

Микола ОДЕГОВ

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку

<https://orcid.org/0000-0001-5526-2487>[onick\\_64@ukr.net](mailto:onick_64@ukr.net)

Л. БУКАТА, І. БАЛЄЄВ

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку

## ВСТАНОВЛЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ПОШИРЮВАННЯ СПЕКТРІВ ОПТИЧНИХ ІМПУЛЬСІВ МЕТОДАМИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

У прикладному аспекті вирішувана проблема відноситься до завдань збільшення швидкості передачі в магістральних волоконно-оптичних мережах (ВОСП). Оскільки таких систем зараз ще не існує, то поширення сигналів досліджується за допомогою імітаційної моделі. Ця модель заснована на нелінійному диференціальному рівнянні Шредингера та реалізована авторською програмою *Nonlinear*. Встановлення аналітичних форм залежностей між шириною спектру оптичних імпульсів на стороні передачі та прийому здійснюється за допомогою методів штучного інтелекту, які реалізовано авторською програмою *Band Relative*.

**Ключові слова:** волоконно-оптичні системи передач, нелінійні ефекти, спектр, імітаційне моделювання, штучний інтелект, методи структурної ідентифікації.

Nikolay ODEGOV N. A., L. BUKATA, I. BALEEV

State University of Intellectual Technologies and Communication

## ESTABLISHING THE REGULARITIES OF SPECTRUM BROADENING IN OPTICAL PULSES BY METHODS OF SINGLE INTELECTU

In the applied aspect, the problem solved refers to the tasks of increasing the speed of information transmission in trunk fiber-optical networks (FOTS). Since such systems are not yet available, the distribution of signals is studied using an imitation model. This model is based on the nonlinear differential equation of Schrödinger. The problem of the problem is carried out in the author's program *Nonlinear*. As a result of modeling, a significant array of experimental data was obtained. The data was obtained for different types of envelope optical signals and different levels of nonlinear effects. The transfer of information by optical solitons is considered one of the promising areas of improvement of the FOTS. Solitonic effects are achieved in the nonlinear regime of FOTS. In this case, there is either the preservation of the effective duration of optical impulses. At the same time, the effect of expanding the spectrum of these impulses arises. This phenomenon should be taken into account with the synthesis of optimal uneven frequency plans for adaptive sags.

To solve this problem, it is important to minimize the number of measurements in promising SPP. For this, it is necessary to establish patterns of changes in the spectra of optical impulses in the form of analytical dependencies. In this work, this problem is solved by the methods of artificial intelligence. The task of interpolation on sparse channel plans is solved by parametric identification methods. The task of extrapolation to arbitrary frequency plans is solved by structural identification methods.

The work found that the dependences between the initial width of the spectrum of optical impulses and the width of the spectrum on the side of the reception are quite smooth. The problem of interpolation is solved on a lot of sedate polynomes. The solution to the problem of extrapolation on different methods of organizing frequency plans shows that the effective models between the initial and final width of the impulses are optimal are polynomes of the fourth or fifth order.

**Keywords:** fiber optic transmission systems, nonlinear effects, spectrum, computer simulation, artificial intelligence, structural identification methods

### Постановка проблеми та аналіз джерел

Передача інформації оптичними солітонами вважається одним з перспективних напрямків вдосконалення волоконно-оптичних систем передачі (ВОСП) в напрямку підвищення пропускної здатності та дальності [1, 2]. Солітонні та квазісолітонні ефекти досягаються у нелінійному режимі ВОСП. При цьому спостерігається або збереження ефективної тривалості оптичних імпульсів (ОІ), або навіть їх компресія [4-7]. Втім, у багатоканальних ВОСП виникає додаткова проблема: поширення спектрів ОІ, що може призводити до негативних явищ типу між каналної інтерференції. Таке явище треба враховувати при синтезі оптимальних нерівномірних частотних планів адаптивних ВОСП. Взагалі, при даній формі ОІ у часовому просторі частотний план визначається двома векторами параметрів:

$$[f_n(z=0), F_n(z=0)] \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

де  $f_n$  – значення центральної (несучої) частоти каналу;  $z$  – довжина лінії ВОСП;  $F_n$  – ширина полоси каналу;  $N$  – загальна кількість каналів частотного плану.

