

Короткие импульсы, «on-off» перемежаемость и когерентный резонанс в моделях многосвязанных параметрических спин-волновых автогенераторов

С.В. Гришин¹, П.С. Комков^{1,2}, О.И. Москаленко¹

¹СГУ им. Н.Г. Чернышевского

²АО «НПП «Алмаз»

Аннотация: в работе приводятся теоретические результаты, демонстрирующие многообразие нелинейных явлений в многосвязанных параметрических автогенераторах на спиновых волнах с различными видами связи. Моделирование многосвязанных генераторных систем базируется на использовании параметрической осцилляторной модели Вышкинд-Рабиновича, описывающей нелинейную динамику трех взаимодействующих мод в среде с квадратичной нелинейностью. В данной модели высокочастотная мода, соответствующая магнитостатической спиновой волне, усиливается, а две низкочастотные моды, соответствующие параметрически возбуждаемым спиновым волнам, затухают в линейном приближении. Установлено, что в системе, состоящей из двух двунаправленно связанных параметрических осцилляторов Вышкинд-Рабиновича, формируются периодические последовательности коротких темных импульсов огибающей на высокочастотных модах и светлых импульсов огибающей на низкочастотных модах. В тоже время, в однонаправленно связанных системах такие импульсные последовательности наблюдается только при увеличении числа параметрических осцилляторов до трех. Это приводит к хаотизации импульсных последовательностей, к появлению «on-off» перемежаемости и когерентного резонанса. Последний эффект наблюдается при изменении как коэффициента связи, так и усиления одного из трех параметрических осцилляторов.

Ключевые слова: автогенератор, спиновые волны, когерентный резонанс, короткие импульсы

1. Введение

На сегодняшний день одной из актуальных задач в области СВЧ электроники является создание источников ультракоротких импульсов. Такие импульсные источники представляют интерес для систем передачи информации, для исследования быстро протекающих процессов, а также для микрообработки различных материалов и биологических тканей [1]. Одними из первых работ по генерации коротких импульсов огибающей в диапазоне СВЧ являются работы профессора Б.А. Калиникоса. В своих работах он использовал оптический метод синхронизации мод на керровской нелинейности для получения периодических последовательностей «светлых» и «темных» солитонов огибающей с длительностями порядка десятков наносекунд [2, 3]. В качестве среды с кубической (керровской) нелинейностью выступала пленка железо-иттриевого граната (ЖИГ), в которой распространялись магнитостатические спиновые волны (МСВ) с разными видами (нормальной или аномальной) дисперсии. Такая диспергирующая нелинейная среда находилась в цепи обратной связи кольцевого резонатора совместно с усилителем, осуществляющим линейное усиление МСВ.

Генерация импульсных сигналов в активных кольцевых резонаторах с пленками ЖИГ может быть реализована не только за счет кубической нелинейности ферромагнитной среды, но и за счет квадратичной нелинейности, возникающей в результате параметрического распада длинноволновой МСВ на коротковолновые тепловые СВ. В этом случае на МСВ, которая линейно усиливается, формируется периодическая последовательность релаксационных импульсов огибающей микросекундной

длительности, а на параметрически возбуждаемых СВ генерируются периодические последовательности импульсов огибающей колокообразной формы, длительность которых гораздо меньше длительности релаксационных импульсов. Как показано в [4], такие импульсные последовательности хорошо воспроизводятся в численном эксперименте с помощью модели Вышкинд-Рабиновича, описывающей временную динамику диссипативных сред с усилением в условиях параметрического распада.

Известно, что в возбудимых шумом системах наблюдается фундаментальное нелинейное явление, получившее название *когерентного резонанса* [5]. Оно заключается в том, что у шумового воздействия есть некий оптимальный уровень, при котором индуцированные шумом колебания становятся наиболее близкими к регулярным. В хаотических динамических системах, явление когерентного резонанса было обнаружено в хаотической бистабильной цепи Чуа [6] и в системе двух связанных идентичных хаотических осцилляторов Лоренца [7]. В последнем случае явление когерентного резонанса наблюдалось в режиме «on-off» перемежаемости, возникающем только под воздействием шума.

