

Спин-волновые генераторы диссипативных солитонов огибающей ультракороткой длительности: теория и эксперимент

А.С. Бир, Д.В. Романенко, С.В. Гришин

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

Аннотация: в работе приводятся теоретические и экспериментальные результаты, демонстрирующие возможность формирования параметрически связанных темных и светлых диссипативных солитонов огибающей нано- и даже субнаносекундной длительности в микроволновых активных кольцевых резонаторах с двумя нелинейными элементами. Одним из нелинейных элементов является магнанный микроволновод, поддерживающий трехволновый параметрический распад длинноволновой поверхностной магнитоэлектронной волны на коротковолновые спиновые волны, а другим – транзисторный усилитель, работающий в режиме насыщения выходной мощности. Результаты численного моделирования хорошо подтверждаются экспериментальными данными.

Ключевые слова: спиновые волны, диссипативные солитоны, ультракороткие импульсы, параметрическая неустойчивость

1. Введение

В настоящее время активно проводятся исследования, направленные на получение коротких и ультракоротких импульсов (УКИ). Четкого определения УКИ не существует, но к ним относят, в основном, импульсы, чья длительность не превышает нескольких периодов колебаний на несущей частоте. Интерес к УКИ обусловлен несколькими причинами. Во-первых, это значительное увеличение скорости передачи информации за счет большой спектральной ширины УКИ и возможность использования большого числа каналов при передаче сигнала от одного импульсного источника. Во-вторых, за счет значительного увеличения разрешения во временной области подобные импульсы возможно использовать в медицине при диагностике и лечении различных заболеваний. Генерация УКИ в оптике основана на использовании метода синхронизации мод в лазерном резонаторе [1], который осуществляется с помощью либо активных, либо пассивных (насыщающиеся поглотители) модуляторов добротности лазерного резонатора.

В последние годы оптические методы формирования УКИ начинают активно использоваться и в микроволновом диапазоне. Одной из первых работ по генерации УКИ в микроволновом диапазоне была работа [2], в которой была показана возможность формирования одиночного УКИ длительностью порядка 1 нс в спин-волновом генераторе широкополосного хаотического СВЧ сигнала. В работах [3,4] была продемонстрирована возможность использования ЛБВ, работающей либо в режиме срыва Компфнера [3], либо в режиме циклотронного резонанса [4], в качестве насыщающегося поглотителя для формирования периодических последовательностей мощных УКИ субнаносекундной длительности.

В настоящей работе представлен новый метод формирования УКИ, основанный на использовании в активном кольцевом резонаторе двух нелинейных элементов, один из которых осуществляет пассивную модуляцию генерируемого сигнала, а другой

ограничивает рост амплитуды модулированного сигнала.

2. Модифицированная модель Вышкинд-Рабиновича

Предлагаемая к рассмотрению модель удовлетворяет условиям трехволнового параметрического распада:

$$\begin{aligned}\omega_0 &= \omega_1 + \omega_2 + \delta, \\ \vec{k}_0 &= \vec{k}_1 + \vec{k}_2,\end{aligned}$$

где ω_0 - частота неустойчивой волны, $\omega_{1,2}$ - частоты параметрически возбуждаемых волн, а δ - частотная отстройка от синхронизма.

При построении модели предполагается, что инкремент неустойчивой волны насыщается, т.е. с уменьшением амплитуды неустойчивой волны он возрастает и достигает максимального значения (насыщается) при малых ее амплитудах. Кроме того, в модели учитывается запаздывание неустойчивой волны в цепи обратной связи. С учетом сделанных предположений модифицированная модель Вышкинд-Рабиновича для комплексных амплитуд трех параметрически связанных волн запишется в следующем виде:

$$\begin{aligned}\frac{da_0(t)}{dt} &= -c_0 a_1(t) a_2(t) \exp(-j\delta t) + \eta [1 - \alpha \text{th}|a_0(t - \tau)|] a_0(t - \tau), \\ \frac{da_1(t)}{dt} &= c_1 a_0(t) a_2^*(t) \exp(j\delta t) - \nu_1 a_1(t), \\ \frac{da_2(t)}{dt} &= c_2 a_0(t) a_1^*(t) \exp(j\delta t) - \nu_2 a_2(t),\end{aligned}\tag{1}$$

где $a_0(t)$ - комплексная амплитуда неустойчивой волны, $a_0(t - \tau)$ - комплексная амплитуда неустойчивой волны в цепи обратной связи с запаздыванием τ , $a_{1,2}(t)$ - комплексные амплитуды параметрически возбуждаемых волн, η - линейный инкремент неустойчивой волны, $\nu_{1,2}$ - декременты параметрически возбуждаемых волн, α - параметр нелинейности, $c_{0,1,2}$ - коэффициенты взаимодействия волн.