Можливе вирішення проблеми формування ОІ із заданими характеристиками дано у роботах [8-11]. Тобто, будемо вважати, що оптичне випромінювання у ВОСП може бути керованим з достатньою точністю як по формі ОІ у часовому просторі, так і по характеристикам його спектру. Втім, при поширенні спектру ОІ внаслідок нелінійних ефектів викується очевидна нерівність:

$$F_n(z=L) \geq F_n(z=0),$$

де  $L$  – максимальна або реальна довжина лінії ВОСП. Вочевидь, на стороні прийому канали будь-якого оптимального частотного плану повинні утворювати суцільну полосу, але без перекриття сусідніх каналів. На стороні передачі, де саме й генеруються сигнали, полоси окремих каналів можуть бути відокремлені

одна від одної захисними інтервалами. Таким чином, виникає задача зворотної екстраполяції ширини полоси певного каналу з несучою частотою  $f_n$  на стороні прийому  $F_n(z=0)$  на ширину полоси  $F_n(z=L)$  на стороні передачі.

Як показують дослідження [12,13], в оптимальних частотних планах ширина полос каналів може змінюватись з досить малим кроком. Врахуємо, що технічно досяжний діапазон зміни ширини каналів складає від 10 до 100 ГГц у сучасних системах ВОСП DWDM. Також врахуємо, що кількість каналів при малій ширині полоси у визначеному спектрі DWDM може сягати близько 1000 [14]. Якщо тестувати реальну ВОСП методом повного перебору всіх частот та всіх можливих значень початкової ширини спектру  $F_0$  з досить грубим кроком 1 ГГц, то треба буде виконати 50000 – 100000 вимірів. Навіть при можливості паралельних (одночасних) вимірів на різних частотах, така метрологічна задача потребуватиме відносно великого часу. Який час може вважатись прийнятним для синтезу нового оптимального частотного плану у випадку, наприклад, технологічного регламенту або встановлення факту перевищення проценту помилок над заданим? Відповідь проста: затримка передачі даних користувачів не повинна викликати втрату цих даних. Тобто, на час переналаштування ВОСП треба зберігати дані у якомусь оперативному буфері. Якщо ВОСП розрахована на передачу зі швидкістю 8 Тбіт/с, то, відповідно, треба мати накопичувач проміжних даних з об'ємом пам'яті не менше 1 Тбайта при затримці передачі лише в одну секунду!

Тому виникає **проблема** суттєвого зменшення кількості прямих вимірів. Дана проблема може вирішуватись синтезом аналітичних залежностей коефіцієнта нелінійного поширення спектру ОІ  $K_F$  від несучої частоти  $f$  та ширини полоси каналів  $F_0$ . Коефіцієнт визначимо у вигляді:

$$K_F(f, F_0) = \frac{F(z=L, f, F_0)}{F_0} - 1. \quad (2)$$

Зауважимо, що в силу даного визначення:  $K_F(f, F_0) \geq 0$ .

**Метою даної роботи** є вирішення задач синтезу моделей виду (2), досить точних для інтерполяції по параметру  $f$  та стійких до екстраполяції по параметру  $F_0$ .

#### Пропонована методика вирішення задачі

У реальних ВОСП базові залежності виду (2) повинні отримуватись за допомогою прямих вимірів. Втім, мова йде про перспективні ВОСП DWDM з адаптовано керованими частотно-сигнальними планами. Оскільки, таких ВОСП на даний час ще не існує, метрологічна схема замінюється комп'ютерними моделями. У попередніх дослідженнях [12, 13] динамічне моделювання перетворень ОІ в оптичному волокні виконувалось за допомогою авторської програми Nonlinear. Основа моделі – нелінійне узагальнене диференціальне рівняння Шредингера. Приклад еволюції ширини спектру та тривалості ОІ, отриманий за допомогою цієї програми, показано на рис. 1.

