

# Исследование возможностей генерации широкополосного шумового излучения миллиметрового диапазона на основе ЛБВ с запаздывающей обратной связью

М.Н. Вилков, А.А. Иванов, Р.М. Розенталь

Институт прикладной физики РАН

**Аннотация:** Исследованы зависимости ширины шумоподобного излучения в модели генератора на основе ЛБВ с запаздывающей обратной связью от параметров системы. Выполнены расчеты на основе усредненных уравнений электронно-волнового взаимодействия и в рамках трехмерного PIC-моделирования. Показано, что на основе экспериментально реализованных ЛБВ W-диапазона могут быть реализованы источники шумоподобного излучения с относительной шириной спектра около 10%.

**Ключевые слова:** шумоподобные сигналы, миллиметровое излучение, лампа бегущей волны, запаздывающая обратная связь

## 1. Введение

В настоящее время активно исследуются процессы многочастотного СВЧ-нагрева плазмы, требующие непрерывного излучения сантиметрового и миллиметрового диапазонов с киловаттным уровнем выходной мощности. При этом для подобных задач в том числе представляет интерес шумоподобное излучение [1]. С точки зрения получения больших мощностей привлекательной выглядит схема в которой задающий генератор ваттной мощности генерирует многочастотный 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 [2,3]. В свою очередь, одним из вариантов построения многочастотных задающих СВЧ-генераторов является использование ЛБВ черенковского типа с запаздывающей обратной связью.

В данной работе в рамках распределенной модели ЛБВ с запаздывающей обратной связью и трехмерного PIC-моделирования исследованы тенденции изменения ширины спектра шумоподобного излучения при изменении параметров системы.

## 2. Исследование характеристик шумового излучения ЛБВ с запаздывающей обратной связью

В приближении малого изменения скорости частиц электронно-волновое взаимодействие в ЛБВ может быть описано следующей системой усредненных уравнений [4,5]:

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

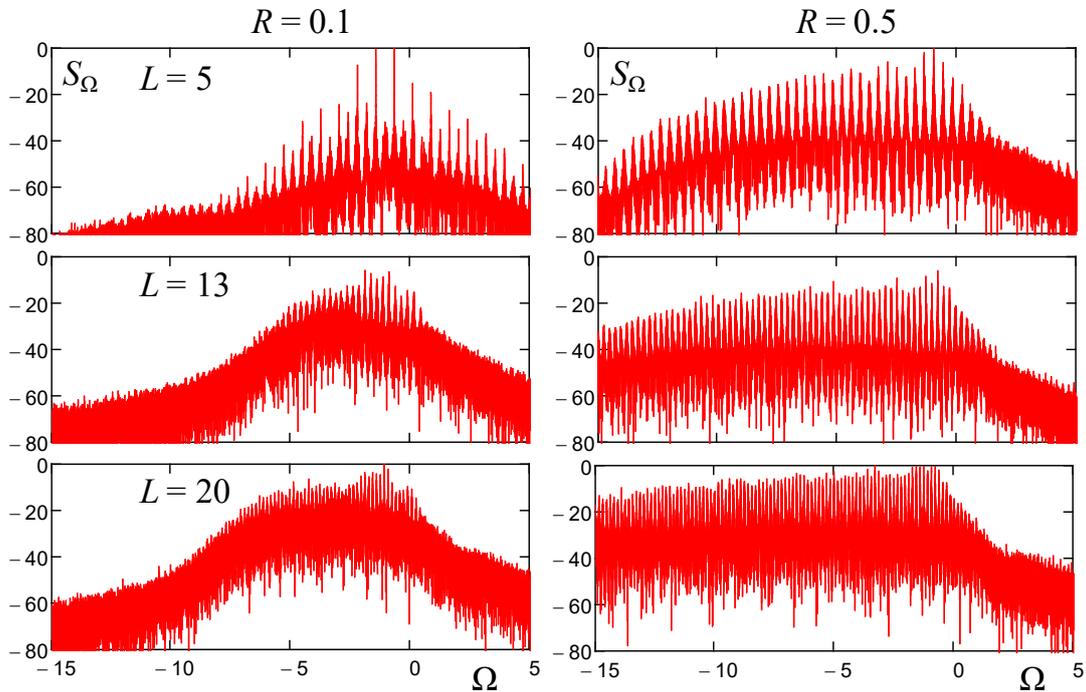
$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \zeta^2} = \text{Re}(ae^{i\theta}),$$

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,  $\omega$  – частота синхронизма,  $v_0, v_{gr}$  – поступательная скорость электронов и групповая скорость волны,  $C = \sqrt[3]{eI_0K/(2mv_0^2)}$  – параметр усиления Пирса,  $I_0$  – ток электронного пучка,  $K$  – сопротивление связи,  $\theta$  – фаза электронов относительно синхронной волны,  $m, e$  – масса и заряд электрона. Рассмотрим динамику генератора состоящего из усилителя и линии задержки с коэффициентом обратной связи  $R$ . В этом случае уравнения (1) следует дополнить граничным условием для амплитуды поля:

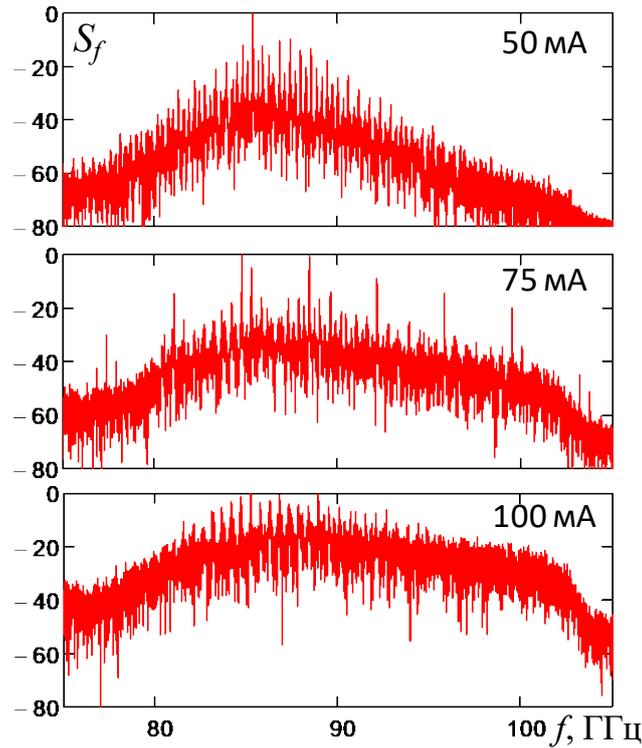
$$a(\zeta = 0, \tau) = R \cdot a(\zeta = L, \tau - T), \quad (2)$$

где  $T$  – нормированное время задержки сигнала,  $L$  – нормированная длина области усиления. Для снижения числа переменных в дальнейшем будем полагать  $T = L$ .



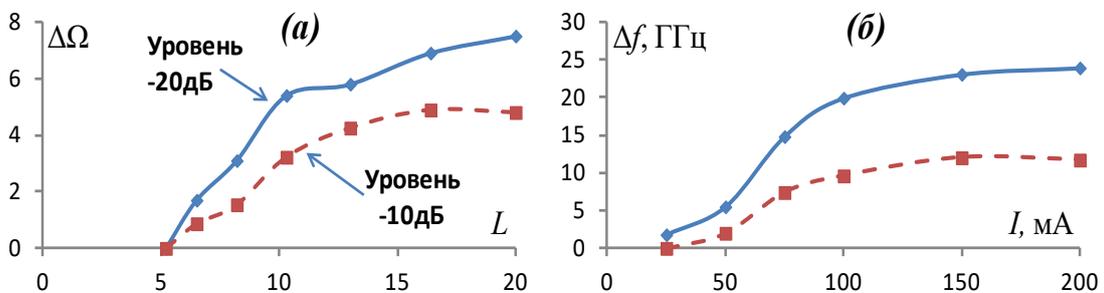
**Рисунок 1.** Результаты расчетов спектров излучения ЛБВ с запаздывающей обратной связью на основе усредненных уравнений.

Моделирование усредненных уравнений показало, что по мере увеличения нормированной длины системы  $L$  происходит неограниченный рост ширины спектра генерации (рис.1). При этом увеличение коэффициента обратной связи  $R$  существенно увеличивает ширину спектра, но одновременно приводит к увеличению его изрезанности. Последнее обстоятельство, очевидно, связано с увеличением добротности продольных мод кольцевого резонатора. Таким образом, для практических применений целесообразно использовать небольшой уровень обратной связи.



**Рисунок 2.** Результаты расчетов спектров излучения ЛБВ W-диапазона с запаздывающей обратной связью на основе трехмерного PIC-моделирования.

Для проверки адекватности результатов усредненных уравнений на основе программы CST Studio Suite было выполнено трехмерное PIC-моделирование экспериментально реализованной ЛБВ W-диапазона с уровнем выходной мощности в десятки ватт [6]. Уровень обратной связи задавался равным -15 дБ. На рис.2 представлены спектры излучения по мере увеличения тока пучка. На рис.3 представлены зависимости ширины спектра на уровнях -20 дБ и -10 дБ, полученные на основе усредненных уравнений и в рамках PIC-моделирования. Видно, что в первом случае рост ширины спектра значительно замедляется по мере роста параметра нормированной длины  $L$ . Аналогичный результат получен и в PIC-моделировании, где при токах пучка более 0.1А ширина спектра практически не возрастала. Вместе с тем следует отметить, что в модели реальной ЛБВ ширина спектра неизбежно ограничивается шириной полосы пропускания замедляющей системы.



**Рисунок 3.** Зависимость ширины спектра от длины системы при моделировании усредненных уравнений (а) и от тока пучка при трехмерном PIC-моделировании (б).

### 3. Заключение

Моделирование на основе усредненных уравнений показывает, что ширина спектра генерации в ЛБВ с запаздывающей обратной связью имеет тенденцию к неограниченному росту по мере увеличения нормированной длины системы. Вместе с тем в реальных ЛБВ данная величина ограничивается полосой пропускания замедляющей системы.

Для экспериментально реализованных ЛБВ W-диапазона показана возможность создания источников шумоподобного излучения с относительной шириной спектра порядка 10% и средней выходной мощностью в десятки ватт. При последующем усилении таких сигналов в гирорезонансных ЛБВ уровень мощности может быть увеличен как минимум до киловаттного уровня, что представляет значительный интерес для перспективных задач нагрева плазмы.

Исследование выполнено в рамках **государственного задания (договор № 0035-2021-0001)**.

#### 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. Самсонов С.В. и др. Исследования гиротронной лампы бегущей волны со спирально гофрированными волноводами в ИПФ РАН: результаты и перспективы // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 2019. – Т. 62. – № 7. – С. 508-521.
3. Samsonov S.V. 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.
4. Гинзбург Н.С., Кузнецов С.П., Федосеева Т.Н. Теория переходных процессов в релятивистской ЛОВ // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 1978. – Т. 21, № 7. – С.1037-1052.
5. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т.1. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. - 496 с.
6. Ivanov A. A. et al. W-band Pulsed TWT Family with Different Output Power // 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). – 2019. – P. 1.