Режимы развитого хаоса в гиротронах и гироусилителях с запаздывающей обратной связью

Р. М. Розенталь¹,* Н. С. Гинзбург¹, И. В. Зотова¹, О. Б. Исаева^{2,3}, А. Г. Рожнев^{2,3}, А. С. Сергеев¹

Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950,

Нижний Новгород. БОКС–120, ул. Ульянова, 46 ²Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

Россия, 410012, Саратов, ул. Астраханская, 83

³Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН

Россия, 410019, Саратов, ул.Зеленая, 38

(Статья поступила 24.07.2017; Подписана в печать 16.10.2017)

Рассмотрены характеристики излучения гироусилителей (гироклистрона и гиро-ЛБВ на основе винтового гофрированного волновода) с запаздывающей обратной связью и гиротрона, работающего в режиме большой надкритичности. Показано, что в миллиметровом диапазоне длин волн данные приборы могут генерировать хаотические колебания относящиеся к категории «гиперхаоса» с относительной шириной спектра достигающей 10%.

РАСS: 84.40.Ik, 05.45.-а УДК: 621.385.69 Ключевые слова: гиротрон, гироклистрон, гиро-ЛБВ, развитый хаос.

введение

Для ряда практических задач, например, для тестирования электропрочности многочастотных волноведущих трактов [1], нагрева плазмы [2], специальных локационных приложений [3] представляет интерес генерация мощного широкополосного хаотического СВЧ излучения. В сантиметровом и более длинноволновых диапазонах для этих целей могут быть использованы черенковские [4–8] и магнетронные [9] приборы. Вместе с тем, при переходе в миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны мощность таких приборов существенно снижается. В указанных диапазонах для генерации мощного излучения перспективным выглядит использование разновидностей мазеров на циклотронном резонансе (МЦР) [10].

В данной работе показано, что в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн в МЦР могут быть получены режимы хаотической генерации с относительной шириной полосы, измеряемой по принятому [11, 12] в теории широкополосных сигналов уровню -10 dB, достигающей 10%. В частности, рассмотрены характеристики излучения гироусилителей (гироклистрона и гиро-ЛБВ на основе винтового гофрированного волновода) с запаздывающей обратной связью (ЗОС) и гиротрона, работающего в режиме большой надкритичности (превышения рабочего тока над стартовым значением). При этом во всех приборах генерируемые хаотические колебания могут быть отнесены к категории «гиперхаоса», существование которого в гироприборах впервые было показано в работах [13, 14].

1. ГИРО–ЛБВ С ЗАПАЗДЫВАЮЩЕЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Разработанные в ИПФ РАН гиро-ЛБВ с рабочим пространством в виде волновода с многозаходной винтовой гофрировкой, на которой осуществляется связь бегущей и квазикритической волн [15, 16], обладают рядом уникальных характеристик, включая мощность, эффективность, рабочий диапазон и ширину полосы усиления. Генерация шумоподобных сигналов в таких усилителях может быть достигнуто при введении внешней запаздывающей обратной связи и реализации режима динамического хаоса. Фактически, начиная с работ [17, 18] вплоть до настоящего времени [19], подобный метод активно исследуется в электронике СВЧ. В последнее время для гиро-ЛБВ развиты динамические модели [20], позволяющие описать усиление многочастотных сигналов с учетом реальной дисперсии электродинамической системы, конечности полосы усиления, эффектов нелинейного насыщения усиления и т.д.

Рассмотрим гиро-ЛБВ на основе винтового гофрированного волновода 3-мм диапазона [21], запитываемую приосевым винтовым электронным пучком с энергией 70 кэВ и током 10 А, в предположении, что часть выходного сигнала поступает на вход усилителя. Используя уравнения работы [22] можно показать, что оптимальные для усиления монохроматических сигналов параметры усилителя оказываются неблагоприятными для реализации хаотических режимов генерации. Это связано со слабым спадом амплитудной характеристики после насыщения (рис. 1,*a*, кривая 1), в силу чего переход к нестационарным режимам генерации требует больших значений коэффициента передачи в цепи обратной связи.