3. Результаты численного моделирования

Рассмотрим вырожденный случай, когда $a_1(t) = a_2(t) = a(t)$, $\nu_1 = \nu_2 = \nu$ и $c_1 = c_2 = c$. Расчеты проведены для значений c , c_0 и ν , взятых из [5]. На рисунке 1 приведены результаты, полученные на основе численного решения модифицированной модели Вышкинд-Рабиновича (1) с использованием метода Рунге-Кутты четвертого порядка. Результаты получены как в отсутствие, так и при наличии запаздывания неустойчивой волны в цепи обратной связи. Как следует из результатов, представленных на рисунке 1, если нормированный линейный инкремент превышает параметр нелинейности ($\eta' = \eta/1 \text{ мкс}^{-1} > \alpha$), то происходит ограничение роста амплитуды модулированной (параметрически возбуждаемыми волнами) неустойчивой волны. Это приводит к тому, что на неустойчивой волне вместо светлых импульсов огибающей релаксационной формы (такие импульсы наблюдаются в системе, когда $\eta' < \alpha$) формируются темные импульсы огибающей несимметричной формы (см. рисунок 1а), а на параметрически возбуждаемых волнах наблюдаются светлые импульсы огибающей. При дальнейшем увеличении линейного инкремента (см. рисунок 1б) амплитудное плато на неустойчивой волне выравнивается, и на нем формируются темные УКИ

практически симметричной формы с длительностями меньше 1 нс. Одновременном с этим на параметрически возбуждаемой волне формируются светлые УКИ с близкими значениями длительности. Таким образом, при $\eta' > \alpha$ насыщение автоколебаний, обусловленное как параметрической неустойчивостью, так и нелинейностью инкремента, приводит к формированию параметрически связанных состояний темных и светлых УКИ.

