

УДК 621.385.63

ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ХАОТИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ НА ОСНОВЕ СЕМЕЙСТВА ИМПУЛЬСНЫХ ЛБВ W-ДИАПАЗОНА

© 2020 г. А. А. Иванов^{1, *}, М. С. Нагорнюк¹, А. Е. Смирнов¹, М. Н. Вилков²,
Н. С. Гинзбург², Р. М. Розенталь²

¹Акционерное общество “Научно-производственное предприятие “Салют”, Нижний Новгород, Россия
²Федеральное государственное бюджетное научное учреждение “Федеральный исследовательский центр
“Институт прикладной физики Российской академии наук”, Нижний Новгород, Россия

*E-mail: antiva@mail.ru

Поступила в редакцию 26.08.2019 г.

После доработки 13.09.2019 г.

Принята к публикации 28.10.2019 г.

В рамках нестационарной распределенной модели лампы бегущей волны (ЛБВ) выполнено моделирование т. н. “шумотрона” — генератора хаотических колебаний со сплошным спектром на основе двух связанных ламп бегущей волны, одна из которых является усилителем, а вторая играет роль нелинейного элемента. Полученные результаты могут быть использованы для создания шумового генератора W-диапазона на основе экспериментально реализованных импульсных ЛБВ с уровнем выходной мощности в десятки ватт.

DOI: 10.31857/S0367676520020143

ВВЕДЕНИЕ

Генерация широкополосного хаотического излучения миллиметрового диапазона представляет значительный интерес для ряда приложений, таких как перспективные системы радиолокации [1, 2], тестирование электропрочности волноведущих трактов [3, 4], скрытая передача информации [5] и др. Одним из распространенных методов генерации хаотических сигналов является использование усилителей с запаздывающей обратной связью. Фактически, начиная с работы [6] вплоть до настоящего времени, подобный метод широко исследуется в электронике СВЧ, где в качестве усилительного элемента используются ЛБВ типа “О” сантиметрового диапазона [7–10].

Следует отметить, что основным недостатком подобных генераторов является довольно сильная изрезанность спектра излучения, который фактически представляет собой набор линий с частотами, близкими к собственным частотам мод кольцевого резонатора, формируемого петлей обратной связи. Одним из методов повышения равномерности спектра является включение в цепь обратной связи дополнительного нелинейного элемента, который обеспечивает нелинейный амплитудно-зависимый сдвиг фазы сигнала (т. н. нелинейная флуктуирующая задержка) [11–13]. Это

приводит к случайному сдвигу собственных частот кольцевого резонатора и размыванию соответствующих спектральных линий.

Важно отметить, что для анализа хаотических режимов в генераторах черенковского типа ранее преимущественно использовались модели, в которых усилитель рассматривался как сосредоточенный элемент, поведение которого описывается при помощи точечных отображений. В этой связи представляет значительный интерес исследование шумотрона на основе распределенных нестационарных моделей ЛБВ.

МОДЕЛЬ И ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

В приближении малого изменения скорости частиц процесс усиления в черенковской ЛБВ может быть описан известной системой уравнений [14–16]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial a_1}{\partial \zeta} + \frac{\partial a_1}{\partial \tau} &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} e^{-i\theta_1} d\theta_0, \\ \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial \zeta^2} &= \left(1 + v_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial \zeta}\right)^2 \operatorname{Re} \left(a_1 e^{i\theta_1}\right), \end{aligned} \quad (1)$$

где θ_1 — фаза электронов относительной синхронной волны, $\zeta = \omega C z / V_0$ и $\tau = \omega C (t - z / V_0) (1 - V_0 / V_{gr})^{-1} -$

