

ФОРМИРОВАНИЕ СИМИЛЯРИТОНА С ФУНКЦИОНАЛЬНО ОСОБЫМ ПРОФИЛЕМ В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ

В. АВETИСЯН¹, М. СУКИАСЯН^{1,2*}, М. ПАПЯН²,
Л. МИКАЭЛЯН², М.КАЛАШЯН¹, А. КУТУЗЯН¹

¹Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

²Институт синхротронных исследований CANDLE, Ереван, Армения

*e-mail: minas.suqiasyan@ysu.am

(Поступила в редакцию 21 январь 2026 г.)

Выявлена и подтверждена функциональная форма, наилучшим образом воспроизводящая профиль нового типа симиляритона, путём функциональной аппроксимации профилей симиляритона, полученных в результате численного моделирования. Показано, что симиляритоны нового типа, формирующиеся в одномодовом пассивном оптическом волокне под совместным воздействием нелинейности и отрицательной дисперсии, обладают временным профилем двустороннего экспоненциального импульса вида $\exp(-|t|)$, характеризующимся резким пиком и широким основанием, типичными для данной функции. Установлены специфические граничные условия, определяющие параметры волокна и входного импульса – в зависимости от начальной формы на входе – при которых обеспечивается самоформирование таких импульсов и их устойчивое самоподобное распространение вдоль волокна. Представленные результаты получены для трёх типов входных профилей: гауссовского, гиперболического секанса и супер-гауссовского.

1. Введение

Симиляритоны в волоконной оптике являются объектом интенсивных исследований, поскольку в отличие от солитонов они способны поддерживать существенно более высокие энергии импульсов, преодолевая присущие солитонным режимам энергетические ограничения. Они представляют значительный практический интерес для широкого круга приложений — от волоконных усилителей и лазеров до современных оптических систем. Теоретические и экспериментальные исследования показали, что в условиях нормальной дисперсии самоподобная эволюция импульса приводит к формированию устойчивых параболических симиляритонов, являющихся решениями нелинейного уравнения Шредингера с учётом дисперсии, сильной нелинейности и усиления [1–9]. В последние годы также активно изучаются нелинейно-дисперсионные симиляритоны, формирующиеся в пассивных оптических волокнах под совместным воздействием нелинейности и нормальной дисперсии. Показано, что такие импульсы могут эффективно использоваться для спектральной компрессии, тонкой частотной настройки и временной характеристики фемтосекундных импульсов [10–12]. Современные исследования значительно расширили практические

возможности применения симиляритонов в волоконных лазерах, что, в частности, подробно рассмотрено в обзорной статье [13] и подтверждается экспериментальными работами как в пассивных, так и в активных конфигурациях [14, 15]. Генерация симиляритонов с заданными временными и спектральными профилями имеет принципиальное значение для широкого круга научных и прикладных задач, включая оптическую обработку и управление сигналами, высокоскоростные фотонные системы и др. В этом контексте среди последних работ особый интерес представляет исследование А. Федоренко и соавторов по генерации симиляритонов в Er-легированном волоконном лазере [16], а также работа Ч. Ма и соавторов, реализовавших пространственно-временные симиляритоны с использованием спектрально-пространственного фильтра [17].

Целью настоящей работы было исследование режима формирования симиляритонов в пассивном оптическом волокне при совместном воздействии слабой нелинейности и аномальной дисперсии. Ранее было показано, что профиль импульса на выходе волокна определяется порядком солитона N и начальной формой импульса [17, 18], где $N^2 = \gamma P_0 T_0^2 / |\beta_2|$, γ – коэффициент нелинейности, P_0 – пиковая мощность на входе, T_0 – начальная длительность импульса, β_2 – коэффициент дисперсии второго порядка. В диапазоне $N < 1$ реализуется режим спектрального самосжатия солитонной природы [19]. В этом режиме возможно самоподобное распространение импульса, приводящее к формированию нового типа симиляритона [20]. В настоящей работе основное внимание уделяется выявлению функциональной формы временного профиля данного типа симиляритона, а также установлению условий, обеспечивающих его самоформирование и устойчивое самоподобное распространение вдоль волокна.