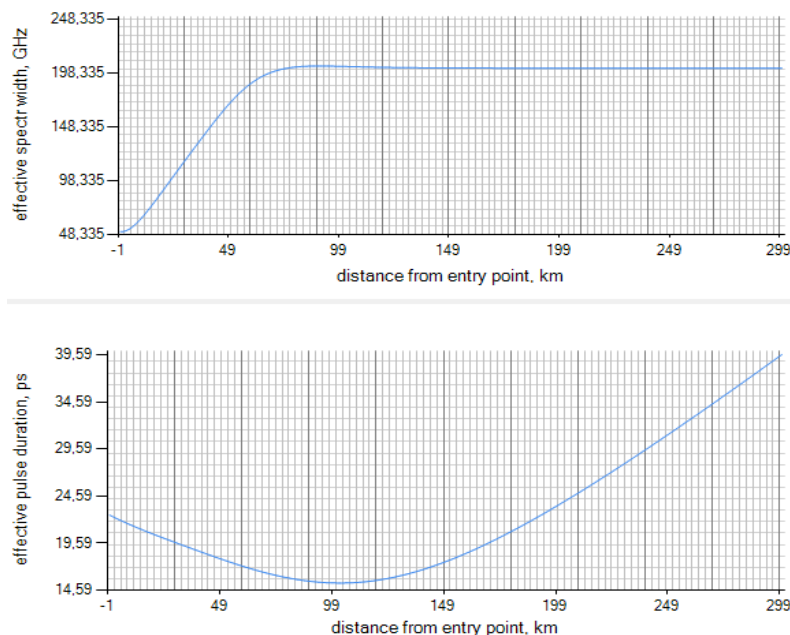


Рис. 1. Приклад еволюції ширини спектру та тривалості ОІ для каналу шириною 50 ГГц: центральна частота 192,425 ТГц, значення коефіцієнту дисперсії -0,147 пс/(нм\*км)

В цілому, моделі у програмі Nonlinear, досить адекватно відповідають відомим теоретичним уявленням [1]. Програма дозволяє виконувати багаторазове моделювання для обраного частотного плану з

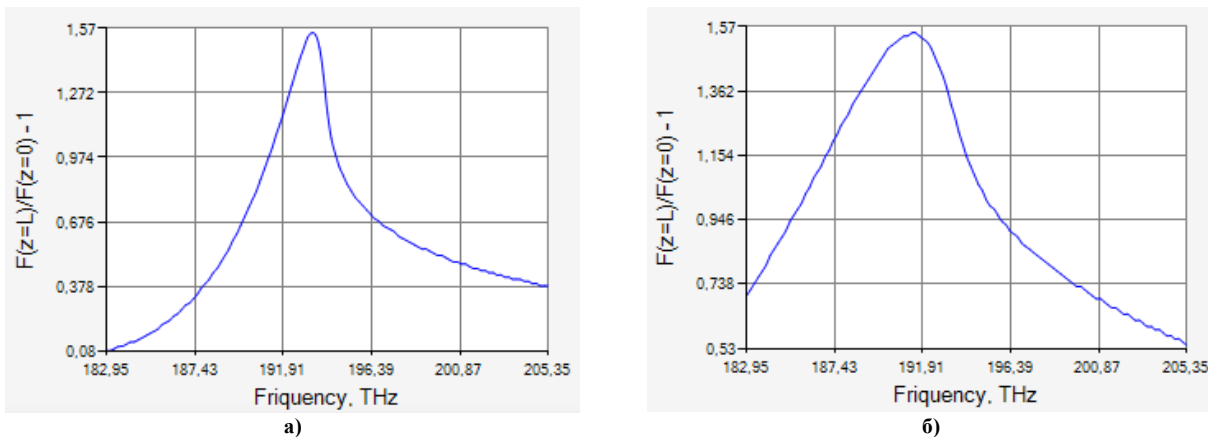
перебором каналів. Результати роботи можуть зберігатися як протокол у файлі. Фрагмент такого протоколу показано у табл. 1.

Таблиця 1

**Фрагмент протоколу результатів роботи програми Nonlinear для сітки частот з кроком 100 ГГц**

Довжина хвилі, нм	Частота, ТГц	Коефіцієнт дисперсії, пс/(нм•км)	$K_F(f, F_0)$
1640,241	182,95	8,965	0,7
1638,449	183,15	8,763	0,72
1636,661	183,35	8,562	0,74
1634,877	183,55	8,361	0,76
1633,097	183,75	8,161	0,78
1631,321	183,95	7,961	0,8
1629,549	184,15	7,762	0,83
1627,781	184,35	7,563	0,85

У графічному вигляді приклади залежностей  $K_F(f, F_0)$  згідно протоколів за табл. 1 показано на рис. 2.



**Рис. 2. Приклади залежностей  $K_F(f, F_0)$  : а) для полос 100 ГГц; б) для полос 50 ГГц;**

Графіки на рис. 2 отримано за допомогою авторської програми Band Relative (мова програмування C#; IDE Visual Studio), головне вікно якої показано на рис. 3.

