Y. V., Korchak, O. V., Reznikov, M. I., Felinsky, G. S. (2022). Simulation of Raman Amplifier Using TrueWave RS Active Fiber with Uniform Bandwidth in C+L Telecommunication Windows Bulletin of Higher Educational Institutions. Radio Electronics, 64(12), 715–730.
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).
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 TiO<sub>2</sub>/GeO<sub>2</sub>-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 TiO<sub>2</sub> 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<sup>RS</sup> 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. V.I. Hryhoruk, P.A. Korotkov, H.S. Felinsky. *Nonlinear and Laser Processes in Optical Fibers*. – Kyiv: Publishing and printing center 'Kyiv University', 2008. – 576 p.

**D.Sci., prof. Felinskyi G.S., Ph.D. Zhyrov G.B., Ph.D. Korchak O.V.,  
Ph.D. Reznikov M.I., Kononenko A.A.**

## **MODELING OF DISTRIBUTED NONLINEAR OPTICAL AMPLIFICATION IN TRUEWAVE AND G.652 TELECOMMUNICATION FIBERS**

*Common techniques for modeling of the nonlinear optical amplifiers, specifically based on the effect Raman effect, despite the simplicity of its technical implementation, are quite complex and cumbersome due to the necessity of theoretically describing the nonlinear interaction of many pump and signal optical waves using the corresponding systems of high-order differential equation. The fundamental limitations of such methodologies lie not only in the number of equations but also in the existence of special points in each equation describing the dynamics of signal waves (these points correspond to threshold values of pump power). Under these conditions, the solutions instabilities of the differential equations and their ambiguity sometimes have a detrimental impact on modeling results. An alternative modeling approach using the specified pump approximation requires particular investigations of its practical applicability to the analysis of distributed optical amplification in telecommunications fibers.*

*Therefore, there is a need to determine the criterion for the applicability of the specified pump approximation for the development of a simplified model of nonlinear optical signal amplification under the conditions of their propagation along standard silica fibers. Among the undeniable advantages of analytical solutions obtained based on the simplified model there is the elimination of the mentioned constraints of solving systems of many differential equations.*

*This article is devoted to modeling the dynamics of distributed Raman amplification, as function the length of standard single-mode optical fiber (SMF) and pump power. In justifying the proposed modeling methodology, it is shown that the parameters of active fibers and fiber Raman amplifier (hereinafter referred to as FRA) schemes correspond to the criterion for the applicability of the specified pump approximation.*

*The paper presents an analytical expression for the criterion of the applicability of the specified pump approximation in the form of an upper limit of the signal power, which cannot exceed the amplified signal. Comparative analysis results of the distributed FRA parameters depending on the length of active fibers, such as G.652 and TrueWave<sup>RS</sup>, are presented.*

**Keywords:** *SRS amplifier, optical signal amplification, pump power, pumping power, telecommunications systems.*