В настоящей работе представлены теоретические результаты по формированию параметрически связанных последовательностей коротких темных и светлых импульсов огибающей в многосвязанных параметрических осцилляторах Вышкинд-Рабиновича с различными видами связи. Одновременно с этим демонстрируется явление когерентного резонанса, которое реализуется в отсутствие внешнего шумового воздействия в системе трех однонаправленно связанных хаотических параметрических осцилляторов, работающих в режиме “on-off” перемежаемости.

2. Два двунаправленно связанных параметрических осциллятора Вышкинд-Рабиновича

Многосвязанная система, состоящая из двух двунаправленно связанных параметрических осцилляторов Вышкинд-Рабиновича, описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial m_1(t)}{\partial t} &= -c_{01}b_1(t)b_2(t) \exp(-i\delta_1 t) + \eta_1 m_1(t) + K_1 m_2, \\
 \frac{\partial b_1(t)}{\partial t} &= c_{11}m_1(t)b_2^*(t) \exp(i\delta_1 t) - \nu_1 b_1(t), \\
 \frac{\partial b_2(t)}{\partial t} &= c_{21}m_1(t)b_1^*(t) \exp(i\delta_1 t) - \nu_1 b_2(t), \\
 \frac{\partial m_2(t)}{\partial t} &= -c_{02}b_3(t)b_4(t) \exp(-i\delta_2 t) + \eta_2 m_2(t) + K_2 m_1, \\
 \frac{\partial b_3(t)}{\partial t} &= c_{12}m_2(t)b_4^*(t) \exp(i\delta_2 t) - \nu_2 b_3(t), \\
 \frac{\partial b_4(t)}{\partial t} &= c_{22}m_2(t)b_3^*(t) \exp(i\delta_2 t) - \nu_2 b_4(t),
 \end{aligned} \tag{1}$$

где $m_{1,2}(t)$ – комплексные амплитуды огибающей двух высокочастотных мод (МСВ), $b_{1,2,3,4}(t)$ – комплексные амплитуды огибающей четырех низкочастотных мод (параметрически возбуждаемых СВ), $\delta_{1,2}$ – частотные отстройки от параметрического резонанса в первом и втором параметрическом осцилляторе, $\eta_{1,2}$ – инкременты в первом и втором параметрическом осцилляторе, $\nu_{1,2}$ – декременты в первом и втором параметрическом осцилляторе, $c_{01}, c_{11}, c_{21}, c_{02}, c_{12}, c_{22}$ – произвольные константы в первом и втором параметрическом осцилляторе, $K_{1,2}$ – коэффициенты

двунаправленной связи. Из (1) следует, что в отсутствие связи между высокочастотными модами ($K_{1,2} = 0$), каждый из двух параметрических осцилляторов представляет собой параметрический осциллятор Вышкинд-Рабиновича [7].

На рисунке 1 приведены результаты, полученные на основе численного решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений (1) с использованием метода Рунге-Кутты четвертого порядка. Расчеты выполнены в предположении равенства комплексных амплитуд огибающей двух низкочастотных мод в каждом параметрическом осцилляторе ($b_1 = b_2$ и $b_3 = b_4$), инкрементов нарастания высокочастотных мод ($\eta = \eta_1 = \eta_2$), декрементов низкочастотных мод ($\nu = \nu_1 = \nu_2$), частотных отстроек от параметрического резонанса ($\delta = \delta_1 = \delta_2$), а также произвольных констант у высокочастотных ($c_0 = c_{01} = c_{02}$) и низкочастотных ($c = c_{11} = c_{12} = c_{21} = c_{22}$) мод. Для проведения расчетов значения ν , δ , c_0 и c были взяты из [4]. Из представленных на рисунке 1 результатов расчета следует, что если коэффициенты двунаправленной связи не сильно отличаются друг от друга ($K_1 \cong K_2$), то в обоих параметрических осцилляторах формируются периодические последовательности темных импульсов огибающей на высокочастотных модах (см. рисунке 1a,b) и светлых импульсов огибающей на низкочастотных модах (см. рисунке 1c,d). Длительность темных импульсов огибающей для выбранных значений параметров системы имеет значение ~ 4 нс, а длительность светлых импульсов огибающей ~ 0.5 нс.