Дана програма дозволяє не тільки відображати графіки залежностей, але й вирішує задачу синтезу аналітичних моделей цих залежностей методами штучного інтелекту. Втім, зробимо ряд важливих зауважень:

- з метою підкреслення впливу нелінійних ефектів моделювання для даних для рис. 1-3 відбувалось з досить великою потужністю джерела випромінювання – більше 10 дБм (10 мВт), тоді як у промислових стандартах [15] використовуються лазерні діоди з потужністю до 6 дБм (приблизно 4 мВт);
- значення коефіцієнту  $K_F$  дано для встановленого режиму, коли внаслідок загасання у волокні нелінійні ефекти не мають значного впливу і діють лише фактори загасання та дисперсії: при цьому ширина спектру ОІ вже не змінюється; дана умова слідує із зрозумілої потреби підвищення дальності передачі ВОСП;
- у табл. 2 дано протокол розрахунків для сітки з кроком 100 ГГц, тоді як канали, для яких виконувались «вимірювання» рознесені з кроком 200 ГГц, тобто показано лише кожний другий канал;
- відповідно, на рис. 3 показано фрагмент протоколу для сітки з кроком 25 ГГц, але результати «вимірювань» дано знову з кроком 200 ГГц, тобто для кожного восьмого каналу;
- як показують результати багатократного моделювання, можливість проведення реальних вимірів лише для певної частини каналів витікає з достатньо «гладкої» форми залежностей  $K_F(f, F_0)$ : саме дана обставина дозволяє суттєво зменшити кількість вимірювань у реальних ВОСП;
- неформальний аналіз графіків на рис. 1-3 та багатьох інших показує, що залежності при різних значення полоси тестуючого сигналу відрізняються лише масштабом та зсувом по аргументу  $f$ .

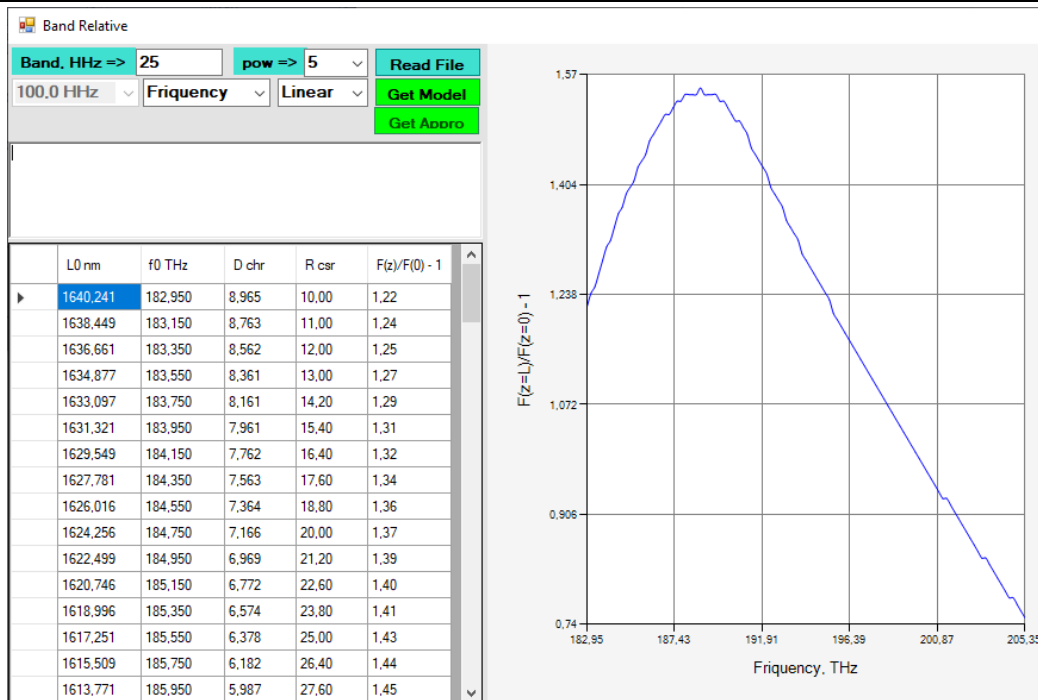


Рис. 3. Варіант стану вікна програми Band Relative: ширина полос каналів 25 ГГц

Нехай визначено аналітичний вид залежності для певної ширини каналів:

$$K_F(f, F_0) = K_{F_0}(f, F_0, \overline{A_M}), \quad A_M = [a_1, a_2, \dots, a_M], \quad (3)$$

де  $A_M$  – вектор невизначених параметрів. Тоді для іншої ширини смуги гіпотетичною моделлю буде залежність:

$$K_F(f, F_1) = K_{F_0}(f^*, F_0, \overline{A_M}), \quad f^* = \beta(F_0, F_1) \cdot [f - \Delta f(F_0, F_1)], \quad (4)$$

де  $\beta$  та  $\Delta f$  – відповідно параметри масштабу та зсуву.

