

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра электроники, колебаний и волн

**Нелинейная динамика кольцевой автоколебательной системы с
Т-образным магنونным микроволноводом**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 4031 группы
направления 03.03.03 «Радиофизика»
Института Физики
Рябинина Егора Алексеевича

Научный руководитель
старший преподаватель кафедры
электроники, колебаний и волн



А.С. Бир

Заведующий кафедрой
электроники, колебаний и волн.
к.ф.-м.н., доцент



С.В. Гришин

дата, подпись
29.05.2026г.

дата, подпись
29.05.2026 г.

Саратов 2026 год

Введение

Актуальность темы работы.

Спиновые волны (магноны) – волны намагниченности в ферромагнетиках – активно исследуются для создания устройств СВЧ-электроники нового поколения. Благодаря малой групповой скорости, широкому диапазону частот (до 40 ГГц) и низким потерям, они позволяют строить фазовращатели, фильтры, линии задержки. Особый интерес вызывают нелинейные эффекты – параметрические процессы, солитоны, хаос.

Ключевую роль в нелинейной спин-волновой электронике играют нерегулярные (Γ -образные, T -образные) магнонные микроволноводы. В отличие от регулярных, где распространяется только один тип волн, в нерегулярных структурах благодаря изгибам возможно одновременное существование волн с нормальной и аномальной дисперсией (поверхностных – ПМСВ, и обратных объёмных – ООМСВ), а также конкуренция трёх- и четырёхволновых взаимодействий.

В активных кольцевых резонаторах с Γ -образными волноводами получены ультракороткие солитонные комплексы [1,2]. Недавно открыто новое явление – детерминированный когерентный резонанс (ДКР), когда хаотическая динамика сменяется когерентным периодическим режимом без внешнего шума, только за счёт изменения управляющего параметра [4].

Цель работы – экспериментальное исследование ДКР в кольцевой автоколебательной системе с T -образным магнонным микроволноводом.

Задачи: микромагнитное моделирование магнонных микроволноводов, создание экспериментальной установки, измерение АЧХ и мощностных характеристик, исследование режимов генерации и поиск ДКР.

Основное содержание работы

Глава 1. Расчет амплитудно-частотных и дисперсионных характеристик магннных микроволноводов в среде микромагнитного моделирования MuMax³

1.1. Результаты численного моделирования характеристик регулярногопрямоугольного магннного микроволновода

Моделирование основано на решении уравнения Ландау-Лифшица–Гильберта (ЛЛГ). Использован пакет MuMax³ с методом конечных разностей во временной области (FDTD), пространственный шаг 100 нм, временной шаг 75 фс.

Численно исследован регулярный магннный микроволновод из плёнки железо-иттриевого граната (ЖИГ) толщиной 12 мкм, намагниченностью насыщения $4\pi M_0 = 1750$ Гс, шириной 500 мкм, длиной 15 мм, во внешнем постоянном магнитном поле $H_0 = 275$ Э (поперечное намагничивание – ПМСВ).

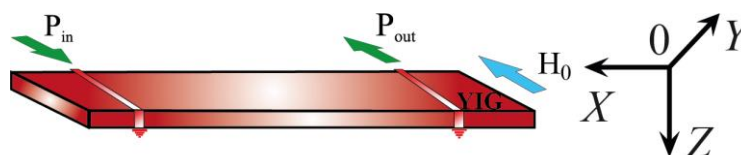


Рис. 1. Схема исследуемого регулярного магннного микроволновода.

На рис. 2а приведена АЧХ – полоса пропускания выше частоты ферромагнитного резонанса (ФМР).

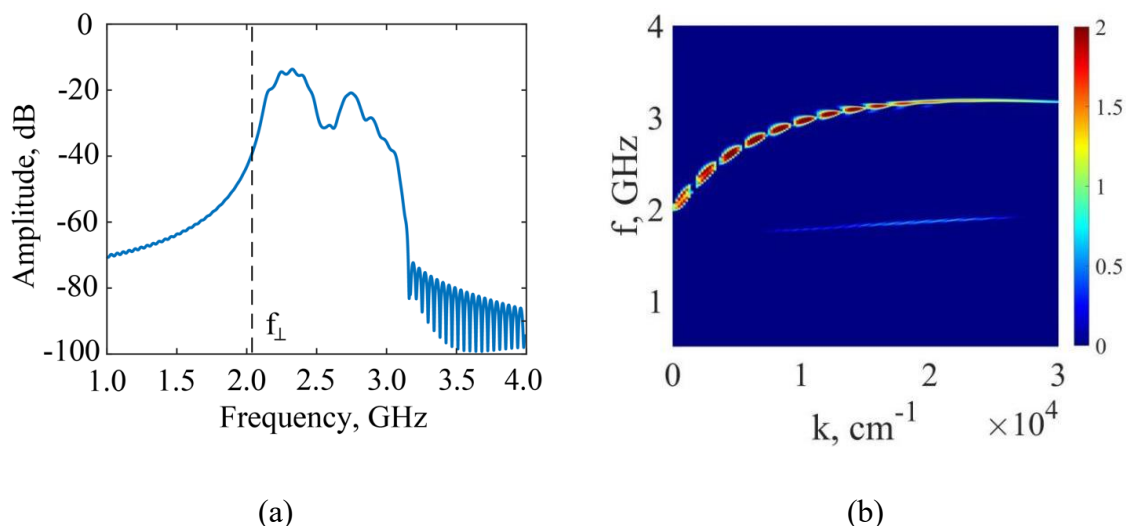


Рис. 2. АЧХ (а) и дисперсионная характеристика (б) регулярного магннного микроволновода. Расчеты выполнены для $H_0=275$ Э.

На рис. 2б – дисперсионная характеристика (нормальная положительная дисперсия). Результаты совпадают с теорией, методика верифицирована.

