

Возможности генерации хаотического излучения с малой неравномерностью спектра на основе ЛБВ с запаздывающей обратной связью

А.А. Иванов¹, Р.М. Розенталь², М.Н. Вилков², Н.С. Гинзбург²

¹АО НПП «Салют»

²Институт прикладной физики РАН

Аннотация: Определены условия получения шумоподобного излучения с малой неравномерностью спектра в рамках нестационарной распределенной модели лампы бегущей волны с запаздывающей обратной связью. Результаты моделирования подтверждены экспериментальными исследованиями макета спиральной ЛБВ С-диапазона, в которой получены широкополосные режимы генерации с интегральной мощностью до 2 Вт.

Ключевые слова: лампа бегущей волны, запаздывающая обратная связь, шумоподобное излучение

1. Введение

В настоящее время активно исследуются процессы многочастотного СВЧ-нагрева плазмы, которые требуют непрерывного излучения сантиметрового и миллиметрового диапазонов с киловаттным уровнем выходной мощности [1,2]. При этом для подобных задач представляет интерес как излучение с дискретным набором спектральных линий, так и шумоподобное излучение со сплошным спектром.

С точки зрения получения больших мощностей привлекательной выглядит схема в которой задающий генератор ваттной мощности генерирует шумовой сигнал, который поступает на вход широкополосного усилителя с коэффициентом усиления порядка 30 дБ. В качестве подобных усилителей, к примеру, могут быть использованы гирорезонансные ЛБВ на основе винтовых гофрированных волноводов, которые в настоящее время уже реализованы в Ka- и W-диапазонах [3,4].

Одним из вариантов построения широкополосных шумовых задающих генераторов является использование СВЧ усилителей с запаздывающей обратной связью [5], в качестве которых могут быть использованы ЛБВ. Вместе с тем, в большинстве случаев спектр таких источников характеризуется значительной неравномерностью, обусловленной наличием достаточно высокочастотных собственных мод кольцевого резонатора, формируемого петлей обратной связи.

Для улучшения равномерности спектра в ИРЭ РАН было предложено включать в цепь обратной связи ЛБВ нелинейный элемент, обеспечивающий нелинейный амплитудно-зависимый сдвиг фазы сигнала (т.н. нелинейная флуктуирующая задержка) [6-8]. Это приводило к случайному сдвигу собственных частот кольцевого резонатора и размыванию соответствующих спектральных линий. Такие системы, где в качестве нелинейного элемента выступала вторая ЛБВ, работающая в сильно нелинейном режиме, получили название "шумотрон" [9].

При этом в ходе исследований также были обнаружены режимы, в которых шумоподобные сигналы с малой изрезанностью спектра наблюдались и в ЛБВ в цепь обратной связи которой включался, по сути, единственный элемент (кроме

направленного ответвителя) – регулируемый аттенуатор¹.

Очевидно, подобные режимы работы представляют значительный интерес, в силу заметного упрощения конструкции хаотического генератора (использование единственного усилителя, вместо комбинации двух усилителей).

Ниже будет показано существование режимов хаотической генерации с малой неравномерностью спектра в рамках нестационарной распределенной модели ЛБВ с линейной цепью обратной связи. Выводы теории подтверждены результатами экспериментальных исследований спиральной ЛБВ С-диапазона.

2. Исследование нестационарной модели ЛБВ

В приближении малого изменения скорости частиц процесс усиления в ЛБВО может быть описан известной системой уравнений [10,11]:

$$\frac{\partial a}{\partial \zeta} + \frac{\partial a}{\partial \tau} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} e^{-i\theta} d\theta_0$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \zeta^2} = \text{Re}(ae^{i\theta}),$$
(1)

где a – нормированная амплитуда действующего поля, $\zeta = \omega Cz/v_0$ и

$\tau = \omega C(t - z/v_0)(1 - v_0/v_{gr})^{-1}$ – нормированные координата и время, ω – частота

синхронизма, v_0, v_{gr} – поступательная скорость электронов и групповая скорость

волны, $C = \sqrt[3]{eI_0 K / (2mv_0^2)}$ – параметр усиления Пирса, I_0 – ток электронного пучка,

K – сопротивление связи, θ – фаза электронов относительной синхронной волны, m, e –

масса и заряд электрона. В предположении, что на входе в пространства взаимодействия электронный поток не имеет начальной модуляции по плотности и скорости частиц, граничные условия для уравнений движения в (1) имеют вид

$$\theta|_{\zeta=0} = \theta_0 \in [0, 2\pi), \quad \left. \frac{\partial \theta}{\partial \zeta} \right|_{\zeta=0} = \Delta,$$
(2)

где Δ – нормированная расстройка синхронизма.