З урахування «гладкості» експериментальних залежностей, будемо розглядати інтерполяційні моделі на класі ступеневих поліномів:

$$K_{F_0}(f, F_0, \overline{A_M}) = \sum_{m=0}^M a_m(F_0) \cdot f^m. \quad (5)$$

Задача встановлення параметрів моделі (5) може вирішуватись відомими методами параметричної ідентифікації (регресійного аналізу), наприклад методом найменших квадратів (МНК) або методом найменших модулів. При цьому ступень поліному є невизначеною. Остаточне вирішення задачі синтезу екстраполяційних моделей (4) при цьому вже вирішується методами штучного інтелекту, такими як метод групового врахування аргументів [16] або метод максимуму компактності [17]. Останні методи поєднує загальна парадигма перевірки екстраполяційної стійкості моделей за допомогою зовнішніх критеріїв, які визначаються на незалежних масивах експериментальних даних. У нашому випадку такі критерії природно витікають із постановки задачі екстраполяції на різні полоси каналів різних частотних планів. Конкретно у якості методу параметричної ідентифікації обираємо МНК, а інтерполяційну точність та екстраполяційну стійкість будемо оцінювати за допомогою показника відносної похибки:

$$\delta K = \max_f \frac{|K_{F,\text{exp}}(f) - K_{F,\text{mod}}(f)|}{K_{F,\text{exp}}(f)}, \quad (6)$$

де  $K_{F,\text{exp}}(f)$  та  $K_{F,\text{mod}}(f)$  – відповідно значення експериментально вимірюваного та розрахованого за допомогою моделей (4) або (5) коефіцієнта поширення ОІ.

Графічно приклади інтерполяції за допомогою моделі (5) показано на рис. 4.

Значення показника (6) для цього ж випадку та для різних ступенів інтерполяційних поліномів дано у табл. 2.

Дані табл. 2 підтверджують відому закономірність: чим вище ступень поліному, тим вища точність інтерполяції. Дана закономірність порушується лише для поліномів дуже високих ступенів внаслідок поганої обумовленості матриці рівнянь МНК. У даному випадку складність структури моделі вирішується навіть не формальними критеріями, а достатньою для практики точністю. Наприклад, якщо достатньою за показником (6) є точність порядку 1%, то згідно табл. 2 прийнятними будуть моделі у вигляді поліномів четвертого або п'ятого ступеню.

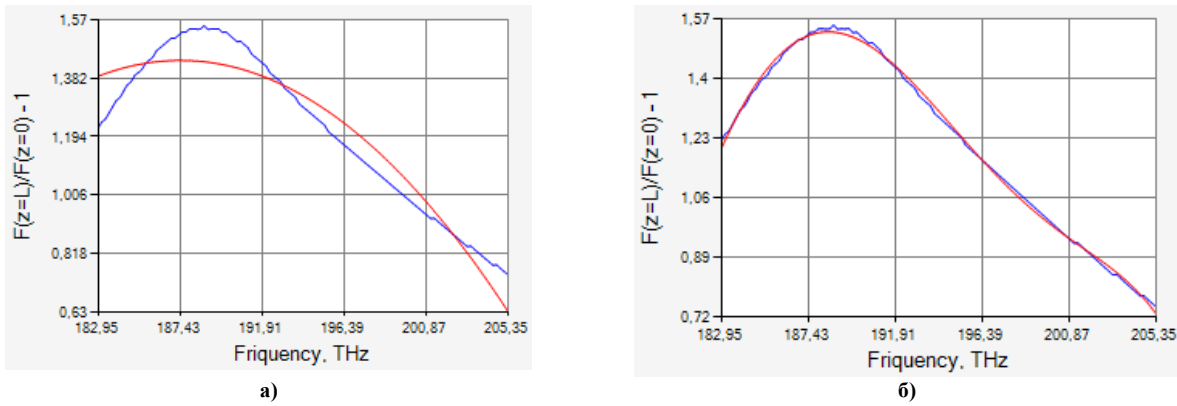


Рис. 4. Приклади вирішення задачі інтерполяції експериментальної залежності коефіцієнта поширення ОІ для полоси каналів 25 ГГц: а) поліномом другого ступеню; б) поліномом п'ятого ступеню