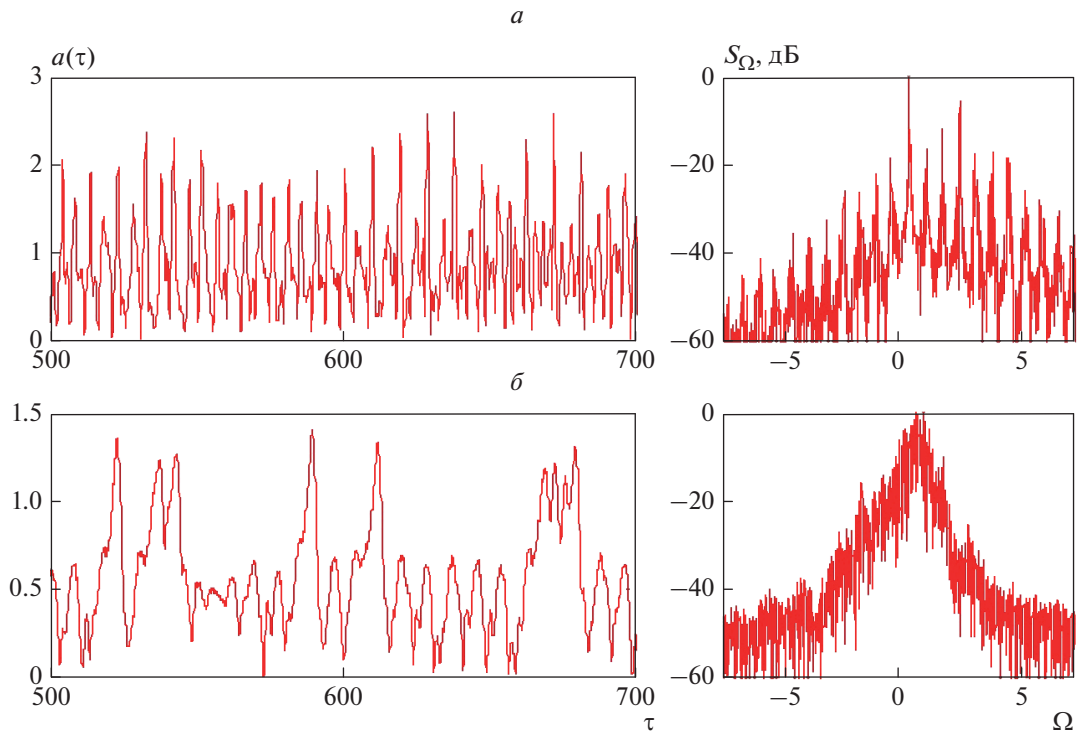


Рис. 1. Временная зависимость амплитуды (слева) и спектр (справа) излучения на выходе шумового генератора: *a* – усилитель с запаздывающей обратной связью, *б* – усилитель с нелинейным элементом в цепи обратной связи.

безразмерная координата и время, a_1 – нормированная амплитуда действующего поля, C – параметр усиления (параметр Пирса), V_{gr} – групповая скорость рабочей волны, $\gamma_0 = (1 - V_0^2/c^2)^{1/2}$ – релятивистский масс-фактор, $v = C_1 \gamma_0^2$. В предположении, что на входе в пространство взаимодействия электронный поток не имеет начальной модуляции по плотности и скорости частиц, граничные условия для уравнений движения в (1) имеют вид

$$\theta_1|_{\zeta=0} = \theta_0 \in [0, 2\pi), \quad \frac{\partial \theta_1}{\partial \zeta}|_{\zeta=0} = \Delta_1, \quad (2)$$

где Δ_1 – нормированная расстройка синхронизма.

Проанализируем сначала динамику генератора, состоящего из усилительной секции и линии задержки с коэффициентом передачи S . В этом случае уравнения (1) следует дополнить граничным условием для амплитуды поля в виде:

$$a_1(\zeta = 0, \tau) = S a_1(\zeta = L_1, \tau - T), \quad (3)$$

где T – нормированное время задержки сигнала, L_1 – нормированная длина области усиления. Выберем для проведения моделирования следующие параметры усилителя $v = 1$, $L_1 = 5$, при кото-

рых коэффициент усиления в линейном режиме составляет ~ 28 дБ, а в режиме насыщения ~ 25 дБ.

Введение обратной связи с временем запаздывания $T = 5$ создает условия для самовозбуждения системы, которое происходит при коэффициенте передачи $S = 0.04$. При $S = 0.16$ стационарные колебания сменяются режимом периодической автомодуляции. При дальнейшем увеличении коэффициента передачи происходит хаотизация колебаний (рис. 1а). Следует отметить, что спектр во всех случаях носит линейчатый характер, а спектральные компоненты излучения располагаются вблизи собственных частот мод кольцевого резонатора, расстояние между которыми определяется выражением $\Delta\Omega = 2\pi/(L_1 + T)$.