Снижение бифуркационных значений коэффициента передачи и расширение областей хаотической модуляции достигается при использовании амплитудной ха-

^{*}E-mail: rrz@appl.sci-nnov.ru



Рис. 1: *а* — амплитудные характеристики гиро-ЛБВ (зависимость сигнала на выходе A_{out} от сигнала на входе A_{in}) в режимах максимального усиления 1 и максимального спада характеристики 2; δ — спектр хаотической генерации гиро-ЛБВ с запаздывающей обратной связью

рактеристики с большей крутизной спада после насыщения. Расчеты показывают, что максимальный спад имеет место при увеличении рабочего магнитного поля на величину порядка 2% (рис. 1, а, кривая 2). При этом ширина полосы хаотической генерации достигает 10% при уровне выходной мощности 60-70 кВт (КПД \sim 9–10%). Следует отметить, что в спектре излучения четко идентифицируются компоненты «холодных» мод системы с относительно низким шумовым пьедесталом (рис. 1,б). Расстояние между спектральными компонентами может быть уменьшено за счет увеличения времени прохода сигнала по цепи обратной связи. Однако здесь существует ограничение, связанное с высоким уровнем мощности хаотической генерации. В маломощных СВЧ усилителях могут быть использованы специальные линии задержки, обеспечивающие время запаздывания вплоть до микросекундных значений [23]. В приборах с уровнем мощности в десятки киловатт в отсутствие подобных линий задержки времена запаздывания составляют величину порядка времени прохождения сигнала по волноводу обратной связи, размеры которого сравнимы с длиной усилителя. На практике можно рассчитывать на времена запаздывания в пределах $T \approx 10 \, \mathrm{hc}$, что соответствует расстоянию между спектральными компонентами $\Delta f \approx 1/T \approx 100 \,\mathrm{MF}$ ц.

2. ГИРОКЛИСТРОН С ЗАПАЗДЫВАЮЩЕЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Гироклистроны относятся к наиболее разработанным типам гироусилителей, характеризующихся комбинацией высокого КПД и коэффициента усиления [24– 26]. По аналогии с обычными клистронами введение запаздывающей обратной связи создает условия для реализации в этих приборах периодических и хаотических автомодуляционных режимов генерации [27]. Существование таких режимов впервые было показано в работе [28] в рамках приближения фиксированной структуры поля. Вместе с тем для анализа нестационарных режимов генерации более адекватным представляется использование пространственновременного подхода, основанного на описании эволюции поля параболическим уравнением, в котором фактор возбуждения находится из усредненных уравнений движения электронов [29].

Рассмотрим гироклистрон 3-мм диапазона [30], запитываемый винтовым электронным пучком с энергией 70 кэВ и током 15 А, в предположении, что часть выходного сигнала поступает на вход усилителя. Моделирование на основе уравнений работы [29], дополненных граничными и начальными условиями определяющими поступление части выходного сигнала на вход усилителя, показывает картину, качественно схожую с гиро-ЛБВ. В частности, оптимальные для усиления одночастотного излучения параметры неблагоприятны для реализации нестационарных режимов генерации. Также как и в гиро-ЛБВ это связано со слабым спадом амплитудной характеристики после насыщения (рис. 2, а, кривая 1). В данном случае увеличение крутизны спада амплитудной характеристики достигается снижением добротности выходного резонатора до значений, близких к минимальной дифракционной добротности $Q pprox Q_{\min} pprox 4\pi \left(L/\lambda
ight)^2$, где L длина резонатора, λ — длина волны [31]. Соответствующая амплитудная характеристика представлена на рис. 2,а (кривая 2).

Спектр генерации гироклистрона находится внутри полосы, ограниченной добротностью выходного резонатора, так что $\Delta f \approx f/Q$, где f — центральная частота генерации. В силу этого, относительная ширина полосы хаотической генерации составляет величину порядка 0.5% (Рис. 2, б) при уровне выходной мощности около 60 кВт (КПД ~ 6%). В спектре генерации также можно выделить собственные частоты продольных мод системы, однако, в отличие от гиро–ЛБВ, шумовой пьедестал находится на гораздо более высоком уровне.