Таблиця 2

**Залежність відносної похибки інтерполяції від ступеню інтерполяційного поліному**

Ступень поліному	Відносна похибка	Ступень поліному	Відносна похибка	Ступень поліному	Відносна похибка
2	5,164E-002	5	7,499E-003	8	2,341E-003
3	1,640E-002	6	3,112E-003	9	2,103E-003
4	8,116E-003	7	3,001E-003	10	2,056E-003

Втім, при вирішенні задач структурної ідентифікації показники екстраполяційної стійкості можуть погіршуватись при неадекватному підвищенні складності моделі [16, 17]. Дане явище ілюстровано рис. 5.

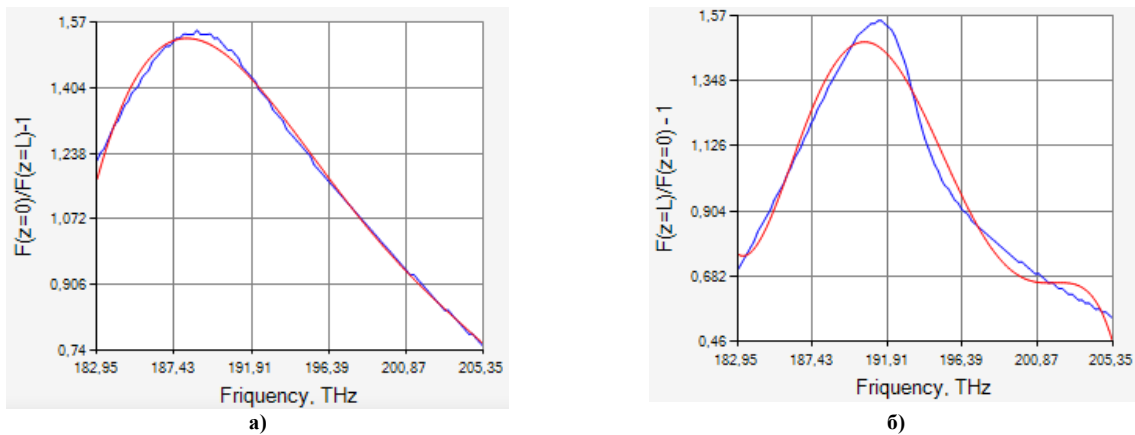


Рис. 4. Приклади вирішення задачі екстраполяції: а) поліномом п'ятого ступеню з полос шириною 50 ГГц на полоси 25 ГГц; б) поліномом сьомого ступеню з полос шириною 100 ГГц на полоси 50 ГГц;

Багаторазове моделювання ВОСП та екстраполяції у програмі Band Relative показують, що найбільш стійкими є моделі у вигляді ступеневих поліномів четвертого або п'ятого ступеню. Типова залежність показника (б) від ступеню поліному, розрахованого для контрольного масиву даних, показана у табл. 3.

Таблиця 3

**Залежність відносної похибки екстраполяції від ступеню інтерполяційного поліному при екстраполяції з ширини полоси 100 ГГц на полосу 50 ГГц**

Ступень поліному	Відносна похибка	Ступень поліному	Відносна похибка	Ступень поліному	Відносна похибка
2	1,146E-001	5	5,984E-003	8	2,5781E-001
3	3,237E-001	6	9,871E-002	9	7,209E-001
4	8,116E-002	7	1,053E-001	10	2,547E-000

Аналогічні результати отримуються і для інших випадків екстраполяції.

### Висновки

Ефекти спотворення оптичних імпульсів у перспективних ВОСП з гнучкими частотними планами можуть на даний час досліджуватись за допомогою імітаційних моделей. Моделювання у програмі Nonlinear дозволяє виявити основні характеристики еволюції імпульсів у нелінійному режимі, зокрема, характеристики поширення спектру.

Для адаптивного формування частотних планів треба встановити залежність між шириною спектру імпульсів на стороні передачі та на стороні прийому. Для оперативного вирішення такої задачі треба мінімізувати кількість вимірювань у реальних ВОСП. Одним із способів вирішення даної проблеми є встановлення аналітичних залежностей поширення спектрів оптичних імпульсів.