Рассмотрим далее систему, в которой в цепь обратной связи усилителя установлен дополнительный нелинейный элемент, в качестве которого используется ЛБВ в режиме группового синхронизма с $V_{gr} = V_0$, $v_2 = v_1$ и $L_2 = L_1$. В этом случае уравнения электронно-волнового взаимодействия для нелинейного элемента запишутся в виде [17]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial a_2}{\partial \zeta} &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} e^{-i\theta_2} d\theta_0, \\ \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial \zeta^2} &= \left(1 + v_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial \zeta}\right)^2 \operatorname{Re}(a_2 e^{i\theta_2}). \end{aligned} \quad (4)$$

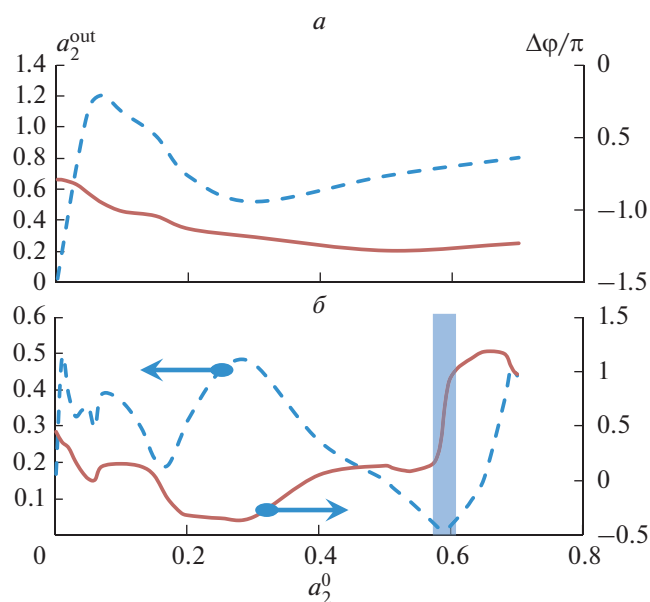


Рис. 2. Фазово-амплитудные (сплошные линии) и амплитудные (штриховые) характеристики ЛБВ в режиме усилителя (*a*) и в режиме нелинейного элемента (*б*). Затемнением выделена область быстрого нарастания набега фазы.

Будем считать, что сигнал с выхода усилителя полностью поступает на вход нелинейного элемента, что соответствует граничному условию:

$$a_2(\zeta = 0, \tau) = a_1(\zeta = L_1, \tau). \quad (5)$$

В свою очередь, цепь обратной связи замыкается путем подачи части сигнала с выхода нелинейного элемента с коэффициентом передачи S и временем запаздывания T на вход усилителя, так что

$$a_1(\zeta = 0, \tau) = S a_2(\zeta = L_2, \tau - T). \quad (6)$$

Расчеты показывают, что при изменении значения расстройки синхронизма Δ_2 существенно меняется вид фазово-амплитудной характеристики ЛБВ, представляющей собой величину набега

фазы $\Delta\phi$ волны в зависимости от ее амплитуды на входе пространства взаимодействия a_2^0 .

При $\Delta_2 = 0$ набег фазы медленно уменьшается по мере роста амплитуды, достигает минимума вблизи $a_2^0 \approx 0.5$, после чего незначительно возрастает (рис. 2*a*). По мере увеличения расстройки синхронизма на фазово-амплитудной зависимости появляется участок быстрого изменения набега фазы. Максимальная перестройка фазы реализуется при $\Delta_2 = 2$ и достигает $\sim\pi$ вблизи значений амплитуды входного сигнала $a_2^0 \approx 0.6$ (рис. 2*б*).

Моделирование систем уравнений (1), (4), связанных граничными условиями (5), (6), подтвердило возможность повышения однородности спектра хаотической генерации в рассматриваемой системе. При оптимальном значении коэффициента передачи S спектр выходного излучения характеризовался гораздо более высокой степенью заполнения (рис. 1*б*).

ВОЗМОЖНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ШУМОТРОНА W-ДИАПАЗОНА

Режимы генерации со сплошным спектром предполагается в дальнейшем экспериментально реализовать на основе импульсных ЛБВ W-диапазона [18]. В этих приборах используется замедляющая система типа “петляющий волновод”, как наиболее полно отвечающая требованиям по величине ускоряющего напряжения, сопротивления связи и широкополосности. Одновременно такая цельнометаллическая замедляющая системы обладает высокой теплостойкостью и механической прочностью. В настоящее время изготовлена серия усилителей малой и большой мощности (рис. 3), основные параметры которых представлены в табл. 1. Использование в качестве нелинейного элемента в цепи обратной связи ЛБВ малой мощности позволяет заметно повысить общую эффективность генерации хаотического излучения.

