

Оптические экстремальные события в лазерах с оптоэлектронной обратной связью

А.А. Кренц^{1,2}, Н.Е. Молевич^{1,2}, Е.А. Ярунова^{1,2}

¹Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Ново-Садовая 221, Самара, Россия, 443011

²Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. В работе теоретически исследована динамика твердотельного лазера с положительной оптоэлектронной обратной связью, управляющей добротностью резонатора. Исследование проведено с учетом задержки, возникающей из-за инерционности обратной связи. Показано, что динамика лазера переходит к хаотической при увеличении задержки через последовательность бифуркаций удвоения периода. При дальнейшем увеличении задержки наблюдается появление экстремальных импульсов, имеющих аномально большую амплитуду. Показано, что возникновение экстремальных импульсов связано с кризисом хаотического аттрактора.

1. Введение

В последние годы оптические системы используются как удобные тестовые лаборатории для исследования экстремальных событий [1]. Такие экстремальные события также называются «оптические волны-убийцы» или «диссипативные волны-убийцы» за их большие амплитуды, значительно превышающие среднее значение. Кроме того, на сегодняшний день установлено, что оптические волны-убийцы могут возникать разными способами. Они достаточно часто встречаются в линейных системах, где индуцируются случайными граничными условиями и множественной интерференцией. Также они были предсказаны, а позднее обнаружены, в нелинейных динамических системах с модуляционной неустойчивостью. Другими словами, экстремальные события возникают в сложных системах, и большинство из них могут быть описаны статистическими методами и описаны моделями базирующимися на обыкновенных дифференциальных уравнениях (в том числе с задержкой) и на уравнениях в частных производных. Динамика узкоапертурных лазеров моделируется системой нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений. Теоретические и экспериментальные исследования последних лет показали, что такие модели описывают возникновение волн-убийц (экстремально больших импульсов), а результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными. В работе [2] показано, что динамический хаос в узкоапертурном лазере с модуляцией потерь может приводить к генерации волн-убийц. Оптические волны-убийцы обнаружены в узкоапертурных лазерах с модуляцией накачки и инъекцией внешнего излучения [3], а также в узкоапертурных лазерах с задержкой по времени [4]. Возникновение волн-убийц в лазерах связано с кризисом хаотических аттракторов.

2. Динамика лазера с оптоэлектронно обратной связью

2.1 Математическая модель

При моделировании использовалась стандартная модель лазера с запаздывающей оптоэлектронной связью [5]:

$$\begin{cases} \frac{dI}{dt} = GI[N - 1 - \varepsilon I(t - \tau)], \\ \frac{dN}{dt} = A - N(I + 1), \end{cases} \quad (1)$$

где I и N - безразмерные интенсивность и инверсия, соответственно; $G = k/\gamma_{\parallel}$, где k - скорость затухания поля в резонаторе и γ_{\parallel} - скорость релаксации инверсии населенности; A - безразмерный параметр накачки; $\varepsilon \ll 1$ - сила оптоэлектронной обратной связи. Слагаемое $\varepsilon I(t - \tau)$ соответствует оптоэлектронной обратной связи, управляющей потерями в резонаторе, здесь τ - время задержки. Зависимость потерь резонатора от интенсивности излучения обеспечивается путем использования контура обратной связи, состоящего из фотоприемника, на который попадает часть излучения, затем сигнал с фотоприемника усиливается и поступает на ячейку Керра, которая и обеспечивает изменение добротности резонатора. Задержка в модели (1) обычно вызвана естественными причинами и связана с инерционностью узла, управляющего добротностью резонатора, а также может быть увеличена дополнительно искусственным путем. В данной работе исследована динамика лазера с оптоэлектронной обратной связью при различных значениях параметра задержки.

2.2 Результаты численного моделирования

Численное моделирование динамики лазера с оптоэлектронной обратной связью проводилось при параметрах соответствующих твердотельному Nd:YAG лазеру: $G = 5000$ и $A = 1.2$. Сила обратной связи была выбрана $\varepsilon = 0.01$. Моделирование проводилось стандартным методом Рунге-Кутты 4-го порядка с шагом интегрирования 0.0001. Исследована динамика при изменении управляющего параметра τ , остальные параметры оставались неизменными. Показано, что при увеличении времени задержки τ происходит переход к режиму динамического хаоса через последовательность бифуркаций удвоения периода. На рисунке 1 показана соответствующая бифуркационная диаграмма.

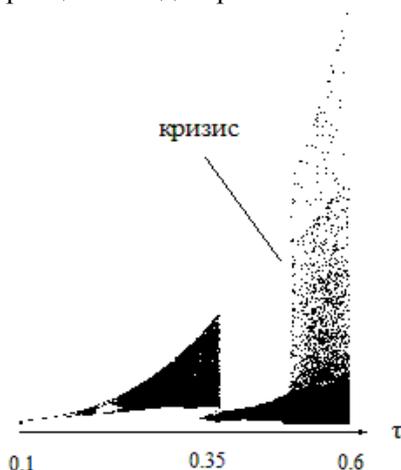


Рисунок 1. Бифуркационная диаграмма

Динамический хаос развивается, например, уже при $\tau = 0.5$. На рисунке 2 показан динамический хаос, возникающий в лазерной системе при данных параметрах. В данной работе экстремальным будем считать импульс, который по величине превосходит среднее значение

плюс восемь стандартных отклонений. При $\tau = 0.5$ экстремальным следует считать импульс с амплитудой больше ≈ 12.1 . Из рисунка 2 хорошо видно, что в лазере присутствует хаотическая динамика, но экстремальные события не наблюдаются.