Рассмотрим динамику генератора состоящего из усилителя и линии задержки с коэффициентом обратной связи S . В этом случае уравнения (1) следует дополнить граничным условием для амплитуды поля:

$$a(\zeta = 0, \tau) = S \cdot a(\zeta = L, \tau - T),$$
(3)

где T – нормированное время задержки сигнала, L – нормированная длина области усиления.

Выберем для проведения моделирования нормированную длину системы $L = 5$, при которых коэффициент усиления в линейном режиме составляет около 28 дБ, а в режиме насыщения порядка 25 дБ. Величину времени запаздывания выберем равной $T = 20$. Известно, что в такой модели при увеличении величины обратной связи

¹ К сожалению, результаты данных исследований не были опубликованы в открытых источниках. В этой связи авторы выражают глубокую признательность д.ф.-м.н., профессору А.И. Панасу, за раскрытие неизвестных ранее моментов истории шумотрона.

сначала происходит самовозбуждение на частоте одной из продольных мод кольцевого резонатора, затем стационарные колебания сменяются режимом периодической автомодуляции (Рис.2а) [12]. При дальнейшем увеличении коэффициента передачи происходит хаотизация колебаний, однако сохраняется большая неравномерность спектра, который фактически представляет собой набор изолированных линий с шумовым пьедесталом.

Как было указано выше, генерация сигналов со сплошным спектром возможна в шумотроне, представляющим собой ЛБВ, в цепь обратной связи которой включен нелинейный элемент, обладающий сильной зависимостью фазового набега от амплитуды падающей волны. При этом в качестве такого элемента используется ЛБВ, отстроенная от режима оптимального усиления. В работе [13] было показано, что модель двух связанных ЛБВ на основе уравнений (1) позволяет получить решения, соответствующие сплошному спектру генерации.

В ходе исследований было выдвинуто предположение, что функции усилителя и нелинейного элемента можно совместить при использовании ЛБВ с увеличенным значением параметра усиления Пирса. Это позволит увеличить коэффициент усиления, сохранив при этом сильную зависимость набега фазы от входной амплитуды. Моделирование системы уравнений (1) с граничными условиями (2),(3) подтвердило правильность такого предположения. При увеличении параметра Пирса и соответствующего увеличению нормированной длины до значения $L = 20$, по мере увеличения глубины обратной связи спектр излучения сначала носил линейчатый характер (Рис.1а). Однако при значении $S \approx -10$ дБ происходил достаточно резкий переход к практически сплошному спектру (Рис.1б). Заметим, что по аналогии с реальными ЛБВ на входе ЛБВ вводились дополнительные поглощения на уровне -50 дБ, предотвращающие самовозбуждение из-за численных шумов.