Встановлено, що внаслідок досить гладкої форми таких залежностей, можна використовувати досить прості інтерполяційні та екстраполяційні моделі у вигляді ступеневих поліномів. Для вирішення задач екстраполяції найбільшу екстраполяційну стійкість забезпечують при цьому поліноми четвертого або п'ятого ступеню.

Зрозуміло, що у реальних ВОСП такі залежності можуть бути іншими. Втім, підхід вирішення проблеми за допомогою штучного інтелекту, застосований у даній роботі, можна вважати універсальним і перспективним.

### Література

1. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика / Агравал Г. – М.: Мир, 1996. – 323 с.
2. Макаров Т.В. Когерентные волоконно-оптические системы передачи / Т.В. Макаров. – Одесса: ОНАС им. А.С. Попова, 2009. – 220 с.
3. Sonia Boscolo, Frederic Chaussard, Esben Andresen, Hervé Rigneault, Christophe Finot, Impact of initial pulse shape on the nonlinear spectral compression in optical fibre, *Optics & Laser Technology*, Volume 99, 2018, Pages 301-309, ISSN 0030-3992, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.08.033>.
4. S. N. Li, H. P. Li, Q. M. Wang, J. K. Liao, X. G. Tang, Y. Liu, Y. Z. Liu, "Numerical simulation on spectral compression of frequency-shifting femtosecond pulses in photonic crystal fiber," *Proc. SPIE 8198*, 2011 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Devices and Integration, 81980O (5 December 2011); doi: 10.1117/12.906297.
5. Esther Lidiya A., Vasantha Jayakantha Raja R., Anton Husakou, Pulse compression and pedestal suppression by self-similar propagation in nonlinear optical loop mirror, *Optics Communications*, Volume 474, 2020, 126083, ISSN 0030-4018, <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.126083>.
6. Zhenguang Dou, Wenhui Fang, Chenglin Sun, Zhiwei Men, Pulse compression and spectral broadening of stimulated Raman scattering in water via cascading amplification, *Optics Communications*, Volume 501, 2021, 127393, ISSN 0030-4018, <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2021.127393>.
7. A. Sharafali, D Vigneswaran, Bora Ung, Self-similar pulse compression by suspended core photonic crystal fiber with cubic-quintic nonlinearities, *Results in Optics*, Volume 5, 2021, 100117, ISSN 2666-9501, <https://doi.org/10.1016/j.rio.2021.100117>.
8. Одегов Н.А. Основы теории аппроксимации оптических сигналов гауссовыми импульсами / Н.А. Одегов // *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. - 2018. - № 5. - С. 42-72.
9. Одегов Н.А. Аппроксимация оптических сигналов короткими импульсами лазера в форме гиперболического секанса / Одегов Н.А. // *Электронное научное специализированное издание – журнал «Проблемы телекоммуникаций», ХНУРЭ*. - № 2 (23). - 2018. - С. 48 - 61.
10. Одегов М.А. Спосіб формування низькочастотної обвідної оптичного сигналу надкоротким імпульсом лазера гауссової форми // Патент України на корисну модель № 142946, зареєстрований 10.07.2020
11. Одегов М.А. Спосіб формування низькочастотної обвідної оптичного сигналу імпульсом лазера у формі гіперболічного секанса // Патент України на корисну модель № 142945, зареєстрований 10.07.20.
12. Одегов Н.А. Динамическое моделирование линейных и нелинейных эффектов в оптических волокнах систем передачи DWDM / Н.А. Одегов // *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. - 2020. - №2. - С. 150-158. DOI 10.31891/2307-5732-2020-283-2-150-157.
13. Одегов Н.А. Численно-аналитический метод синтеза оптимальных неравномерных частотных планов DWDM / Н.А. Одегов, И.С. Балеев // *Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова*, 2020, № 2. - С. 68-80.
14. Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid // *Recommendation ITU-T G.694.1*. – 2012. – 16 p.
15. Рекомендация МСЭ-Т G.698.1: Многоканальные приложения DWDM с одноканальными оптическими интерфейсами, 2005. – 18 с.
16. Ивахненко А.Г., Степашко В.С. Помехоустойчивость моделирования. - Киев: Наукова думка, 1985. – 216 с.
17. Левин С. Ф. Теория стохастической компактности / С. Ф. Левин // *Статистический анализ и синтез систем технического обеспечения эксплуатации*. – Одесса: ОВВКИУ ПВО, 1984. – С. 40-178.