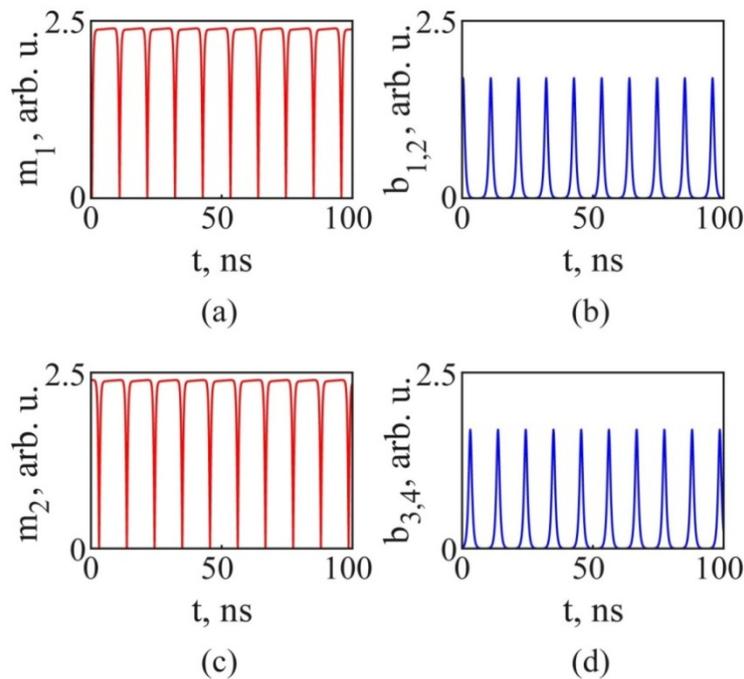


Рисунок 1. Периодические импульсные последовательности, рассчитанные на высокочастотной (a, c) и низкочастотной (b, d) модах первого (a, b) и второго (c, d) двунаправленно связанных параметрических осцилляторов Вышкинд-Рабиновича. Расчеты выполнены для $\nu = 9 \text{ мкс}^{-1}$, $\eta = 0.7 \text{ мкс}^{-1}$, $\delta = 0.01 \text{ мкс}^{-1}$, $c_0 = 1497 \text{ мкс}^{-1}$, $c = 745 \text{ мкс}^{-1}$, $K_1 = 0.595$ и $K_2 = 0.6$.

3. Три однонаправленно связанных параметрических осциллятора Вышкинд-Рабиновича

Многосвязанная система, состоящая из трех однонаправленно связанных параметрических осцилляторов Вышкинд-Рабиновича, описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned}
\frac{dm_1(t)}{dt} &= -c_{01}b_1(t)b_2(t)\exp(-i\delta_1t) + \eta_1m_1(t) + K_3m_3(t), \\
\frac{db_{1,2}(t)}{dt} &= c_{11,12}m_1(t)b_{2,1}^*(t)\exp(i\delta_1t) - \nu_1b_{1,2}(t), \\
\frac{dm_2(t)}{dt} &= -c_{02}b_3(t)b_4(t)\exp(-i\delta_2t) + \eta_2m_2(t) + K_1m_1(t), \\
\frac{db_{3,4}(t)}{dt} &= c_{21,22}m_2(t)b_{4,3}^*(t)\exp(i\delta_2t) - \nu_2b_{3,4}(t), \\
\frac{dm_3(t)}{dt} &= -c_{03}b_5(t)b_6(t)\exp(-i\delta_3t) + \eta_3m_3(t) + K_2m_2(t), \\
\frac{db_{5,6}(t)}{dt} &= c_{31,32}m_3(t)b_{6,5}^*(t)\exp(i\delta_3t) - \nu_3b_{5,6}(t).
\end{aligned} \tag{2}$$

