

Динамика модулированной волны в световоде с различными типами зависимости дисперсии групповых скоростей от длины

В.А. Лапин

Научно-исследовательский
технологический институт
им. С.П. Капицы Ульяновского
государственного университета
Ульяновск, Россия
lva2013@yandex.ru

Абрамов А.С.

Научно-исследовательский
технологический институт
им. С.П. Капицы Ульяновского
государственного университета
Ульяновск, Россия
aleksei__abramov@mail.ru

Миронов П.П.

Научно-исследовательский
технологический институт
им. С.П. Капицы Ульяновского
государственного университета
Ульяновск, Россия
museum86@mail.ru

Аннотация — В работе исследуется динамика модулированной непрерывной волны в условиях возникновения и существования модуляционной неустойчивости, распространяющейся в нелинейном световоде с аномальной дисперсией групповых скоростей. При этом дисперсия в рассматриваемом световоде зависит от длины световода как функция. Показана возможность распада непрерывной волны на последовательность ультракоротких импульсов с меньшими длительностями и большими пиковыми мощностями по сравнению с нелинейными световодами, с постоянной дисперсией.

Ключевые слова — модулированная волна, дисперсия групповых скоростей, кубическая нелинейность, модуляционная неустойчивость, неоднородный световод, ультракороткие импульсы

1. ВВЕДЕНИЕ

Модуляционная неустойчивость (МН) – рост малых гармонических возмущений непрерывной волны – эффект, характерный для многих нелинейных систем, поддерживающих распространение локализованных волн, природа которого связана с совместным действием нелинейных и дисперсионных эффектов [1].

Изучение условий существования и динамических характеристик развитой фазы модуляционной неустойчивости представляет интерес не только в связи с фундаментальностью данной задачи, но и благодаря возможностям создания на основе данного эффекта устройств управления лазерным излучением, в частности полностью оптических генераторов высокочастотных последовательностей ультракоротких оптических импульсов [2]. Такие системы представляют практический интерес с точки зрения разработки солитонных волоконно-оптических линий связи [3], создания полностью оптических логических элементов [4] и систем обработки сигналов [5].

В настоящей работе исследуется явление развитой модуляционной неустойчивости волновых пакетов, распространяющихся в нелинейном световоде с аномальной дисперсией групповых скоростей, зависящей от длины световода [1, 2, 6, 7]. Исследованы условия возникновения, область существования, и другие характеристики модуляционной неустойчивости волновых пакетов, распространяющихся в нелинейной среде.

Показана возможность распада квазинепрерывного волнового пакета на последовательность ультракоротких импульсов с меньшей длительностью и большей

амплитудой по сравнению с нелинейными световодами, в которых дисперсия не зависит от длины.

II. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Динамика временной огибающей волнового пакета с учетом нелинейности среды керровского типа и зависимости дисперсии от длины волокна $d_2(z)$ в бегущей системе координат описывается следующим уравнением для амплитуды огибающей [1, 2, 6, 7]:

$$i \frac{\partial A}{\partial z} - \frac{d_2(z)}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial \tau^2} + iR|A|^2 A = 0 \quad (1)$$

где $\tau = t - z/v_g$ – время в бегущей системе координат, $v_g = (\partial\omega/\partial\beta)_{\omega_0}$ – групповая скорость волнового пакета, $d_2 = (d^2\beta/d\omega^2)$ – параметр дисперсии групповых скоростей, R – параметр керровской нелинейности.

В работе проводилось моделирование распространения модулированной волны вида:

$$A(0, \tau) = \sqrt{P_0} [1 + a_m \cos(\Omega_{\text{mod}} \tau)] \quad (2)$$

Для этого осуществлялось решение уравнения распространения (1) для начального условия (2) методом Фурье расщепления шага по физическим параметрам (split step Fourier method) [1].

На рис. 1 приводятся профили нормированной дисперсии (левый рис.) и полученные с помощью расчетов зависимости максимума модулированной волны от продольной координаты световода z .

Для расчетов в данной работе были выбраны следующие значения параметров: начальная мощность $P_0 = 1$ Вт, частота $\Omega_{\text{mod}} = \sqrt{2\gamma P_0 / |d_{20}|}$, $a_m \approx 0,01$ и амплитуда модуляции входной волны; длина исследуемого световода $L = 1000$ м ($L = 10L_{\text{NL}}$), начальная дисперсия групповых скоростей $d_{20} = -10^{-26}$ с²/м, дисперсии на выходе из световода $d_2(L) = 0,1 \cdot d_{20}$, параметр нелинейности $\gamma = 10^{-2}$ (Вт·м)⁻¹. В работе выбирались зависимости дисперсии

$d_2(z)/d_{20} = \exp(-b_e z); (1 - b_l z); (1 + b_h z)^{-1}; \exp(-b_g z^2)$ – кривые (1;2;3;4) рис. 1. Можно заметить, что для всех