1.2. Результаты численного моделирования характеристик нерегулярного Т-образного магنونного микроволновода.

Схема Т-образного волновода показана на рис. 3. Ширина ножки и плеч – 500 мкм, длина ножки 8 мм, плеч – 7,5 мм каждое. Внешнее поле $H_0 = 275$ Э приложено перпендикулярно к ножке – в ножке ПМСВ, в плечах ООМСВ.

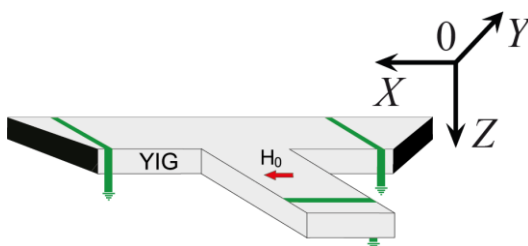


Рис. 3. Схема исследуемого нерегулярного Т-образного магنونного микроволновода.

На рис. 4 показано распределение внутреннего магнитного поля по ширине волновода (расчёт для $H_0 = 455$ Э). Поле размагничивания в центре ~ 10 Э, что приводит к сдвигу частот ФМР для ПМСВ и ООМСВ.

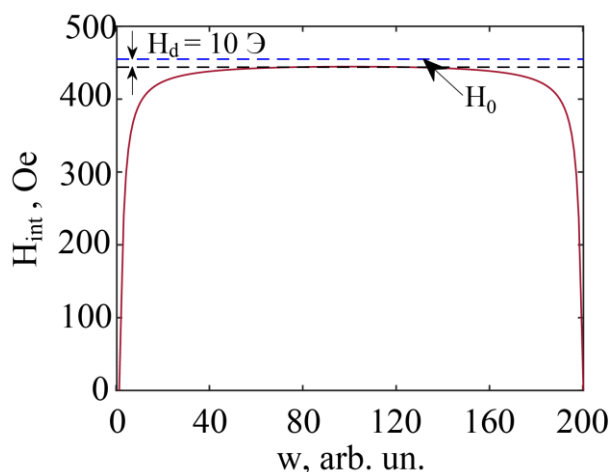


Рис.4. Распределение внутреннего магнитного поля по ширине ЖИГ-волновода шириной 500 мкм. Расчеты выполнены для $H_0=455$ Э.

На рис. 5 приведены дисперсионные характеристики ООМСВ в левом (а) и правом (б) плечах и ПМСВ в ножке (в). Видно, что эффективность возбуждения

ОМСВ в левом плече выше. Это объясняется неоднородностью поля в области соединения – асимметрия потенциального рельефа.