На рисунке 2 приведены результаты, полученные на основе численного решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений (2). Расчеты выполнены в предположении равенства комплексных амплитуд огибающей двух низкочастотных мод в каждом параметрическом осцилляторе ($b_1 = b_2$, $b_3 = b_4$ и $b_5 = b_6$), инкрементов нарастания высокочастотных мод ($\eta = \eta_1 = \eta_2 = \eta_3$), декрементов низкочастотных мод ($\nu = \nu_1 = \nu_2 = \nu_3$), частотных отстроек от параметрического резонанса ($\delta = \delta_1 = \delta_2 = \delta_3$), а также произвольных констант у высокочастотных ($c_0 = c_{01} = c_{02} = c_{03}$) и низкочастотных ($c_1 = c_{11} = c_{12} = c_{13}$, $c_2 = c_{21} = c_{22} = c_{23}$) мод. Видно, что в системе наблюдается режим перемежаемости типа “on-off”, который характеризуется длительными интервалами хаотической динамики малой амплитуды, которые прерываются одиночными светлыми импульсами гигантской амплитуды, в которые вложены последовательности более коротких импульсов огибающей. Для высокочастотных мод вложенные импульсы огибающей являются темными, а для низкочастотных мод – светлыми.

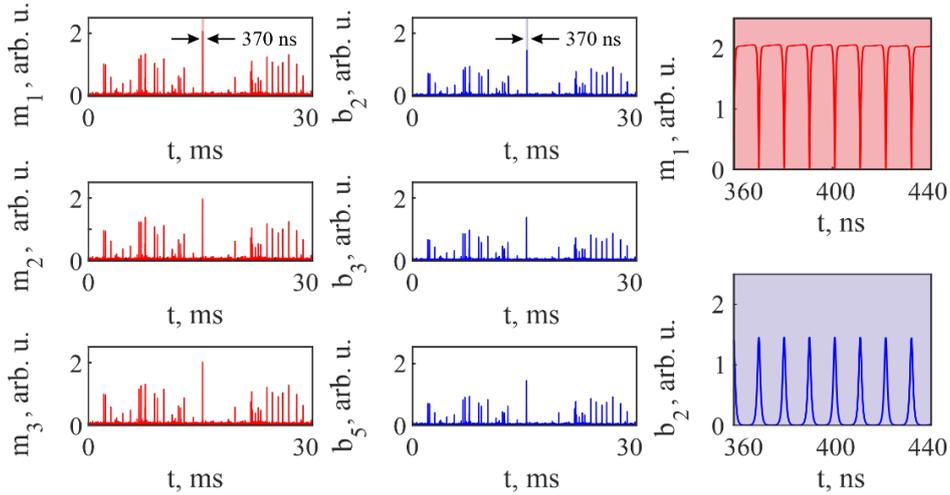


Рисунок 2. Хаотические импульсные последовательности, полученные в режиме перемежаемости типа “on-off” на высокочастотных модах (левый столбец) и низкочастотных модах (центральный столбец) первого (верхняя строка), второго (центральная строка) и третьего (нижняя строка) однонаправленно связанных параметрических осцилляторов Вышкинд-Рабиновича. В правом столбце показаны увеличенные фрагменты последовательностей светлых (верхний рисунок) и темных (нижний рисунок) импульсов огибающей, которые являются вложенными в импульсы гигантской амплитуды, генерируемые первым параметрическим осциллятором. Расчеты выполнены для $c_0 = 1497 \text{ мкс}^{-1}$, $c_1 = 745 \text{ мкс}^{-1}$, $c_2 = 752 \text{ мкс}^{-1}$, $\delta = 0.01 \text{ мкс}^{-1}$, $\eta = 0.7 \text{ мкс}^{-1}$ и $\nu = 10 \text{ мкс}^{-1}$.

Как следует из результатов, представленных на рисунке 3а, в системе трех однонаправленных связанных параметрических осцилляторов, работающих в режиме перемежаемости типа “on-off”, на зависимости времени автокорреляции высокочастотной моды от изменения коэффициента связи одного из трех параметрических осцилляторов наблюдается ярко выраженный резонансный максимум. Данному резонансному максимуму соответствуют практически одинаковые значения каждого из трех коэффициентов связи. Аналогичный максимум наблюдается и на зависимостях, полученных при изменении инкремента нарастания одного из трех параметрических осцилляторов Вышкинд-Рабиновича (см. рисунок 3б). Полученные резонансные зависимости времени автокорреляции от изменения коэффициента связи или инкремента нарастания свидетельствуют о наличии в такой многосвязанной системе явления когерентного резонанса.