## References

1. Ahraval H. Nelyneinaia volokonnaia optyka / Ahraval H. – M.: Myr, 1996. – 323 s.
2. Makarov T.V. Koherentnye volokonno-opticheskiye systemy peredachy / T.V. Makarov. – Odessa: ONAS ym. A.S. Popova, 2009. – 220 s.
3. Sonia Boscolo, Frederic Chaussard, Esben Andresen, Hervé Rigneault, Christophe Finot, Impact of initial pulse shape on the nonlinear spectral compression in optical fibre, *Optics & Laser Technology*, Volume 99, 2018, Pages 301-309, ISSN 0030-3992, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.08.033>.
4. S. N. Li, H. P. Li, Q. M. Wang, J. K. Liao, X. G. Tang, Y. Liu, Y. Z. Liu, "Numerical simulation on spectral compression of frequency-shifting femtosecond pulses in photonic crystal fiber," *Proc. SPIE* 8198, 2011 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Devices and Integration, 81980O (5 December 2011); doi: 10.1117/12.906297.
5. Esther Lidiya A., Vasantha Jayakantha Raja R., Anton Husakou, Pulse compression and pedestal suppression by self-similar propagation in nonlinear optical loop mirror, *Optics Communications*, Volume 474, 2020, 126083, ISSN 0030-4018, <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.126083>.
6. Zhenguo Dou, Wenhui Fang, Chenglin Sun, Zhiwei Men, Pulse compression and spectral broadening of stimulated Raman scattering in water via cascading amplification, *Optics Communications*, Volume 501, 2021, 127393, ISSN 0030-4018, <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2021.127393>.
7. A. Sharafali, D Vigneswaran, Bora Ung, Self-similar pulse compression by suspended core photonic crystal fiber with cubic-quintic nonlinearities, *Results in Optics*, Volume 5, 2021, 100117, ISSN 2666-9501, <https://doi.org/10.1016/j.rio.2021.100117>.
8. Odehov N.A. Osnovy teoryy approksymatsyy optycheskykh syhnalov haussovymy ympulsamy / N.A. Odehov // *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nuky*. - 2018. - № 5. - S. 42-72.
9. Odehov N.A. Approksymatsiya optycheskykh syhnalov korotkomy ympulsamy lazera v forme hyperbolicheskoho sekansa / Odehov N.A. // *Elektronnoe nauchnoe spetsyalyzirovannoe yzdanye – zhurnal «Problemy telekommunikatsiy», KhNURЭ*. - № 2 (23). - 2018. - S. 48 - 61.
10. Odehov M.A. Sposib formuvannia nyzkochastotnoi obvidnoi optychnoho syhnalu nadkorotkym impulsom lazera haussvoi formy // Patent Ukrainy na korysnu model № 142946, zareiestrovanyi 10.07.2020
11. Odehov M.A. Sposib formuvannia nyzkochastotnoi obvidnoi optychnoho syhnalu impulsom lazera u formi hiperbolichnoho sekansa // Patent Ukrainy na korysnu model № 142945, zareiestrovanyi 10.07.20.
12. Odehov N.A. Dynamicheskoe modelyrovanye lyeinykh y nelyneinykh effektov v optycheskykh voloknakh system peredachy DWDM / N.A. Odehov // *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nuky*. - 2020. - №2. - S. 150-158. DOI 10.31891/2307-5732-2020-283-2-150-157.
13. Odehov N.A. Chyslenno-analytycheskyi metod synteza optymalnykh neravnometnykh chastotnykh planov DWDM / N.A. Odehov, Y.S. Baleev // *Naukovi pratsi ONAZ im. O.S. Popova*, 2020, № 2. - С. 68-80.
14. Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid // Recommendation ITU-T G.694.1. – 2012. – 16 r.
15. Rekomendatsiya MSЭ-T G.698.1: Mnohokanalnye prylozheniya DWDM s odnokanalnymy optycheskymy ynterfeisamy, 2005. – 18 s.
16. Yvakhnenko A.H., Stepashko V.S. Pomekhoustoichyvost modelyrovannia. - Kyev: Naukova dumka, 1985. – 216 s.
17. Levyn S. F. Teoryia stokhastycheskoi kompaktnosti / S. F. Levyn // *Statystycheskyi analiz y syntezy system tekhnicheskoho obespecheniya ekspluatatsyy*. – Odessa: OVVKYU PVO, 1984. – С. 40-178.