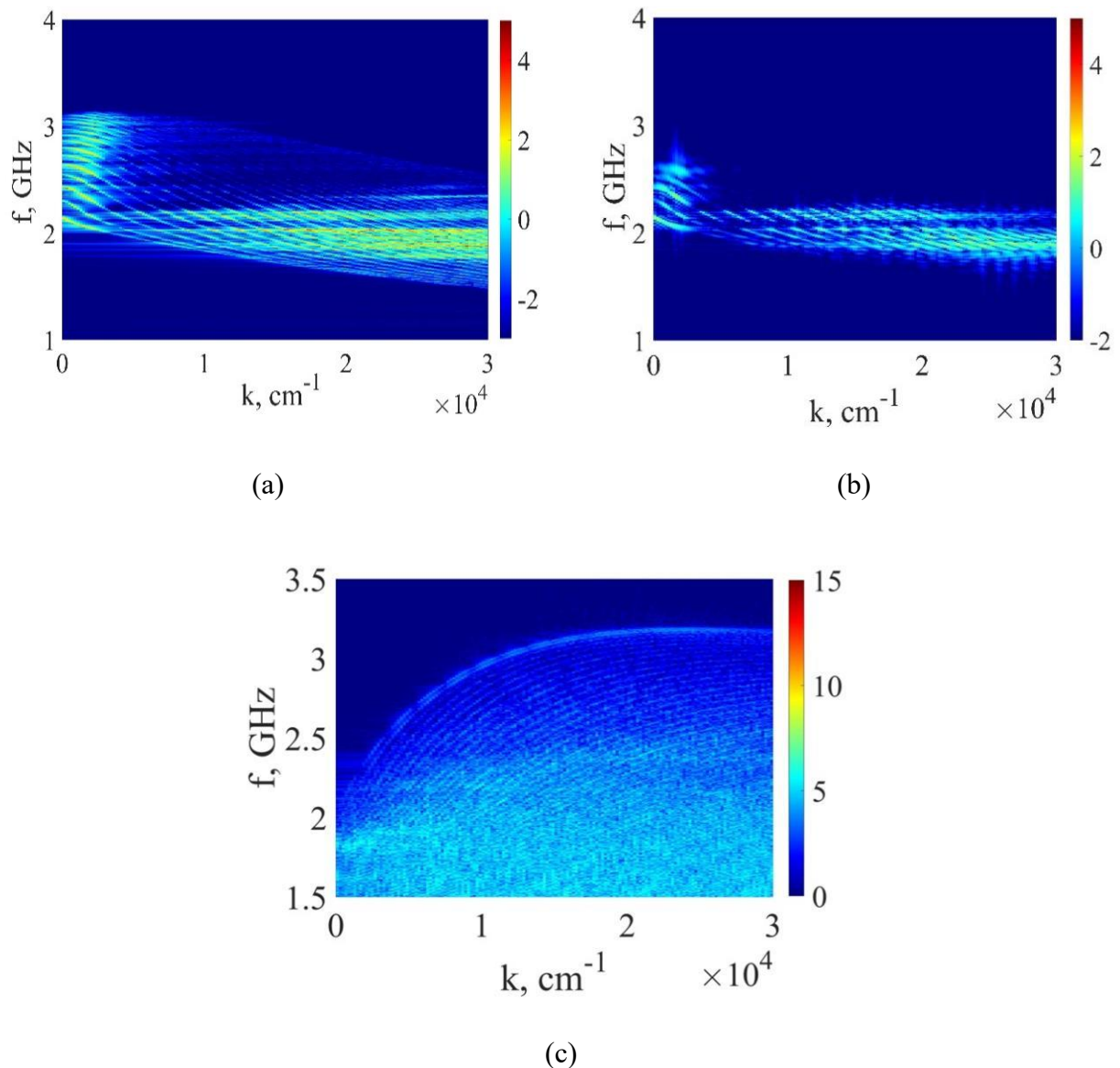


Рис.5. Дисперсионные характеристики СВ, распространяющихся в нерегулярном Т-образном магнотном микроволноводе. На (a) и (b) приведены дисперсионные характеристики ОМСВ, распространяющихся в левом (a) и в правом (b) плечах Т-образного микроволновода. На (c) приведена дисперсионная характеристика ПМСВ, распространяющейся в ножке Т-образного микроволновода. Расчеты выполнены для $H_0=275$ Э.

Таким образом, моделирование предсказывает невзаимность передачи сигнала из ножки в плечи.

Глава 2. Экспериментальное исследование режимов генерации хаотического СВЧ-сигнала в кольцевой автоколебательной системе с Т-образным магنونным микроволноводом

2.1. Экспериментальная установка.

Блок-схема кольцевой автоколебательной системы с Т-образным магنونным микроволноводом приведена на рис. 6. Т-образный ЖИГ-волновод изготовлен из пленки ЖИГ с помощью метода лазерной резки. Пленка ЖИГ имеет толщину 12 мкм и намагниченность насыщения $4\pi M_0 = 1750$ Гс. Ширина всех плеч микроволновода 500 мкм, длина его входной ножки 8 мм, а длины его выходных плеч 7.5 мм. Внешнее постоянное магнитное поле $H_0 = 455$ Э. Нерегулярный микроволновод включён в два усилительных каскада (усилители 1 и 2, аттенуаторы). Левый резонатор работает автономно ($G_L \geq 0$), правый – неавтономно ($G_R < 0$). Используются анализатор спектра и осциллограф 10 ГГц.

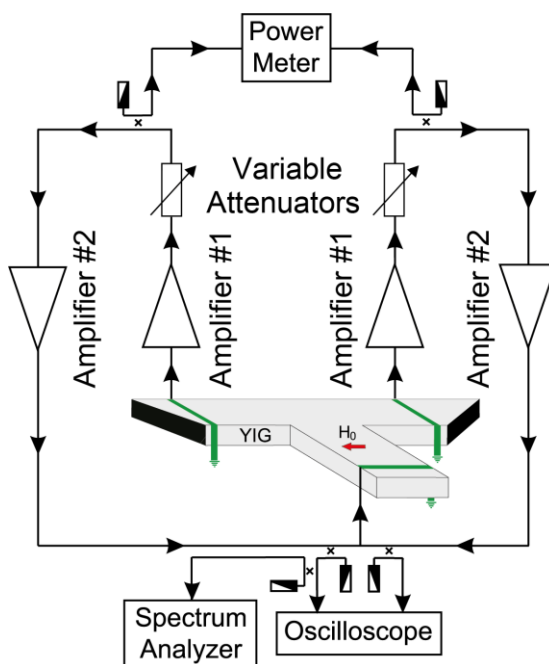


Рис.6. Блок-схема кольцевой автоколебательной системы с Т-образным ЖИГ-микроволноводом.

2.2. АЧХ и мощностные характеристики.

На рис. 7 показаны АЧХ левого и правого плеч (измерены при подаче сигнала в ножку, $P_{in} = -30$ дБм). Минимальное ослабление в левом плече -44 дБ, что на 8 дБ меньше, чем в правом. Это подтверждает невзаимность.

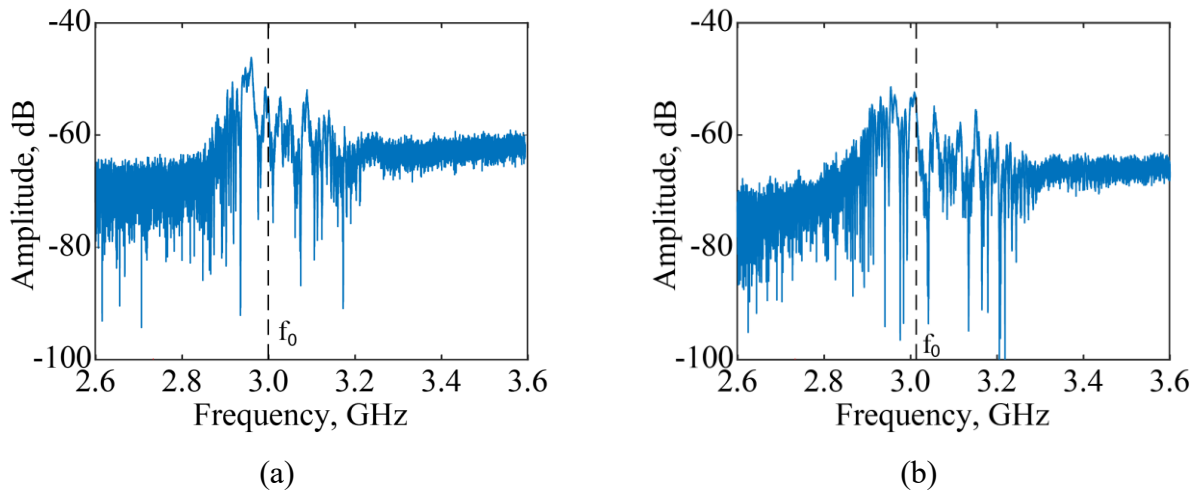


Рис.7. АЧХ Т-образного ЖИГ-микроволновода, измеренные с его левого (а) и правого (б) плеч. Измерения проведены при $H_0=455$ Э и $P_{in}=-30$ дБВт.