2. Численный эксперимент

Численное моделирование проводилось путём решения нелинейного уравнения Шредингера методом split-step [16] с учётом дисперсии второго порядка и керровской нелинейности. В качестве начальных условий рассматривались три распространённые формы импульсов: гауссовская ($\exp(-0.5t^2)$), супергауссовская ($\exp(-0.5t^4)$) и гиперболический секанс ($\text{sech}(t)$), где $t = (\tau - l/u)/T_0$ – бегущее время, τ – временная координата, l – пространственная координата, u – групповая скорость. Распространение импульсов изучалось в режиме аномальной дисперсии; влиянием высших порядков дисперсии и нелинейности пренебрегали, предполагая, что длительность импульсов превышает субпикосекундный диапазон.

Анализ проводился в рамках упрощённой двумерной системы координат (z, N), где z представляет собой нормированную длину волокна ($z = l|\beta_2|/T_0^2$). Скорость и характер формирования симиляритонного импульса в оптическом волокне существенно зависят от формы, длительности и амплитуды начального импульса. В настоящей работе начальные импульсы имели одинаковые нормированные длительности и амплитуды, в результате чего процесс формирования симиляритона определялся исключительно временной формой входного импульса.

Поскольку полученные численные результаты служат основой для последующей экспериментальной реализации, параметр N варьировался при фиксированной длине волокна. Такой подход позволил определить граничные условия

формирования симиляритонного режима. При превышении установленных пороговых значений наблюдался переход к режиму спектральной самокомпрессии. Для длины волокна $z = 500$ соответствующие пороговые значения параметра N при использовании в качестве начальных условий гиперболического секанс-импульса, гауссовского и супергауссовского импульсов составили 0.5, 0.6 и 0.7, соответственно. Временные профили начальных импульсов и образовавшихся симиляритонных импульсов представлены на рис.1, а соответствующие спектральные характеристики – на рис.2.

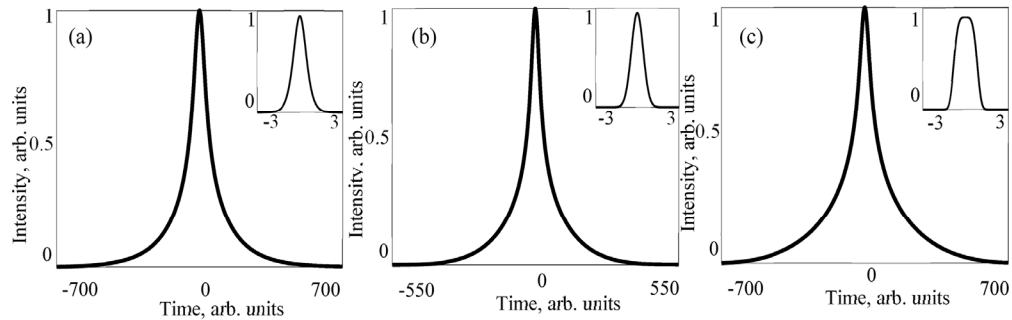


Рис.1. Временные профили импульсов на выходе оптического волокна длиной $z = 500$ для начальных импульсов с (a) гиперболическим секансным, (b) гауссовским и (c) супергауссовским профилями. На вставках представлены начальные временные профили.

На рис.1 показаны временные профили импульса на выходе оптического волокна длиной $z = 500$ при начальных импульсах с гиперболическим секансным (рис.1a), гауссовским (рис.1b) и супергауссовским (рис.1c) профилями. Вставки демонстрируют начальные формы импульсов. На рис.2 аналогично представлены конечные спектры; начальные спектральные профили обозначены штриховыми линиями. На обоих рисунках сплошными линиями показаны профили сформировавшихся симиляритонов. Как видно, при фиксированной длине волокна временные и спектральные формы формируемых симиляритонов не зависят от формы начального импульса. В настоящей работе площади начальных гиперболически-секансных, гауссовых и супергауссовых импульсов выбраны в соотношении 1.2 : 1.0635 : 1.0877, соответственно.