Рис. 2: *а* — амплитудные характеристики гироклистрона при оптимальном значении добротности выходного резонатора *I* и при добротности, близкой к минимальной дифракционной *2*; *б* — спектр хаотической генерации гироклистрона с запаздывающей обратной связью



Рис. 3: Спектр генерации гиротрона при увеличении тока инжекции: a-5 A, b-10 A, s-15 A

3. ГИРОТРОН В РЕЖИМЕ БОЛЬШОЙ НАДКРИТИЧНОСТИ

В гиротронах, как наиболее распространенных разновидностях МЦР, расширение полосы излучения гиротронов может быть достигнуто за счет использования автомодуляционных режимов генерации, реализующихся при значительном превышении тока над стартовым значением [32]. Подобные режимы неоднократно наблюдались экспериментально [33–35], в частности, при установке дополнительных отражателей (диафрагм) в выходной тракт гиротрона [36–38], что позволяет снизить бифуркационные значения токов. При этом относительная ширина спектра генерации в этих экспериментах не превышала 2%.

Рассмотрим нестационарную динамики гиротрона на основе подходов, развитых в работах [39, 40] в условиях превышения тока над стартовым значением на два и более порядка. Моделирование показывает, что существенное расширение спектра хаотической генерации может быть достигнуто путем специальной подстройки гирочастоты (величины магнитного поля) относительно критической частоты рабочей моды ω_c , при которой для заданного значения поступательной скорости электронов достаточно сильно разнесены высокочастотный и низкочастотный циклотронные резонансы, возникающие при пересечении дисперсионных характеристик волноводной моды $h = c^{-1}\sqrt{\omega^2 - \omega_c^2}$ и электронного потока $\omega - hV_{||0} = \omega_H$ (где ω — частота, h — продольное волновое число, ω_H — гирочастота).

Рассмотрим гиротрон 3-мм диапазона на рабочей моде TE_{01} запитываемый винтовым электронным пучком с энергией 70 кэВ, максимальным током 15 A и питч-фактором 1.3. По мере роста тока инжекции сначала реализуется хаотическая генерация со спектром, сосредоточенным вблизи низкочастотного резонанса (рис. 3,*a*). Затем в интервале частот между низкочастотным и высокочастотным резонансами появляется шумовой пьедестал (рис. 3,*б*), спектральная мощность которого впоследствии значительно возрастает (рис. 3,*в*). Относительная ширина полосы хаотической генерации достигает величины порядка 20% (рис. 3,*в*), однако КПД при этом находится на достаточно низком уровне ~ 1.5%, что соответствует выходной мощности около 15 кВт.

УЗФФ 2017

Таблица I: Сравнительные характеристики хаотического излучения

	Гиротрон	Гироклистрон с ЗОС	Гиро-ЛБВ с ЗОС
Относительная ширина спектра	$\sim 20\%$	$\sim 0.5\%$	$\sim 10\%$
Средняя мощность сигнала	$\sim 15~ {\rm \kappa Br}$	$\sim 60~ \kappa {\rm Bt}$	$\sim 60 \div 70~$ кВт
Значения показателей Ляпунова	$\lambda_1 \tau \approx 0.63$	$\lambda_1 \tau \approx 0.43$	$\lambda_1 \tau \approx 0.24$
	$\lambda_2 \tau \approx 0.21$	$\lambda_2 \tau \approx 0.18$	$\lambda_2 \tau \approx 0.06$
	$\lambda_3 \tau \approx 0.00$	$\lambda_3 \tau pprox 0.00$	$\lambda_3 \tau \approx 0.00$



Рис. 4: Восстановленные методом запаздывания проекции фазовых портретов для реализаций амплитуды сигналов, генерируемых *а* – гиротроном, *б* – гироклистроном и *в* – гиро-ЛБВ