На рис. 8 – мощностные характеристики на частоте $f_0 = 3010$ МГц. Пороги трёхволновых процессов: $P_{th}^L = -17$ дБВт (левое), $P_{th}^R = -14$ дБВт (правое). При превышении порогов развивается хаос.

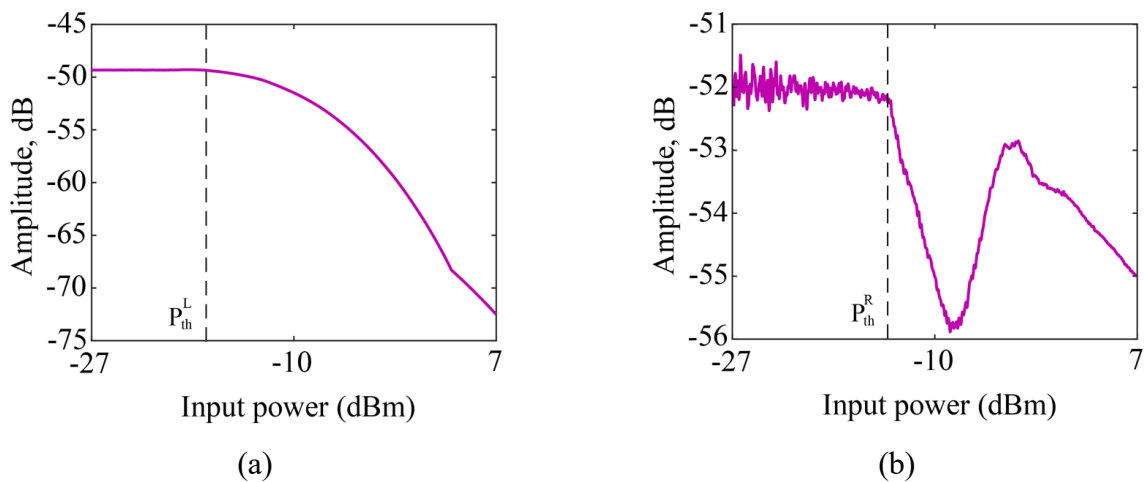


Рис.8. Мощностные характеристики Т-образного ЖИГ-микроволновода, измеренные с его левого (а) и правого (б) плеч. Измерения проведены при $H_0=455$ Э и $f_0=3010$ МГц.

2.3. Режимы генерации хаоса.

2.3.1. Левый АКР является автономным, а правый АКР работает в режиме неавтономной генерации

При $G_L = 0$ левое кольцо генерирует монохроматический сигнал на 2850 МГц (рис. 9). При $G_L = 0,1$ дБ появляются частоты автомодуляции (рис. 10а), при $G_L = 0,9$ дБ частота перескакивает на 3010 МГц и возникает неавтономная генерация

в правом кольце (рис. 10б). При $G_L = 2,1$ дБ и 6 дБ спектр становится многомодовым, хаос усиливается (рис. 11а,б).

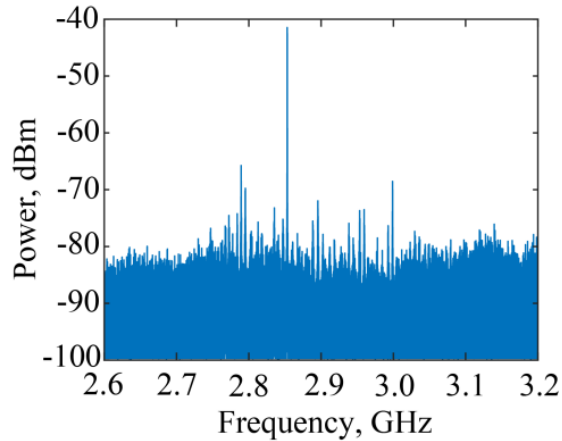
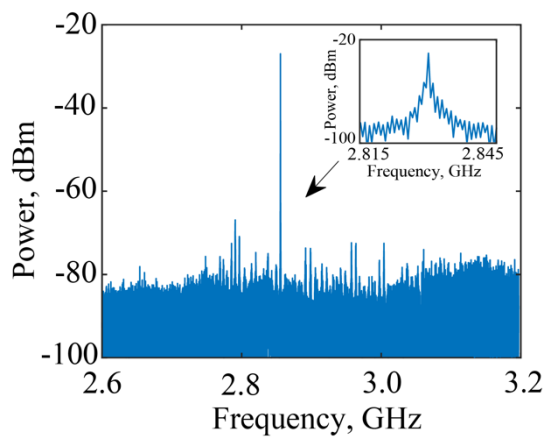
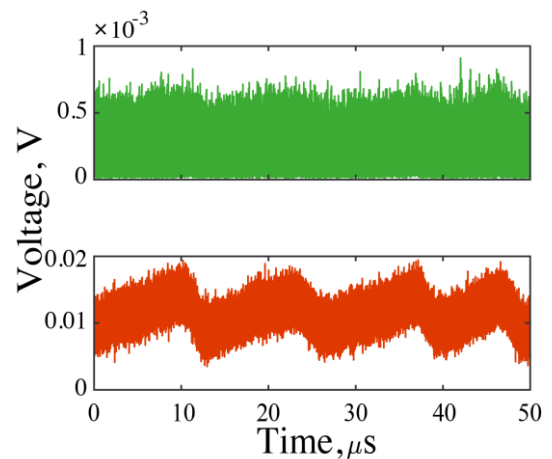