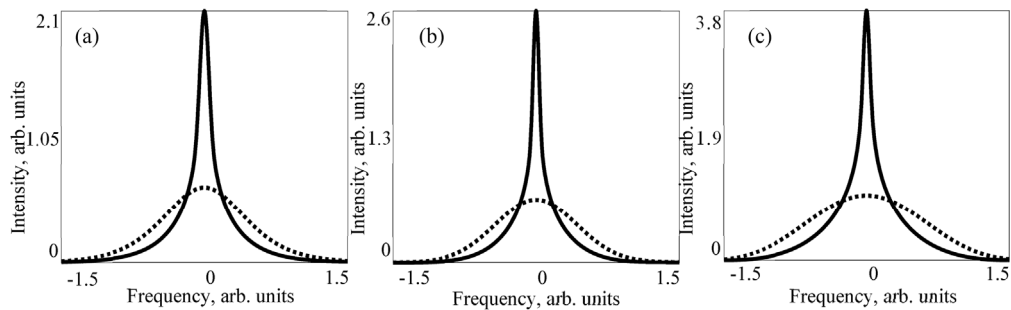


Рис.2. Спектральные профили импульсов на выходе оптического волокна длиной $z = 500$ для начальных импульсов с (a) гиперболическим секансным, (b) гауссовским и (c) супергауссовским профилями. Начальные спектральные профили обозначены штриховыми линиями.

Для наглядной иллюстрации процесса формирования симиляритона на рис.3 показано распространение начального супергауссовского импульса в одномодовом волокне длиной $z = 2000$ при $N = 0.7$.

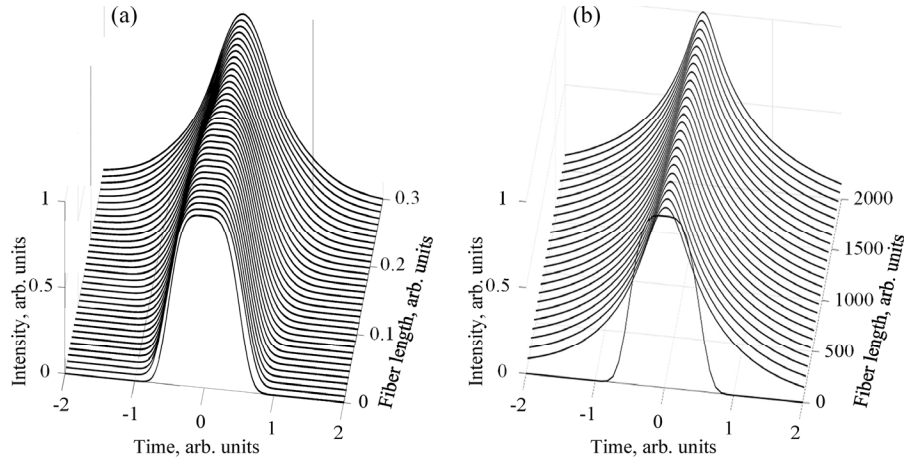


Рис.3. Временная эволюция начального супергауссовского импульса при распространении в одномодовом оптическом волокне длиной $z = 0.3$ и $z = 2000$ при значении параметра $N = 0.7$.

Поскольку переход от супергауссовского импульса к предсимиляритонному режиму происходит очень быстро, данная трансформация также показана на рис.3а при длине волокна $z = 0.3$. На рис.3б представлено полное распространение супергауссовского импульса в оптическом волокне при длине $z = 2000$.

Поскольку в процессе распространения по волокну импульс испытывает значительное временное уширение, его функциональная форма была нормирована по интенсивности и длительности на каждой длине распространения для корректной оценки.