Рис. 5: Сечение Пуанкаре плоскостью $A(t) = A(t) + \tau$) аттрактора в восстановленном фазовом пространстве для a – гиротрона, δ – гироклистрона и a – гиро-ЛБВ

4. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ХАОТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Для доказательства гиперхаотической природы нестационарных сигналов, описанных в предыдущих разделах были проведены расчеты показателей Ляпунова для вычисленных временных реализаций выходного сигнала в гиро–ЛБВ, гироклистроне и гиротроне. Для этого использовался алгоритм из [41, 42]. Показатели Ляпунова имеют смысл скорости экспоненциального роста возмущения в единицу времени, в системах с хаотической динамикой за такую единицу времени можно брать время спадания до нуля автокорреляционной функции. Расчеты показали, что данный временной масштаб у гиротрона получается более чем в 2 раза меньше чем у гироклистрона, а у гиро-ЛБВ, в свою очередь, практически в 7 раз меньше. Спектр трех старших ляпуновских показателей (табл. 1) демонстрирует, что быстрее всего (относительно собственного временного масштаба) неустойчивость развивается в гиротроне, медленней всего — в гиро-ЛБВ. Вместе с тем, во всех трех случаях выходной сигнал отвечает критериям гиперхаотических режимов генерации, о чем свидетельствуют два положительных старших показателя Ляпунова. Кроме того, косвенным признаком является размытый, неструктурированный вид восстановленных методом запаздывания аттракторов (рис. 4) и их сечений Пуанкаре (рис. 5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный на основе усредненных уравнений анализ демонстрирует возможность реализации режимов широкополосной генерации в усилительных и генераторных схемах МЦР. При этом во всех приборах хаотические колебания могут быть отнесены к категории «гиперхаоса».

Вместе с тем, возможность использования метода медленно меняющихся амплитуд может вызвать вопросы применительно к описанию процессов, сопровождающихся сверхбыстрыми (и, соответственно, широкополосными) изменениями амплитуды выходного сигнала. Наиболее адекватным в данном случае

[1] *Anza S., Vicente C., Gil J.* et al. IEEE T-MTT. 2012. **60**, N 7. P. 2093.

- [2] Puri S. Plasma Physics. 1974. 16. P. 517.
- [3] Kulpa K. Signal Processing in Noise Waveform Radar. Boston, London: Artech House, 2013.
- [4] Анисимова Ю.В., Воронцов Г.М., Залогин Н.Н., Кислов В.Я., Мясин Е.А. Радиотехника. 2000. № 2. С. 19.
- [5] Marchewka C., Larsen P., Bhattacharjee S., Booske J., Sengele S., Ryskin N., Titov V. Phys. Plasmas. 2006. 13. P. 013104.
- [6] Lukin K. A., Kulyk V., Zemlyaniy O. V. Applications of Nonlinear Dynamics, Understanding Complex Systems. Ed. by In V., Longhini P., Palacios A. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. P. 433.
- [7] Жидков А. П. Изв. ВУЗов. Прикладная нелинейная динамика. 2014. 22, № 6. С. 42.
- [8] Дмитриев Б. С., Жарков Ю. Д., Садовников С. А., Скороходов В. Н. Изв. ВУЗов. Прикладная нелинейная динамика. 2015. 23, № 3. С. 106.
- [9] *Воскресенский С.В., Соминский Г.Г.* Радиотехника. 2000. № 2. С. 26.
- [10] Nusinovich G.S., Thumm M.K.A., Petelin M.I. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. 2014. 35, N 4. P. 325.
- [11] Рекомендации МСЭ-R SM.1755 (05/06). Характеристики сверхширокополосной технологии.
- [12] IEEE Std 1672-2006. IEEE Standard for Ultrawideband Radar Definitions. 4 May 2007.
- [13] Блохина Е.В., Кузнецов С.П., Рожнев А.Г. Письма в ЖТФ. 2006. 32, Вып. 8. С. 83.
- [14] Blokhina E. V., Kuznetsov S. P., Rozhnev A. G. IEEE Trans. Electron. Dev. 2007. 54, N 2. P. 188.
- [15] Denisov G.G., Bratman V.L., Cross A. W., He W., Phelps A. D. R., Ronald K., Samsonov S. V., Whyte C.G. Phys. Rev. Lett. 1998. 81, N 25. P. 5680.
- [16] Самсонов С.В., Гачев И.Г., Денисов Г.Г., Богдашов А.А., Мишакин С.В., Фикс А.Ш., Солуянова Е.А., Тай Е.М., Доминюк Я.В., Мурзин В.Н., Левитан Б.А. Радиотехника. 2014. № 4. С. 104.
- [17] Анисимова Ю. В., Дмитриев А. С., Залогин Н. Н., Калинин В. И., Кислов В. Я., Панас А. И. Письма в ЖЭТФ. 1983. 37, Вып. 8. С. 387.
- [18] Кац В. А., Трубецков Д. И. Письма в ЖЭТФ. 1984. 39, Вып. 3. С. 116.