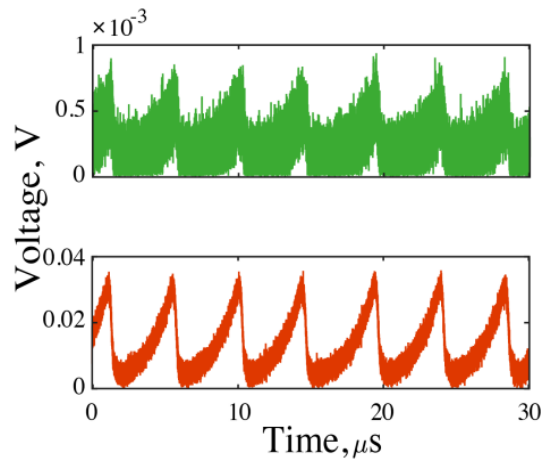
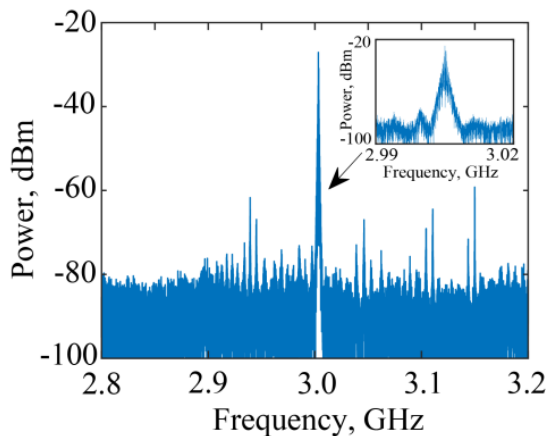
Рис.9. Спектр мощности СВЧ-сигнала, генерируемого левым активным кольцевым резонатором в генераторной схеме на основе Т-образного ЖИГ-микроволновода при $G_L = 0$ и $G_R = -3$ дБ.



(a-i)



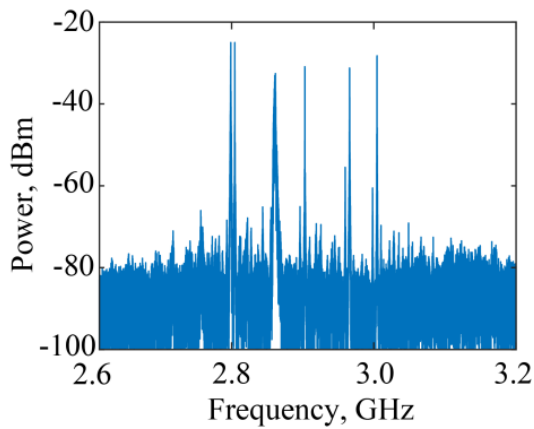
(a-ii)



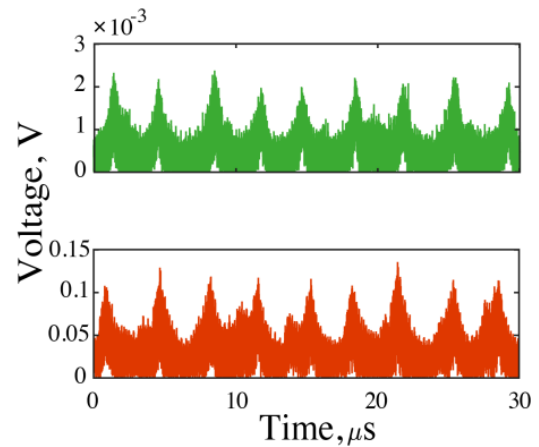
(b-i)

(b-ii)

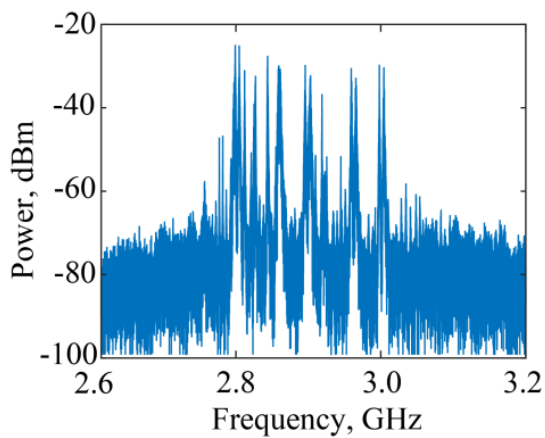
Рис.10. Спектры мощности хаотического СВЧ-сигнала (a-i, b-i) и временные ряды его огибающей (a-ii, b-ii – нижние рисунки), измеренные с выхода левого активного кольцевого резонатора, работающего в одномодовом режиме при двух значениях G_L : 0.1 дБ (a-i, a-ii) и 0.9 дБ (b-i, b-ii). Верхние рисунки на (a-ii, b-ii) соответствуют временным рядам огибающей, измеренным с выхода правого активного кольцевого резонатора при $G_R = -3$ дБ.



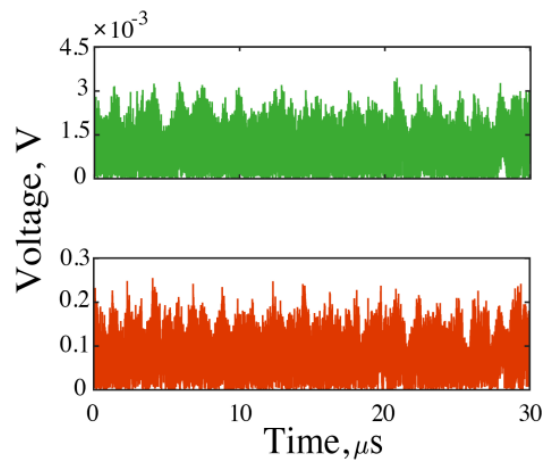
(a-i)



(a-ii)



(b-i)



(b-ii)

Рис.11. Спектры мощности хаотического СВЧ-сигнала (a-i, b-i) и временные ряды его огибающей (a-ii, b-ii – нижние рисунки), измеренные с выхода левого активного кольцевого резонатора, работающего в многомодовом режиме при двух значениях G_L : 2.1 дБ (a-i, a-ii) и 6 дБ (b-i, b-ii). Верхние рисунки на (a-ii, b-ii) соответствуют временным рядам огибающей, измеренным с выхода правого активного кольцевого резонатора при $G_R = -3$ дБ.