Функциональная форма сформировавшегося симиляритона была оценена методом численной аппроксимации. Сгенерированный симиляритон сравнивался с рядом функций, визуально напоминающих его собственный функциональный профиль, что представлено на рис.4, где оцениваемая функция показана штриховой линией, а самоподобный импульс – сплошной линией; для времени и интенсивности использованы нормированные единицы.

Оцениваемыми функциями являются: гауссовская функция (рис.4а), функция гиперболического секанса (рис.4б) и двусторонняя экспоненциальная функция $\exp(-|t|)$ (рис.4с). Параметрами, использованными для корректного сравнения этих функций, служат коэффициент детерминации R^2 и среднеквадратическая ошибка (RMSE), которые определяются следующим образом:

$$R^2 = 1 - \frac{n \times (RMSE)^2}{\sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2}, \quad RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y - \hat{y})^2}{n}}.$$

Здесь n – количество точек данных, использованных для аппроксимации; $\sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2$ – суммарная дисперсия используемых данных; \bar{y} , \hat{y} и y обозначают соответственно среднее значение всех данных, предсказанные значения и наблюдаемые значения.

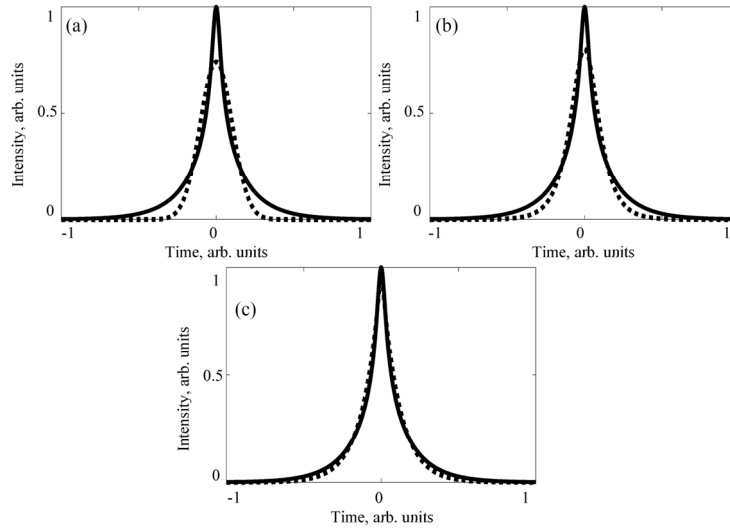


Рис.4. Кривые аппроксимации сгенерированного симиляритона (а) гауссовской функцией, функцией (b) гиперболического секанса и двусторонней (c) экспоненциальной функцией.

Результаты численного аппроксимационного анализа показывают практически полное совпадение между двусторонней экспоненциальной функцией и сформированным симиляритоном: значение RMSE составило 2.25×10^{-5} , тогда как для функций гауссовской и гиперболического секанса оно равно 0.031 и 0.0227, соответственно. Более того, аппроксимация сформированного симиляритона дала наилучшее значение коэффициента детерминации $R^2 = 0.9927$ по сравнению с 0.9358 и 0.9656 для гауссовской и гиперболически-секансной функций. Это позволяет заключить, что был успешно сформирован новый тип симиляритона. Для дополнительной проверки достоверности полученных результатов была также исследована эволюция входного импульса с двусторонней экспоненциальной формой при распространении в одномодовом оптическом волокне с параметрами $N = 0.8$ и $z = 500$. На рис.5 приведено сравнение функциональных профилей начального (сплошная кривая) и выходного (пунктирная кривая) импульсов, нормированных по интенсивности и длительности.