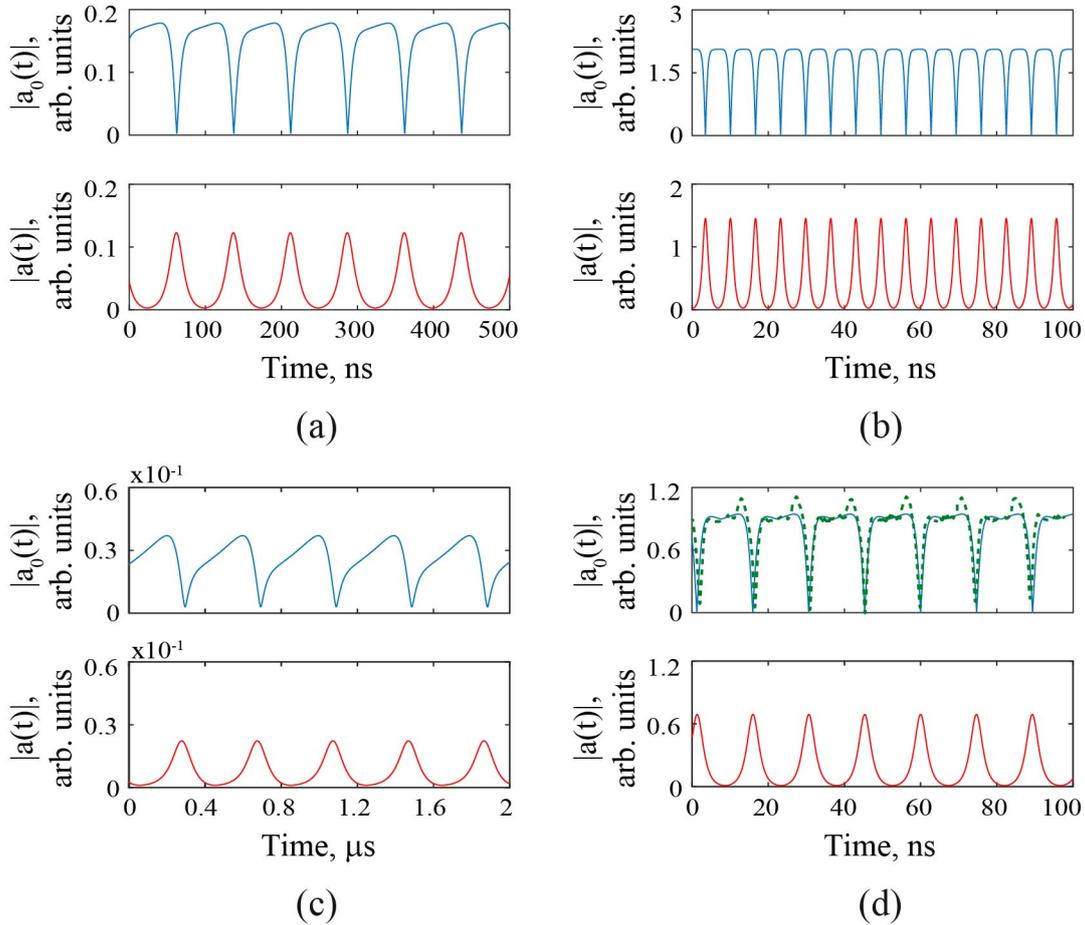


Рисунок 1. Временные зависимости модуля комплексной амплитуды неустойчивой волны $|a_0(t)|$ и параметрически возбуждаемой волны $|a(t)|$, рассчитанные по модели при изменении как линейного инкремента η : (а, с) 2.8 мкс^{-1} и (b, d) 50 мкс^{-1} , так и времени задержки τ : (а, b) 0 и (с, d) 6.4 нс. Расчеты выполнены для $c_0=1497 \text{ мкс}^{-1}$, $c=745 \text{ мкс}^{-1}$, $\delta=4 \text{ мкс}^{-1}$, $\nu=9 \text{ мкс}^{-1}$ и $\alpha=1$. На (d) пунктирной линией показана временная последовательность темных УКИ, генерируемых активным кольцевым спин-волновым резонатором в микроволновом диапазоне.

Результаты исследования влияния запаздывающей обратной связи ($\tau \neq 0$) на динамику системы приведены на рисунке 1с,d. Видно, что запаздывание неустойчивой волны является причиной увеличения как длительности, так и периода следования темных и светлых УКИ для обоих значений линейного инкремента. Для $\eta=2.8 \text{ мкс}^{-1}$ длительность темных импульсов τ_d увеличивается с 9 нс ($\tau = 0$) до 79 нс ($\tau = 6.4 \text{ нс}$), а для $\eta=50 \text{ мкс}^{-1}$ - с 0.7 нс ($\tau = 0$) до 1 нс ($\tau = 6.4 \text{ нс}$). Кроме того, если время запаздывания становится больше длительности темных УКИ ($\tau > \tau_d$), то между темными УКИ появляются дополнительные провалы, по обе стороны от которых амплитудное плато становится несимметричным (см. рисунок 1d).

4. Результаты экспериментальных исследований

На рисунке 2 приведено схематическое изображение кольцевого генератора темных УКИ, в цепи обратной связи которого используются два нелинейных элемента. Первый нелинейный элемент – это изогнутый (Γ -образный) ферромагнитный микроволновод, к поверхности которого приложено внешнее постоянное магнитное поле. Поле приложено так, чтобы во входном плече микроволновода возбуждались поверхностные магнитостатические волны (ПМСВ) с нормальной дисперсией, которые трансформировались в обратные объемные МСВ (ОМСВ) с аномальной дисперсией в выходном плече микроволновода. При выбранных значениях напряженности внешнего постоянного магнитного поля трехволновый нелинейный параметрический распад ПМСВ на коротковолновые спиновые волны, а также четырехволновые нелинейные спин-волновые взаимодействия, реализуются только во входном плече изогнутого волновода. Вторым нелинейным элементом является выходной усилитель каскада, который работает в режиме насыщения выходной мощности.

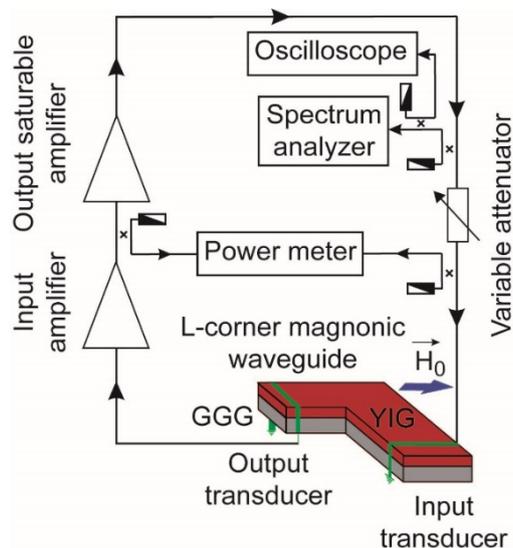


Рисунок 2. Схематические изображения генератора темных УКИ, работающего в режиме управления дисперсией и конкуренции нелинейностей.