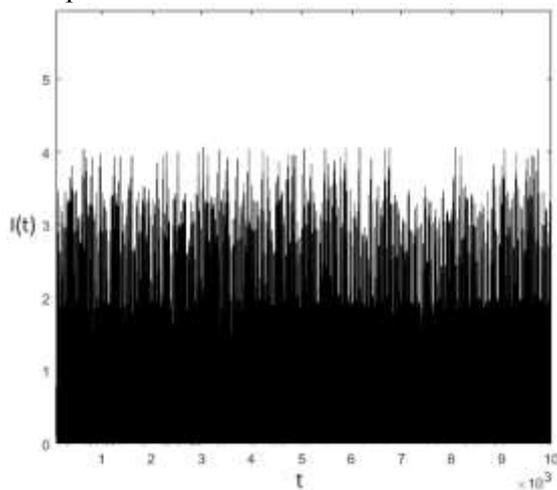


Рисунок 2. Динамика лазера при $\tau = 0.5$.

При увеличении времени задержки до $\tau = 0.55$ динамика лазера качественно изменяется. На рисунке 3 хорошо видно, что на фоне хаотических пульсаций появляются редкие импульсы очень большой амплитуды, которые удовлетворяют критерию экстремального события, описанному выше.

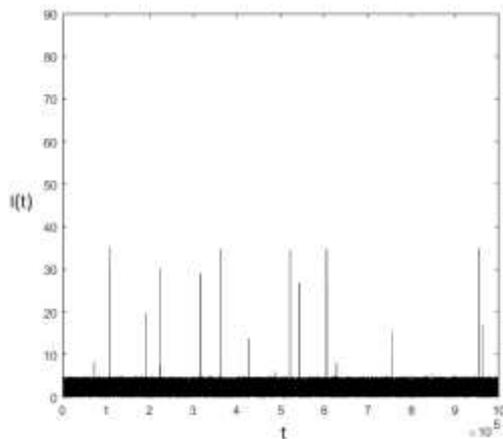


Рисунок 3. Динамика лазера при $\tau = 0.55$.

Появление редких импульсов экстремально большой амплитуды связано с мультистабильностью и кризисом хаотического аттрактора (см. рисунок 1). В таком случае фазовая траектория большую часть времени находится на хаотическом аттракторе с малой амплитудой колебаний, но иногда попадает на неустойчивые траектории и «перескакивает» на короткое время на другой хаотический аттрактор с импульсами большой амплитуды.

3. Заключение

В представленной работе проведено численное моделирование динамики твердотельного лазера с оптоэлектронной обратной связью, запаздывающей во времени. Показано, что при увеличении времени задержки лазер переходит в режим генерации динамического хаоса. Дальнейшее увеличение этого параметра приводит к кризису хаотического аттрактора и генерации редких импульсов большой амплитуды, удовлетворяющим общепринятому критерию экстремальных событий. Таким образом показано, что в твердотельных лазерах с

обратной связью, управляющей добротностью резонатора, возможна генерация импульсов экстремально большой амплитуды, которые также часто называют оптические волны-убийцы.

4. Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ мол_а 18-32-00704.

5. Литература

- [1] Akhmediev, N. Recent progress in investigating optical rogue waves / N. Akhmediev, J.M. Dudley, D.R. Solli, S. K. Turitsyn // *Journal of optics*. – 2013. – Vol. 15. – P. 060201. DOI: 10.1088/2040-8978/15/6/060201.
- [2] Metayer, C. Extreme events in chaotic lasers with modulated parameter/ C. Metayer, A. Serres, E.J. Rosero, W.A.S. Barbosa, F.M. de Aguiar, J.R. Rios Leite, J.R. Tredicce // *Optics Express*. – 2014. – Vol. 22. – P. 19850-19859. DOI: 10.1364/OE.22.019850.
- [3] Ahuja, J. Rogue waves in injected semiconductor lasers with current modulation: role of the modulation phase / J. Ahuja, D. B. Nalawade, J. Zamora-Munt, R. Vilaseca, C. Masoller // *Optics Express* – 2014. – Vol. 22. – P. 28377-28382. DOI: 10.1364/OE.22.028377.
- [4] Mercier, E. Numerical study of extreme events in a laser diode with phase-conjugate optical feedback / E. Mercier, A. Even, E. Mirisola, D. Wolfersberger, M. Sciamanna // *Physical Review E*. – 2015. – Vol. 91. – P. 042914. DOI: 10.1103/PhysRevE.91.042914.
- [5] Grigorieva, E.V. Chaotic spiking induced by variable delayed optoelectronic feedback in a model of class B laser / E.V.Grigorieva, S.A.Kaschenko // *Optics Communications*. – 2018. – Vol. 47. – P. 9-16. DOI: 10.1016/j.optcom.2017.08.069.

Optical extreme events in laser with opto-electronic feedback

A.A.Krents^{1,2}, N.E. Molevich^{1,2}, E.A.Yarunova^{1,2}

¹Lebedev National Research University, Novo-Sadovaya street 221, Samara, Russia, 443011

²Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. We study a theoretical model describing a laser with a positive optoelectronic feedback. Strong time-delayed positive optoelectronic feedback driving losses of the laser leads to rare pulses with extremely large amplitude, called rogue waves.