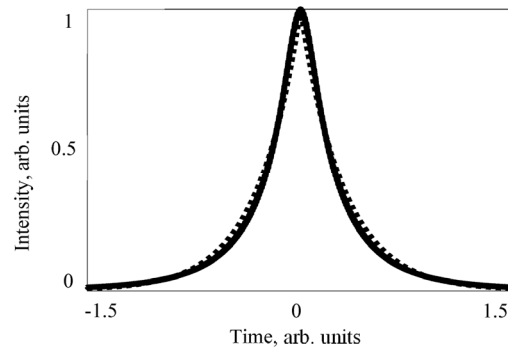


Рис.5. Входной (сплошная линия) и выходной (штриховая линия) импульсы с двусторонней экспоненциальной формой.

Результаты показывают, что начальный импульс с двусторонней экспоненциальной формой лишь расширяется во времени без изменения своей функциональной формы, что подтверждает достоверность сформированного в нашем исследовании симиляритона.

3. Заключение

На основе проведённых численных исследований установлены граничные условия формирования симиляритонных импульсов в пассивных одномодовых волокнах при слабой нелинейности и аномальной дисперсии. Для начальных импульсов получены следующие значения параметра N : гиперболический секанс – 0.5, гауссовский – 0.6, супергауссовский – 0.7 и двусторонний экспоненциальный – 0.8. Сформировавшиеся при этом симиляритоны имеют функциональную форму, близкую к двустороннему экспоненциальному профилю $\exp(-|t|)$, причём начальные импульсы с такой же формой практически не изменяют форму при распространении. Таким образом, результаты проведённых исследований позволяют предположить, что для любого начального профиля импульса, найдутся граничные условия, при которых сформируется симиляритон с двусторонним экспоненциальным профилем.

Полученные результаты расширяют представления о самоподобной эволюции импульсов в нелинейных волоконных системах и могут быть использованы при разработке новых источников ультракоротких импульсов с заданными временными и спектральными характеристиками.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета по высшему образованию и науке МОНКС РА в рамках научного проекта № 25RG-1C225.

ЛИТЕРАТУРА

1. **P. A. Bélanger.** Opt. Express, **15**, 11033 (2007).
2. **C. Finot, G. Millot, J.M. Dudley.** Opt. Lett., **29**, 2533 (2004).
3. **D. Anderson, M. Desaix, M. Karlsson, M. Lisak, M.L. Quiroga-Teixeiro.** J. Opt. Soc. Am. B, **10**, 1185 (1993).
4. **M.E. Fermann, V.I. Kruglov, B.C. Thomsen, J.M. Dudley, J.D. Harvey.** Phys. Rev. Lett. **84**, 6010 (2000).
5. **C. Finot, J.M. Dudley, D.J. Richardson, G. Millot.** Opt.Express, **12**, 5104 (2004).
6. **C. Finot, F. Parmigiani, P. Petropoulos, D.J. Richardson.** Opt. Express, **14**, 3161 (2006).
7. **W.H. Renninger, A. Chong, F.W. Wise.** Phys. Rev. A, **82**, 021805 (2010).
8. **S. Lefrancois, Ch.Liu, M.L. Stock, Th.S. Sosnowski, A. Galvanauskas, F.W. Wise.** Opt. Lett., **38**, 43 (2013).
9. **H. Triki, V.I. Kruglov.** Opt. Comm. **574**, 1310541 (2025).
10. **M. Oberthaler R.A. Höpfel.** Appl. Phys. Lett. **63**, 1017 (1993).
11. **A. Zeytunyan, G. Yesayan, L. Mouradian, P. Kockaert, Ph. Emplit, F. Louradour, A. Barthélémy.** J. Europ. Opt. Soc. Rap. Public., **4**, 09009 (2009).
12. **A. Zeytunyan, G. Yesayan, L. Mouradian, A. Kutuzyan.** Opt. Comm., **552**, 130059 (2024).
13. **A. Chong, L.G. Wright, F.W. Wise.** Rep. Prog. Phys., **78**, 113901 (2015).
14. **B. Oktem, C. Ülgüdür, F.Ö. İday.** Nat. Photonics, **4**, 307 (2010).