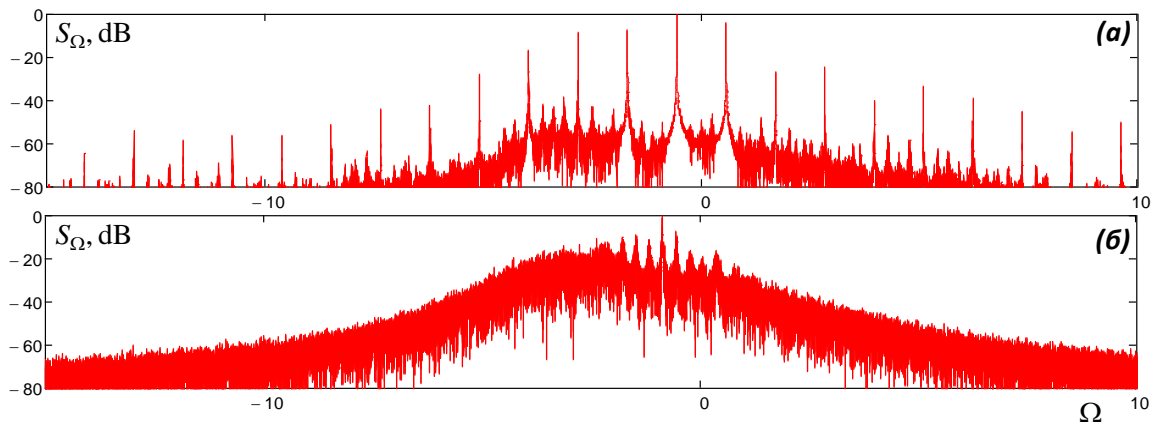


Рисунок 1. Спектр излучения в модели ЛБВ при значениях $L = 20, T = 5$:
(а) - уровень обратной связи $S = -50$ дБ; (б) $S = -10$ дБ.

3. Экспериментальное исследование спиральной ЛБВ

Для исследований был выбран макет спиральной ЛБВО С-диапазона, имеющей достаточно высокое значение сопротивления связи замедляющей системы $K \approx 40$ Ом. Коэффициент усиления в линейном режиме составлял 35-40 дБ, выходная мощность – порядка 10-15 Вт. В нормированных переменных длина пространства взаимодействия составила $L \approx 20$. Для получения нестационарных режимов генерации часть выходного сигнала отводилась и через регулируемый аттенюатор подавалась на вход лампы (Рис.4). Расчетная величины времени обратной связи при этом составила $T \approx 5$. Мощность выходного излучения измерялась калориметрической нагрузкой. Спектр излучения регистрировался спектроанализатором с шириной полосы 40 ГГц.

В области величин обратной связи $S \leq -20$ дБ в системе устанавливались режимы

периодической и хаотической автомодуляции с линейчатым спектром (Рис.2а). Однако при дальнейшем увеличении обратной связи наблюдалась перестройка системы в режим генерации со сплошным спектром (Рис.5б). Неравномерность спектра при этом уменьшалась со значений порядка 50-60 дБ до значений 10-20 дБ. Интересно отметить, что в последнем случае ширина спектра на уровне -10 дБ составила около двух октав (Рис.2б). Интегральная мощность выходного излучения, регистрируемая calorиметрической нагрузкой, достигала 2 Вт.

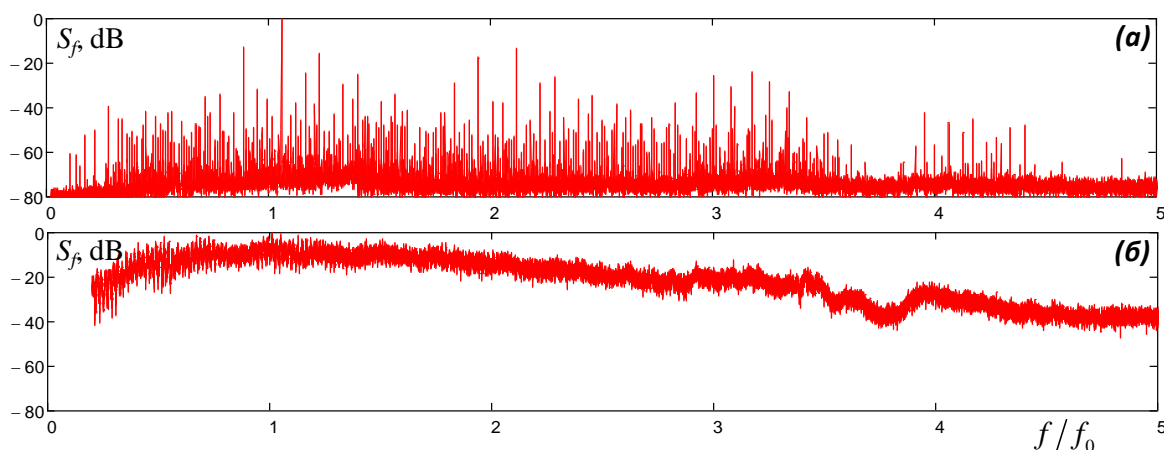


Рисунок 2. Экспериментально измеренный спектр излучения ЛБВ:
(а) - уровень обратной связи $S = -30$ дБ; (б) $S = -6$ дБ.