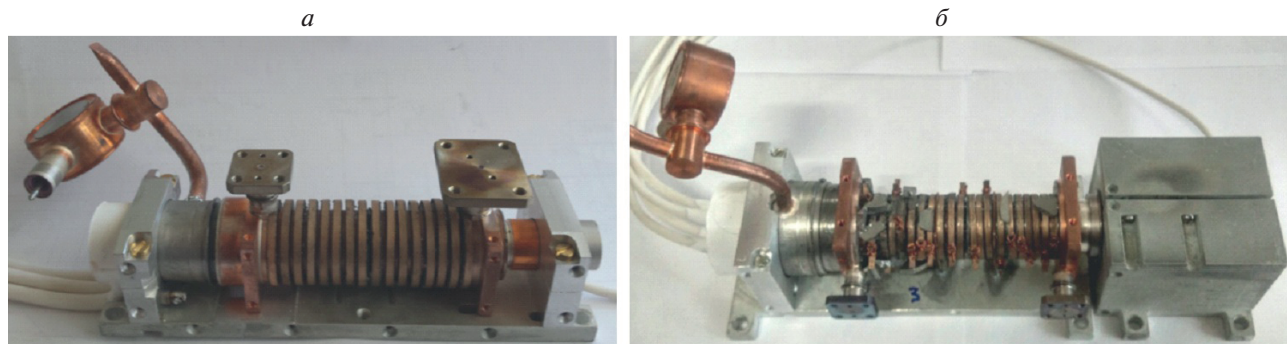


Рис. 3. Внешний вид макетов ЛБВ: *a* – малой мощности (нелинейный элемент), *б* – большой мощности (усилитель).

Таблица 1. Основные параметры экспериментальных макетов ЛБВ W-диапазона

	ЛБВ малой мощности	ЛБВ большой мощности
Коэффициент усиления, дБ	26	32.2
Выходная мощность, Вт	5	50
Ширина полосы, %	2	6
Ускоряющее напряжение, В	9300	11800
Потенциал анода, В	–	7300
Ток пучка, мА	50	110
Токопрохождение, %	90	85–95
Напряжение коллектора, В	4000	3600
КПД электронный/технический, %	1.1/2.5	3.8/12.6
КСВН по входу и выходу		1.5

Вместе с тем значительный практический интерес представляет повышение выходной мощности усилителей, прежде всего за счет повышения эффективности электронно-волнового взаимодействия. Достичь этого позволяет введение выходной секции замедляющей системы с измененной фазовой скоростью замедленной волны. Предварительные расчеты показывают, что наличие такой секции, составляющей 15% от общей длины, со скачком замедления в 6% увеличивает электронный КПД до 8% и, соответственно, выходную мощность до 100 Вт. Одновременно рассматривается возможность увеличения тока пучка или уменьшение диаметра пролетного канала, требующие соответствующего увеличения фокусирующего магнитного поля. Это позволит транспортировать в пролетном канале диаметром 0.45 мм электронный пучок с током до 200 мА с неизменным заполнением канала. Вместе с тем это приведет к увеличению тепловой нагрузки на коллектор, который при напряжении рекуперации около 5000 В должен будет рассеивать до 1000 Вт мощности, что потребует жидкостного охлаждения и существенно ограничит область применения прибора. Лучшим вариантом для целей энергетики будет уменьшение диаметра пролетного канала с неизменным током пучка. Как показывают расчеты, амплитуда периодического фокусирующего магнитного поля порядка 5000 Гс позволит достичь 100% токопрохождения пучка с током 110 мА с коэффициентом заполнения 0.6 в канале диаметром не менее 0.35 мм. При этом сопротивление связи поднимется на 25%, что приведет к уменьшению длины замедляющей системы, а выходная мощность при этом вырастет на 50%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Схема построения хаотических широкополосных генераторов со сплошным спектром излучения на основе усилителей с нелинейным элементом в цепи обратной связи является достаточно