Зависимости времени автокорреляции, представленные на рис.12, качественно аналогичны тем, которые наблюдались ранее в системе двух двунаправленно связанных хаотических осцилляторов Лоренца [3] и были связаны с явлением ДКР. Таким образом, можно говорить о том, что и в исследуемой генераторной схеме также наблюдается явление ДКР, но механизм его возникновения не связан с режимом перемежаемости типа “on-off”, как в [3], а обусловлен переходом от режима одномодового к режиму многомодового хаоса.

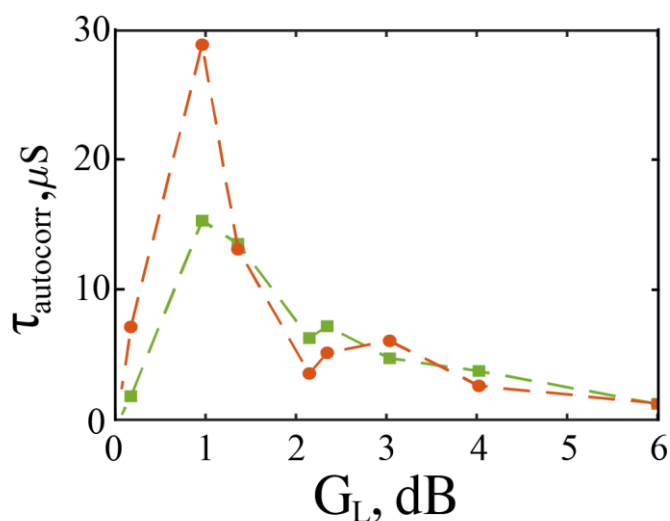
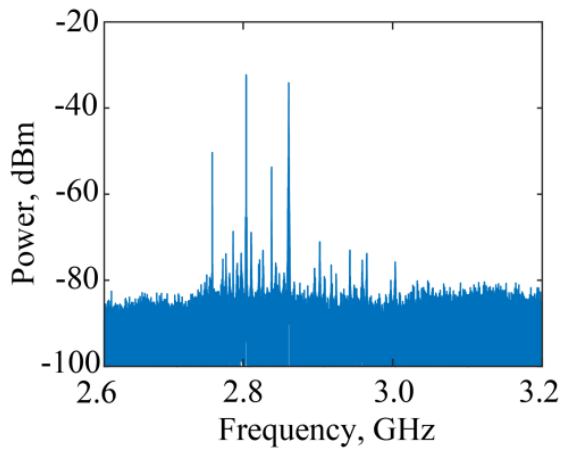


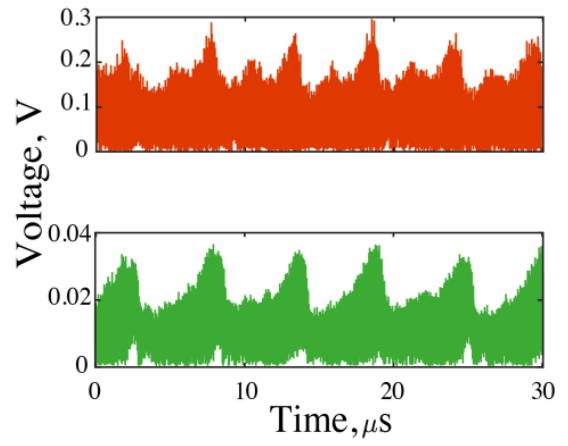
Рис.12. Зависимости времени автокорреляции огибающих хаотических СВЧ-сигналов, генерируемых в левом АКР (красные кружки) и в правом АКР (зеленые квадратики) при изменении управляющего параметра G_L (коэффициент усиления левого АКР).

2.3.2. Правый АКР является автономным, а левый АКР работает в режиме неавтономной генерации

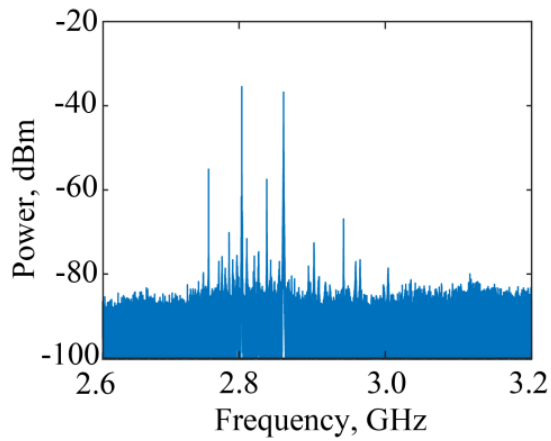
Для обратного направления (правое \rightarrow левое) резонанс не обнаружен – из-за худшей проходимости правого плеча (подтверждается АЧХ на рис. 7). Это подчёркивает роль асимметрии структуры. Результаты данного эксперимента показаны на рис.13.