4. Заключение

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали возможность создания генераторов шумоподобного излучения со сплошным спектром на базе единичной ЛБВ с запаздывающей обратной связью. Учитывая универсальный характер системы уравнений (1), можно предположить, что аналогичные режимы могут быть получены и в более высокочастотных диапазонах. Это, очевидно, открывает новые перспективы исследований, учитывая что в настоящее время созданы ЛБВ с рабочими частотами более 1 ТГц [14,15].

Работа выполнена в рамках государственного задания (договор № 0035-2019-0001) и при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант №19-08-00955.

Список литературы

1. Tarvainen O. et al. Electron heating with broadband microwave radiation: A new method for improving the performances of conventional B-minimum electron cyclotron resonance ion sources // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. Sect. B. – 2007. – V. 261. – No. 1-2. – P. 1044-1047.
2. Skalyga V. et al. Suppression of cyclotron instability in Electron Cyclotron Resonance ion sources by two-frequency heating // Phys. Plasmas. – 2015. – V. 22. – P. 083509.
3. Samsonov S.V. et al. CW Ka-Band Kilowatt-Level Helical-Waveguide Gyro-TWT // IEEE Trans. Electron Dev. – 2012. – V. 59. – No. 8. – P. 2250-2255.
4. S. V. Samsonov et al. CW Operation of a W-Band High-Gain Helical-Waveguide Gyrotron Traveling-Wave Tube // IEEE Electron Dev. Lett. – 2020. – V. 41. – No. 5. – P. 773-776.
5. Генерация хаоса / Под общ. ред. Дмитриева А.С. – М.: Техносфера, 2012. - 424 с.
6. Мясин Е.А., Кислов В.Я., Богданов Е.В. Генератор сверхвысокочастотных шумовых колебаний. А.с. 1053711 СССР. Заявка 0984513 от 08.06.1983 с приоритетом от 22.06.1967.
7. Мясин Е.А., Кислов В.Я., Богданов Е.В. Способ генерирования электромагнитных шумовых колебаний. С. 1125735 СССР. Заявка 3523601 от 23.07.984 с приоритет от 22.06.1967.
8. Кислов В.Я., Мясин Е.А., Залогин Н.Н. О нелинейной стохастизации автоколебаний в электронно-волновом генераторе с задержанной обратной связью // Радиотехника и электроника. – 1980. – Т.25, №10. – С. 2160-2168.

9. Мясин Е.А. Исследования генерации СВЧ-шума в ИРЭ АН СССР 1962-1967 годов – начало нового научного направления. Лекция // Изв. ВУЗов. Прикладная нелинейная динамика. – 2012. – Т. 22, № 1. – С. 104-122.
10. Гинзбург Н.С., Кузнецов С.П., Федосеева Т.Н. Теория переходных процессов в релятивистской ЛОВ // Изв. ВУЗов. Радиопизика. – 1978. – Т. 21. – № 7. – С.1037-1052.
11. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т.1. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. - 496 с.
12. Рыскин Н.М. Исследование нелинейной динамики ЛБВ-генератора с запаздывающей обратной связью // Изв. ВУЗов. Радиопизика. – 2004. – Т. 47. – № 2. – С. 129-142.
13. Иванов А.А. и др. Возможности создания широкополосных хаотических генераторов на основе семейства импульсных ЛБВ W-диапазона // Изв. РАН. Сер. физическая. – 2020. – Т. 84. – № 2. – С. 238-242.
14. Богомолова Е.А. и др. ЛБВ миллиметрового и терагерцового диапазонов: особенности конструкций замедляющих систем и технологий изготовления // Электронная техника, сер. 1, СВЧ-техника. – 2020. – Вып. 3 (546). – С. 66-83.
15. Paoloni C. et al. Millimeter wave traveling wave tubes for the 21st Century // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. – 2020. – P. 1-37.