представляется сравнение с результатами прямого PIC (particle-in-cells) моделирования исследуемых приборов. Такое сравнение, с использованием трехмерной версии PIC-кода KARAT [43], было выполнено ранее для гиро-ЛБВ с запаздывающей обратной связью [44] и гиротрона 8-миллиметрового диапазона [45] и продемонстрировано хорошее соответствие результатов двух методов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 16-02-00745 (в части моделирования хаотической динамики разновидностей МЦР) и № 16-02-00135 (в части расчета характеристик хаотических сигналов).

- [19] Emelyanov V. V., Girevoy R. A., Yakovlev A. V., Ryskin N. M. IEEE Trans. Electron. Dev. 2014. 61, N6. P. 1842-1847.
- [20] Ginzburg N.S., Zotova I.V., Sergeev A.S., Zaslavsky V.Yu., Zheleznov I.V., Samsonov S.V., Mishakin S. V. Phys.Plasmas. 2015. 22. P. 113111.
- [21] Mishakin S. V., Samsonov S. V., Denisov G.G. IEEE Trans. Electron. Dev. 2015. 62, N10. P. 3387.
- [22] Гинзбург Н.С., Розенталь Р.М., Сергеев А.С., Зотова И.В. Письма в ЖТФ. 2017. **43**, Вып. 3. С. 50.
- [23] *Кац В.А.* Изв.ВУЗов. Радиофизика. 1985. **28**. № 2. С. 161.
- [24] Andronov A.A., Flyagin V.A., Gaponov A.V. et al. Infrared Phys. 1978. 18. P. 385.
- [25] Nusinovich G. S. Introduction to the Physics of Gyrotrons. Baltimore: J. Hopkins Univ. Press, 2004.
- [26] Thumm M. KIT Scientific Reports. 2015. Band-Nr. 7717.
- [27] *Афанасьева В. В., Лазерсон А. Г.* Изв. ВУЗов. Прикладная нелинейная динамика. 1995. **3**, № 5. С. 88.
- [28] *Ергаков В. С., Моисеев М. А.* Радиотехника и электроника. 1986. **30**, Вып. 5. С. 962.
- [29] Ginzburg N.S., Rozental R.M., Sergeev A.S., Zotova I.V. Phys. Plasmas. 2016. 23. P. 033108.
- [30] Засыпкин Е.В., Гачев И.Г., Антаков И.И. Известия ВУЗов. Радиофизика. 2012. **55**, № 5. С. 341.
- [31] Власов С. Н., Жислин Г. М., Орлова И. М. и др. Известия ВУЗов. Радиофизика. 1969. 12, № 8. С. 1236.
- [32] Ginzburg N. S., Nusinovich G. S., Zavolsky N. A. International Journal of Electronics. 1986. 61, N 6, P. 881.
- [33] Chang T. H., Chen S. H., Barnett L. R., Chu K. R. Phys. Rev. Lett. 2001. 87, N 6. P. 064802.
- [34] Ronald K., Cross A. W., Phelps A. D. R., He W. J. Phys.
 D: Appl. Phys. 2001. 34. P. L17.
- [35] Alberti S., Ansermet J.-Ph., Avramides K.A. et al. Phys. Plasmas. 2012. **19**. P. 123102.
- [36] Глявин М. Ю., Запевалов В. Е., Куфтин А. Н., Лучинин А. Г. Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2000. 43, № 5. С.440.
- [37] Rozental R. M., Zaitsev N. I., Kulagin I. S., Ilyakov E. V., Ginzburg N. S. IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. 32, N 2. P. 418.
- [38] Rozental R. M., Ginzburg N. S., Glyavin M. Yu., Sergeev A. S. IEEE Trans. Microwave Theory And Techniques. 2006. 54, N 6. P. 2741.