15. Y. Tang, Zh. Liu, W. Fu, F.W. Wise. Opt. Lett., **41**, 2290 (2016).
16. A.Y. Fedorenko, A. Ismael, I.O. Orekhov, D.A. Dvoretzkiy, S.G. Sazonkin, L.K. Denisov, V.E. Karasik. Photonics, **11**, 387 (2024).
17. C. Ma, B. Gao, G. Wu, J. Liu, Q. Na, Q. Xie, C. Zhang, X. Nie, Z. Cao, L. Wang. Opt Lett., **50**, 17, 5210 (2025).
18. M. Sukiasyan, V. Avetisyan, A. Kutuzyan. Photonics, **10**, 1207 (2023).
19. A. Kutuzyan, V. Avetisyan, M. Sukiasyan. J. Contemp. Phys., **59**, 36 (2024).
20. G.P. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics. Elsevier, Rochester, USA, 2019.

**ՖՈՒՆԿՑԻՈՆԱԼ ԱՌՈՒՄՈՎ ԱՅԼ ԴԱՄԻ ՄԻՄԻԼԱՐԻՏՈՆՆԵՐԻ
ՉԵՎԱՎՈՐՈՒՄԸ ՕՊՏԻԿԱԿԱՆ ԼՈՒՍԱՏԱՐԵՐՈՒՄ**

Վ. ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ, Մ. ՍՈՒՔԻԱՍՅԱՆ, Մ. ՊԱՊՅԱՆ,
Լ. ՄԻԿԱԵԼՅԱՆ, Մ. ՔԱԼԱՇՅԱՆ, Ա. ԿՈՒՏՈՒԶՅԱՆ

Բացահայտվել է նոր տեսակի սիմիլարիտոնի տեսքը օպտիմալ նկարագրող ֆունկցիոնալ կախումը, որը նույնականացվել և ստուգվել է թվային մոդելավորման միջոցով ստացված սիմիլարիտոնների տեսքերի ֆունկցիոնալ մոտարկման եղանակով: Ցույց է տրվել, որ միամոդ պասիվ օպտիկական մանրաթելում ոչգծայնության և բացասական դիսպերսիայի համատեղ ազդեցության տակ ձևավորվող այս սիմիլարիտոնները ցուցաբերում են ժամանակային պրոֆիլի երկկողմանի էքսպոնենցիալ իմպուլսի տեսք $\exp(-|t|)$, որը բնութագրվում է տվյալ ֆունկցիային բնորոշ սուր գագաթով և լայն հիմքով: Սահմանվել են մանրաթելի և մուտքային իմպուլսի բնութագրերը որոշող հատուկ սահմանային պայմաններ՝ կախված մանրաթելի մուտքում իմպուլսի սկզբնական ձևից, որոնք ապահովում են նման իմպուլսների ինքնաձևավորումը և դրանց կայուն ինքնանման տարածումը մանրաթելի երկայնքով: Արդյունքները ստացվել են իմպուլսի մուտքային պրոֆիլների երեք տեսակների համար՝ գաուսյան, սեկանս-հիպերբոլական և սուպերգաուսյան:

**EMERGENCE OF A SIMILARITON WITH A FUNCTIONALLY
DISTINCT PROFILE IN OPTICAL FIBERS**

V. AVETISYAN, M. SUKIASYAN, M. PAPYAN,
L. MIKAELYAN, M. KALASHYAN, A. KUTUZYAN

A functional form that best reproduces the profile of a new type of similariton has been identified and validated by functionally fitting of similariton profiles obtained through numerical simulations. It is shown that a new type of similaritons formed in a passive single-mode optical fiber under the combined influence of nonlinearity and anomalous dispersion exhibits a temporal profile of a two-sided exponential pulse of the form $\exp(-|t|)$, characterized by a sharp peak and a broad base typical of this function. Specific boundary conditions have been established that determine the fiber and input pulse parameters - depending on the initial input shape - ensuring the self-shaping of such pulses and their stable self-similar propagation along the fiber. The presented results were obtained for three types of input profiles: Gaussian, hyperbolic secant, and super-Gaussian.