выбранных зависимостей дисперсии от длины убывающая по модулю дисперсия приводит к отсутствию процесса обратного уширения импульсов, характерного для полностью однородных световодов[5]. Из зависимостей на рис. 1 видно, что наибольшие степени сжатия генерируемых импульсов достигаются при плавно убывающих по модулю зависимостях дисперсии: линейной и гауссовой. Тогда как при гиперболической зависимости дисперсии групповых скоростей от длины, дисперсия по модулю убывает слишком быстро, прежде чем процесс формирования последовательности импульсов из модулированной волны успеет начаться, в результате чего достигаемые значения пиковой мощности импульсов получаются значительно меньше, чем во всех остальных случаях. При этом почти на всей длине световода максимальная степень сжатия достигается при гауссовом профиле дисперсии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного анализа полученных в работе результатов было продемонстрировано, что в световодах с зависимостью дисперсии групповых скоростей от продольной координаты z на процесс распада моделированной волны на последовательность ультракоротких импульсов в результате развития эффекта модуляционной неустойчивости оказывает значительное влияние профиль зависимости дисперсии от длины. Так при выбранных в работе зависимостях генерируемые последовательности ультракоротких импульсов достигают более высоких значений пиковой мощности при дисперсии плавно спадающей на

начальном участке световода (линейный и гауссов профили), когда процесс распада начальной волны только начинается, что говорит о возможности увеличения значительного увеличения пиковых мощностей генерируемых импульсов, с помощью подбора зависимостей дисперсии неоднородного световода от длины.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке РНФ в рамках научного проекта № 23-22-00412, стипендии президента РФ СП-4058.2021.5 и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации проект FEUF-2023-0003.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Agrawal, G. P. Nonlinear fiber optics/ edited by G. P. Agrawal. – New York: Springer, 2007. – 511 p.
- [2] Zolotovskii, I.O. Generation of high frequency trains of chirped soliton-like pulses in inhomogeneous and cascaded active fiber configurations / I. O. Zolotovskii, V. A. Lapin, D. I. Sementsov, A. A. Fotiadi, S. V. Popov // Optics Communications. – 2018. – Vol. 426. – P. 333–340.
- [3] Юшко, О.В. Когерентные солитонные линии связи / О. В. Юшко, А. А. Редюк, М. П. Федорук, С. К. Турицын // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2014. – Т. 146, № 5. – С. 809–908.
- [4] Lai, D.M.F. All-optical picoseconds logic gates based on a fiber optical parametric amplifier / D. M. F. Lai, C. H. Kwok, K. K.-Y. Wong // Opt. Express. – 2008. – Vol. 16 (22). – P. 18362–18370.
- [5] Willner, A.E. All-optical signal processing / A. E. Willner, S. Khaleghi, M. R. Chitgarha, O. F. Yilmaz // Journal of Lightwave Technology. – 2014. – Vol. 32 (4). – P. 660–680.
- [6] Ахметшин, У.Г. Новые одномодовые волоконные световоды с изменяющейся по длине плоской спектральной зависимостью хроматической дисперсии / У. Г. Ахметшин, В. А. Богатырев, А. К. Сенаторов, А. А. Сысолятин, М. Г. Шалыгин // Квантовая электроника. – 2003. – Т. 33, № 3. – С. 265–267.
- [7] Abramov, A.S. Amplification and Generation of Frequency-Modulated Soliton Pulses in Nonuniform Active Fiber Configurations / A. S. Abramov, I. O. Zolotovskii, V. A. Lapin, P. P. Mironov, M. S. Yavtushenko, V. V. Svetukhin, A. A. Fotiadi // Photonics. – 2022. – Vol. 9 (3). – P. 160.
- [8] Erkintalo, M. Akhmediev breather evolution in optical fiber for realistic initial conditions / M. Erkintalo, G. Genty, B. Wetzel, J. M. Dudley // Physics Letters, Section A: General, Atomic and Solid State Physics. – 2011. – Vol. 375 (19). – P. 2029–2034.

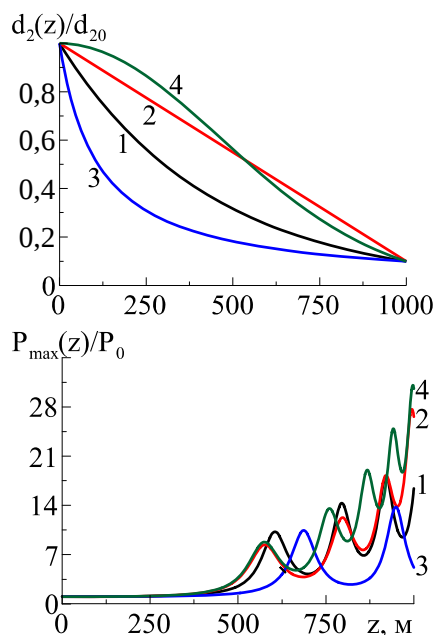


Рис. 1. Нормированные продольные зависимости дисперсии (верхн. рис.) и максимума модулированной волны (нижн. рис.), для зависимостей дисперсии: – кривые (1;2;3;4)