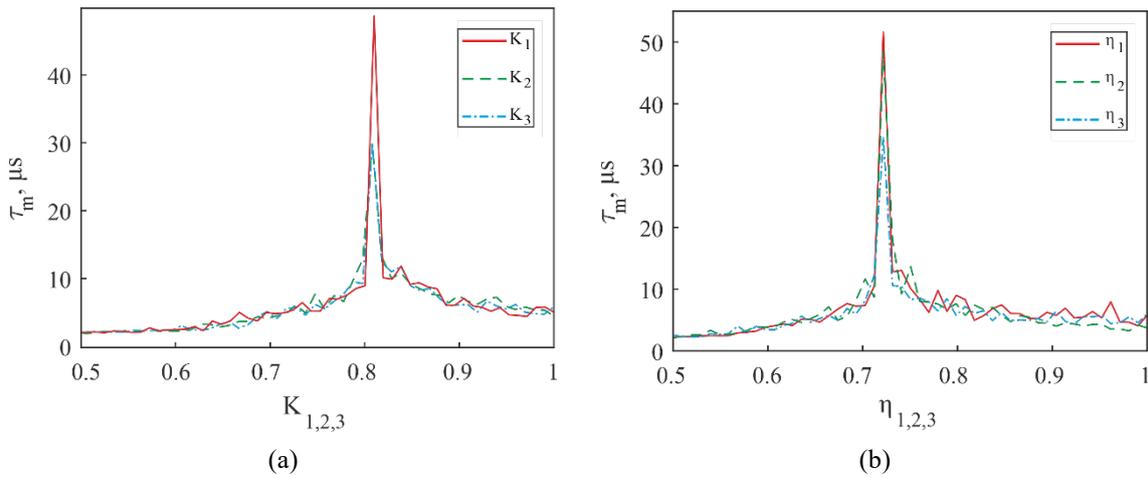


Рисунок 3. Зависимости времени автокорреляции высокочастотной моды τ_m первого параметрического осциллятора Вышкинд-Рабиновича от изменения коэффициентов связи $K_{1,2,3}$ (а) и инкремента нарастания $\eta_{1,2,3}$ (б).

4. Заключение

В заключение отметим, что полученные в работе теоретические результаты могут быть использованы для создания источников коротких и ультракоротких импульсов огибающей не только в микроволновом, но и в оптическом диапазоне частот.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-30027, <https://rscf.ru/project/23-79-30027/>

Список литературы

1. Крюков П.Г. Фемтосекундные импульсы. Введение в новую область лазерной физики. М.: Физматлит. 2008. 208 с.
2. Kalinikos B.A., Kovshikov N.G., Patton C.E. Self-generation of microwave magnetic envelope soliton trains in yttrium iron garnet thin films// Phys. Rev. Lett. - 1998. - V. 80. – No 19. - P. 4301-4304.
3. Kalinikos B.A., Scott M.M., Patton C.E. Self-generation of fundamental dark solitons in magnetic films// Phys. Rev. Lett. - 2000. - V. 84. – No 20. - P. 4697-4700.
4. Демидов В.Е., Ковшиков Н.Г. Механизм возникновения и стохастизации автомодуляции интенсивных спиновых волн// ЖТФ. - 1999. - Т. 69. - № 8. - С. 100-103.
5. Pikovsky A., Kurths J. Coherence resonance in a noisedriven excitable system// Phys. Rev. Lett. - 1997. - V. 78. – No 5. - P. 775–778.
6. Palenzuela C., Toral R., Mirasso C.R., Calvo O., Gunton J.D. Coherence resonance in chaotic systems// Europhys. Lett. - 2001. - V. 56. – No 3. - P. 347–353.
7. Liu Z. and Lai Y.-C. Coherence resonance in coupled chaotic oscillators// Phys. Rev. Lett. - 2001. - V. 86. – No 21. – P. 4737.