универсальной. Опыт исследования ЛБВ дециметрового и сантиметрового диапазонов демонстрирует относительную простоту построения таких генераторов и их высокую степень надежности [19, 20], что позволяет рассчитывать на создание аналогичных систем в более коротковолновых диапазонах. Отметим, что в последнее время достигнут значительный прогресс в создании ЛБВ миллиметрового диапазона длин волн. В частности, в К α -диапазоне реализованы импульсные усилители киловаттного уровня мощности [21], а в W-диапазоне – с уровнем выходной мощности более 100 Вт [22–24]. Также сообщается о реализации терагерцовых ЛБВ в диапазоне 0.65 ТГц с выходной мощностью в сотни мВт и в диапазоне 1.03 ТГц с мощностью в десятки мВт [25, 26]. При этом широкополосное хаотическое излучение терагерцового диапазона представляет значительный интерес для перспективных методов спектроскопии [27].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 19-08-00955).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bell D.C., Narayanan R.M.* // IEEE Trans. Sign. Proc. 2001. V. 49. № 2. P. 394.
2. *Kulpa K.* Signal processing in noise waveform radar. Boston, London: Artech House, 2013. 272 p.
3. *Anza S., Vicente C., Gil J. et al.* // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 2012. V. 60. № 7. P. 2093.
4. *Qian C., Ding D., Bi J., Chen R.* // IEEE Microwave Wireless Comp. Lett. 2016. V. 26. № 2. P. 77.
5. *Дмитриев А.С.* Генерация хаоса. М.: Техносфера, 2012. 424 с.
6. *Котырев Е.А., Плисс Л.Е.* // Вопр. радиоэлектрон. Сер. общетехн. 1961. № 1. С. 24.
7. *Беляев Р.В., Кальянов Э.В., Кислов В.Я. и др.* // Радиотехн. и электрон. 1997. Т. 42. № 2. С. 188; *Belyaev R.V., Kalyanov E.V., Kislov V.Ya.* // J. Commun. Tech. Electron. 1997. V. 42. № 2. P. 172.

8. *Marchewka C., Larsen P., Bhattacharjee S. et al.* // Phys. Plasmas. 2006. V. 13. № 1. Art. № 013104.
9. *Жидков А.П.* // Изв. вузов. Прикл. нелин. динам. 2014. Т. 22. № 6. С. 42.
10. *Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Садовников С.А. и др.* // Изв. вузов. Прикл. нелин. динам. 2015. Т. 23. № 3. С. 106.
11. *Калинин В.И., Залогин Н.Н., Кислов В.Я.* // Радиотехн. и электрон. 1983. Т. 28. № 10. С. 2001.
12. *Беляев Р.В., Воронцов Г.М., Залогин Н.Н. и др.* // Радиотехн. и электрон. 1985. Т. 30. № 3. С. 504.
13. *Кислов В.Я.* // Радиотехн. и электроника. 1993. Т. 38. № 10. С. 1783; *Kislov V.Y.* // J. Commun. Technol. Electron. 1993. V. 38. № 16. P. 82.
14. *Гинзбург Н.С., Кузнецов С.П., Федосеева Т.Н.* // Изв. вузов. Радиофиз. 1978. Т. 21. № 7. С. 1037; *Ginzburg N.S., Kuznetsov S.P., Fedoseeva T.N.* // Radiophys. Quant. Electron. 1978. V. 21. № 7. P. 728.
15. *Korovin S.D., Eltchaninov A.A., Rostov V.V. et al.* // Phys. Rev. E. 2006. V. 74. № 1. Art. № 016501.
16. *Рыскин Н.М.* // Изв. вузов. Радиофиз. 2004. Т. 47. № 2. С. 129; *Ryskin N.M.* // Radiophys. Quant. Electron. 2004. V. 47. № 2. P. 116.
17. *Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 1. М.: Физматлит, 2003. 496 с.
18. *Иванов А.А.* // Изв. вузов. Радиофиз. 2016. Т. 59. № 8–9. С. 721; *Ivanov A.A.* // Radiophys. Quant. Electron. 2017. V. 59. № 8–9. P. 648.
19. *Залогин Н.Н.* // Радиотехн. 2005. № 3. С. 5.
20. *Мясин Е.А.* // Изв. вузов. Прикл. нелин. динамика. 2014. Т. 22. № 2. С. 104.
21. *Белявский Б.А., Бородин В.А., Носовец А.В.* // Радиотехн. и электроника. 2014. Т. 59. № 8. С. 766; *Bel-yavsky B.A., Borodin V.A., Nosovets A.F.* // J. Comm. Tech. Electron. 2014. V. 59. № 8. P. 812.
22. *Kowalski E.J., Shapiro M.A., Temkin R.J.* // IEEE Trans. Electron Devices. 2015. V. 62. № 5. P. 1609.
23. *Zhang X., Feng J., Cai J. et al.* // IEEE Trans. Electron Devices. 2017. V. 64. № 12. P. 5151.
24. *Du Y., Cai J., Pan P. et al.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2019. V. 47. № 1. P. 219.
25. *Tucek J.C., Basten M.A., Gallagher D.A. et al.* // 2016 IEEE Int. Vacuum Electronics Conf. (Monterey, 2016). P. 1.
26. *Deal W.R., Foster T., Wong M.B. et al.* // IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. (Honolulu, 2017). P. 233.
27. *Song H.-J., Shimizu N., Furuta T. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 93. Art. № 241113.