На рисунке 1d пунктирной линией показаны временные последовательности темных УКИ, полученные из радиофизического эксперимента. Видно, что длительность и период следования измеренных и рассчитанных темных УКИ достаточно хорошо согласуются между собой. Помимо этого, период модуляции амплитудного плато, полученный в численном моделировании, совпадает с экспериментальным значением. Однако на экспериментальных временных рядах, в отличие от расчетных зависимостей, несимметричность плато по обе стороны от темного импульса является более сильной и, что самое главное, сами импульсные последовательности являются хаотическими. Отметим, что для выбранных значений параметров модели увеличение времени задержки не приводит к генерации хаотического сигнала в стационарном режиме.

Таким образом, представленные на рисунке 1 результаты свидетельствуют о том, что модифицированная модель Вышкинд-Рабиновича адекватно описывает

механизмы формирования параметрически связанных состояний темных и светлых УКИ огибающей с длительностями характерными для микроволнового диапазона.

5. Заключение

Разработанная модифицированная модель Вышкинд-Рабиновича позволяет описать механизмы формирования параметрически связанных последовательностей темных и светлых УКИ, генерируемых в автоколебательных системах с запаздывающей обратной связью микроволнового диапазона частот. С точки зрения новых представлений, развитых в теории самоорганизации, данные импульсные последовательности можно трактовать как диссипативные солитоны, так как они представляют собой локализованные во времени структуры, которые формируются в сильно неравновесной нелинейной среде за счет установления энергетического баланса между притоком энергии из вне (усилением) и потерями [6]. Дальнейший интерес представляет изучение механизмов, приводящих к генерации параметрически связанных состояний в виде последовательностей многосолитонных комплексов темных и светлых УКИ [7, 8], за счет, например, учета управления дисперсией среды в модифицированной модели Вышкинд-Рабиновича.

Исследование выполнено за счет **гранта Российского научного фонда № 19-79-20121**, <https://rscf.ru/project/19-79-20121/>

Список литературы

1. Ultrashort Pulse Laser Technology: Laser Sources and Applications. Edited by Stefan Nolte// Springer. - 2016.
2. Wu M., Kalinikos B.A., Patton C.E. Self-generation of chaotic solitary spin wave pulses in magnetic film active feedback rings// Phys. Rev. Lett. - 2005. - Vol. 95. - No 23. - P. 237202.
3. Гинзбург Н.С., Кочаровская Е.Р., Вилков Г.Г., Сергеев А.С. Пассивная синхронизация мод и формирование диссипативных солитонов в электронных генераторах с просветляющим поглотителем в цепи обратной связи// ЖЭТФ. – 2017. - Т. 151, - Вып.1. - С. 50-58.
4. Ginzburg N. S., Denisov G. G., Vilkov M. N., Sergeev A. S., Samsonov S. V., Malkin A. M., Zotova I. V. Nonlinear cyclotron resonance absorber for a microwave subnanosecond pulse generator powered by a helical-waveguide gyrotron traveling-wave tube// Phys. Rev. Appl. – 2020. – V. 13. – No 4. – P. 044033.
5. Демидов В.Е., Ковшиков Н.Г. Механизм возникновения и стохастизации автомодуляции интенсивных спиновых волн// ЖТФ. - 1999. - Т. 69. - № 8. - С. 100-103.
6. Розанов Н.Н. Диссипативные оптические и родственные солитоны// Москва: Физматлит, - 2021.
7. Бир А.С., Гришин С.В. Генерация темных многосолитонных комплексов в магнетонном кольцевом резонаторе с управлением дисперсией и конкурирующими нелинейными спин-волновыми взаимодействиями// Письма в ЖЭТФ. - 2019. - Т. 110. - Вып. 5. - С. 348-353.
8. Bir A.S., Grishin S.V., Moskalenko O.I., Pavlov A.N., Zhuravlev M.O., Osuna Ruiz D. Experimental observation of ultrashort hyperchaotic dark multisoliton complexes in a magnonic active ring resonator// Phys. Rev. Lett. - 2020. - V. 125. - No 8. - P. 083903.