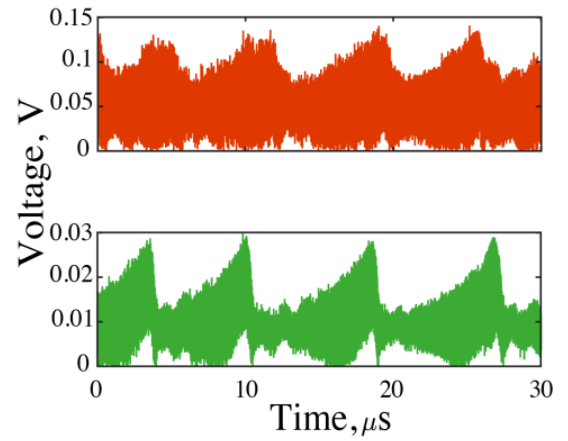
(a-i)



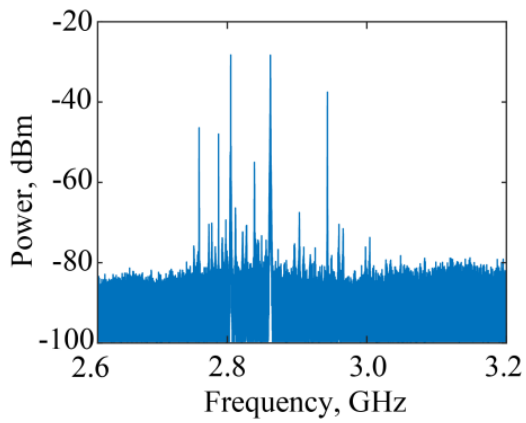
(a-ii)



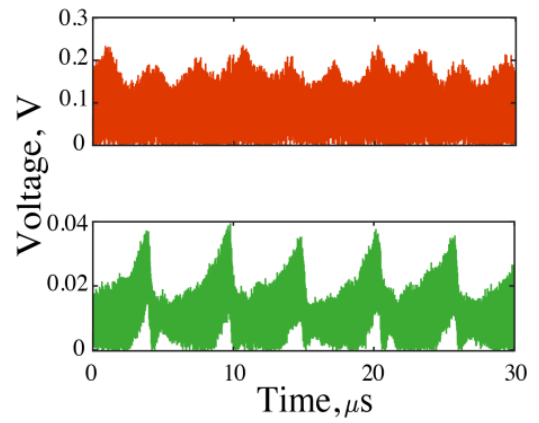
(b-i)



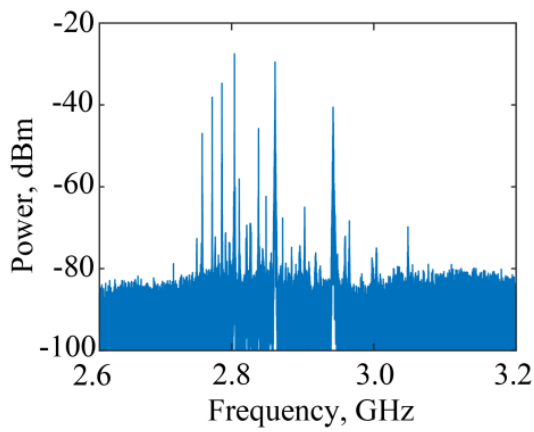
(b-ii)



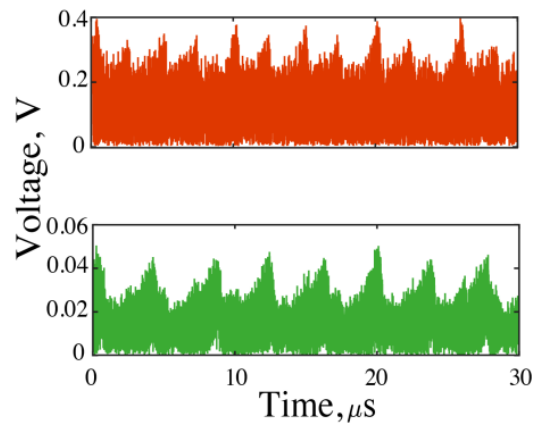
(c-i)



(c-ii)



(d-i)



(d-ii)

Рис.13. Спектры мощности хаотического СВЧ-сигнала (a-i, b-i, c-i, d-i) и временные ряды его огибающей (a-ii, b-ii, c-ii, d-ii – нижние рисунки), измеренные с выхода правого АКР, работающего в многомодовом режиме при четырех значениях G_R : 0 (a-i, a-ii), 0.3 дБ (b-i, b-ii), 0.85 дБ (c-i, c-ii) и 2.4 дБ (d-i, d-ii). Верхние рисунки на (a-ii, b-ii, c-ii, d-ii) соответствуют временным рядам огибающей, измеренным с выхода левого АКР при $G_L = 3$ дБ.

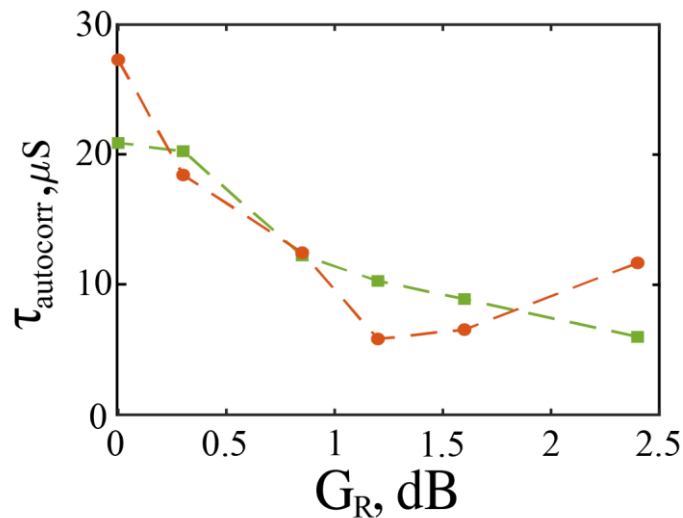


Рис.14. Зависимости времени автокорреляции огибающих хаотических СВЧ-сигналов, генерируемых в левом АКР (красные кружки) и в правом АКР (зеленые квадратики) при изменении управляющего параметра G_L – усиления левого АКР.

На рис.14 представлены зависимости времени автокорреляции для случая, когда правый АКР является автономным, а левый АКР работает в режиме неавтономной генерации. В этом случае время $\tau_{autocorr}$ не имеет резонансной зависимости от параметра G_R , как это было в предыдущей генераторной схеме

(см. Рис.12). Таким образом, если правый АКР работает в автономном режиме, а левый АКР в неавтономном режиме явления ДКР не наблюдается. Это связано с отсутствием перехода от режима одномодовой хаотической генерации к режиму многомодовой хаотической генерации.