- [39] Ginzburg N. S., Sergeev A. S., Zotova I. V. Phys. Plasmas. 2015. 22. P. 033101.
- [40] Rozental R. M., Ginzburg N. S., Glyavin M. Yu., Sergeev A. S., Zotova I. V. Phys. Plasmas. 2015. 22. P. 093118.
- [41] Sano M., Sawada Y. Phys. Rev. Lett. 1965. 55. P.1082.
 [42] Zeng X., Eykholt R., Pielke R. A. Phys. Rev. Lett. 1991.
- **66**. Р. Р.3229. [43] *Тараканов В. П.* В кн.: Математическое моделирование.

Проблемы и результаты. М.: Наука, 2003. С. 456.

- [44] Ginzburg N. S., Rozental R. M., Sergeev A. S. et al. Phys. Plasmas. 2016. 23. P. 103106.
- [45] Розенталь Р.М., Гинзбург Н.С., Сергеев А.С., Зотова И.В., Федотов А.Э., Тараканов В.П. ЖТФ. 2017.
 87, Вып. 10. С. 1555.

Regimes of devepoled chaos in gyrotrons and gyro-ampilifiers with delayed feedback

R. M. Rozental^{1,a}, N. S. Ginzburg¹, I. V. Zotova¹, A. G. Rozhnev^{2,3}, O. B. Isaeva^{2,3}, A. S. Sergeev¹

¹Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Research Center The Institute of Applied Physics of RAS» Nizhny Novgorod, 603950, Russia

²Saratov State University, Saratov, 410012, Russia

³Saratov Branch of Kotel'nikov Institute of Radio-engineering and Electronics of of RAS, Saratov, 410019, Russia

E-mail: ^arrz@appl.sci-nnov.ru

The characteristics of output radiation of gyro-amplifiers (such as gyroklystron and helical waveguide gyro-TWT) with delayed feedback and gyrotron, operated at the regime of high exceeding of the threshold, were studied. It was shown, that this devices could produce wideband chaotic oscillations with a relative spectrum width up to 10% at the millimeter wavelength. In all cases these regimes are referred to as hyperchaos.

PACS: 84.40.Ik, 05.45.-a *Keywords*: gyrotron, gyroklystron, gyro-TWT, developed chaos. *Received 24 July 2017*.

Сведения об авторах

- 1. Розенталь Роман Маркович науч. сотрудник; тел.: (831) 416-06-69, e-mail: rrz@appl.sci-nnov.ru.
- 2. Гинзбург Наум Самуилович докт. физ.-мат. наук, зав. отделом; тел.: (831) 416-48-16, e-mail: ginzburg@appl.scinnov.ru.
- 3. Зотова Ирина Валерьевна докт. физ.-мат. наук , вед. науч. сотрудник; тел.: (831) 416-48-16, e-mail: zotova@appl.scinnov.ru.
- 4. Исаева Ольга Борисовна доцент; тел.: (845) 227-86-85, e-mail: isaevao@rambler.ru.
- 5. Рожнев Андрей Георгиевич доцент; тел.: (845) 251-69-47, е-mail: RozhnevAG@info.sgu.ru.
- 6. Сергеев Александр Сергеевич канд. физ.-мат. наук, зав. лабораторией; тел.: (831) 416-49-01, e-mail: sergeev@appl.scinnov.ru.