Заключение

При проведении микромагнитного моделирования в программном пакете MuMax³ были исследованы регулярный и нерегулярный T-образный магنونные микроволноводы. Успешно освоив данный программный пакет на примере регулярно волновода было проведено изучение нерегулярного волновода при постоянном поле, направленное касательно и перпендикулярно ножке волновода, для возбуждения в той части ПМСВ. Амплитудно-частотные и дисперсионные характеристики показали, что проходимость сигнала в двух плечах разная. Также были замечены ширинные моды ПМСВ и ООМСВ, что подтверждает корректность моделирования.

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы был собран экспериментальный макет генератора хаоса, в схеме которого использовался T-образный ЖИГ-микроволновод. Такая генераторная схема представляет собой два АКР, связанных между собой через ножку T-образного ЖИГ-микроволновода. Один из АКР (левый АКР) состоит из усилительного каскада, охваченного цепью ЗОС через входную ножку и выходное левое плечо T-образного ЖИГ-микроволновода. Другой АКР (правый АКР) также состоит из усилительного каскада, охваченного цепью ЗОС, но уже через выходное правое плечо T-образного ЖИГ-микроволновода и его входную ножку.

Установлено, что при работе левого АКР в режиме автономной генерации, а правого АКР в неавтономном режиме, левый АКР демонстрирует различные режимы генерации при изменении его параметра усиления: режим генерации монохроматического СВЧ-сигнала, режим генерации одномодового (узкополосного) хаотического СВЧ-сигнала и режим генерации многомодового

(широкополосного) хаотического СВЧ-сигнала. При этом установлено, что правый АКР демонстрирует аналогичные режимы генерации хаотического СВЧ-сигнала в неавтономном режиме. Показано, что переход от одномодового режима хаотической генерации к генерации многомодового хаоса сопровождается явлением ДКР. Максимальное значение времени автокорреляции хаотического СВЧ-сигнала, генерируемого в обоих АКР, наблюдается при значении коэффициента усиления левого АКР, соответствующего границе перехода от одномодового к многомодовому хаосу. В левом АКР максимальное значение времени автокорреляции в два раза больше аналогичного значения, полученного в правом АКР.

Также было установлено, что при работе правого АКР в режиме автономной генерации, а левого АКР в неавтономном режиме, правый АКР демонстрирует только режимы генерации многомодового хаоса при изменении его параметра усиления. Аналогичные режимы демонстрирует и неавтономный левый АКР. В такой генераторной схеме явление ДКР в обоих АКР не наблюдается.

Список литературы

1. 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.
2. Комков П.С., Пыхтунов Д.С., Романенко Д.В., Скороходов В.Н., Гришин С.В. Когерентный резонанс в микроволновых генераторах хаоса// *Изв. ВУЗов – Прикладная нелинейная динамика.* 2025. Т. 33, № 3. С. 322-340.
3. Komkov P.S., Moskalenko O.I., Semenov V.V., Grishin S.V. Deterministic Coherence and Anti-Coherence Resonances in Two Coupled Lorenz Oscillators: Numerical Study versus Experiment// *Chaos, Solitons and Fractals.* 2026. Vol. 209, Part 2. P. 118459.
4. Vansteenkiste A., Leliaert J., Dvornik M., Helsen M., Garcia-Sanchez F., Van Waeyenberge B. The design and verification of MuMax3 // *AIP Advances.* 2014. Vol. 4, no. 10. P. 107133.
5. Davies C.S., Francis A., Sadovnikov A.V., Chertopalov S.V., Bryan M.T., Grishin S.V., Allwood D.A., Sharaevskii Y.P., Nikitov S.A., and Kruglyak V.V. Towards graded-index magnonics: Steering spin waves in magnonic networks // *Phys. Rev. B.* 2015. Vol. 92, 020408(R).
6. Sadovnikov A.V., Davies C.S., Grishin S.V., Kruglyak V.V., Romanenko D.V., Sharaevskii Y.P., and Nikitov S.A. Magnonic beam splitter: The building block of parallel magnonic circuitry // *Appl. Phys. Lett.* 2015. Vol. 106, 192406.
7. Landau L. D., Lifschitz E. M. On the Theory of the Dispersion of Magnetic Permeability in Ferromagnetic Bodies // *Phys. Z. Sowjet.* 1935. Vol.8. P. 153.
8. Gilbert T. A Lagrangian formulation of the gyromagnetic equation of the magnetization field // *Phys. Rev.* 1955. Vol. 100. P. 1243.
9. А.В. Вашковский, В.С. Стальмахов, Ю.П. Шараевский. Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот. Изд-во Саратовского университета, 1993. 311 с.

10. Sadovnikov A. V., Davies C. S., Kruglyak V. V., Romanenko D. V., Grishin S. V., Beginin E. N., Sharaevskii Yu. P., Nikitov S. A. Propagation and transformation of magnetostatic spin waves in curved magnonic waveguides // *Physical Review B*. 2017. Vol. 96. No. 6. 060401(R). DOI: 10.1103/PhysRevB.96.060401.
11. Бир А.С., Гришин С.В. Генерация темных многосолитонных комплексов в магнонном кольцевом резонаторе с управлением дисперсией и конкурирующими нелинейными спин-волновыми взаимодействиями // *Письма в ЖЭТФ*. 2019. Т. 110, вып. 5. С. 348-353
12. 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.
13. Демидов В.Е., Ковшиков Н.Г. Стохастическая генерация при параметрическом возбуждении спиновых волн в пленках железоиттриевого граната // *Письма в ЖТФ*. 1998. Т. 24, No 7. С. 66–72.