

09

## **О возможности синтеза спектра излучения в секционированной релятивистской ЛОВ**

© Н.С. Гинзбург, Р.М. Розенталь, А.С. Сергеев

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
E-mail: rrz@appl.sci-nnov.ru

*Поступило в Редакцию 21 августа 2002 г.*

Исследованы возможности синтеза спектра излучения в мощной релятивистской лампе обратной волны (ЛОВ) путем вариации периода замедляющей системы. Для ЛОВ, состоящей из нескольких секций с отличающимися периодами гофрировки, найдены области двух- и трехчастотных режимов генерации с соразмерными амплитудами спектральных составляющих, расстояние между которыми регулируется величиной изменения периода гофрировки. Показано, что при большой надкритичности подобная конфигурация пространства взаимодействия позволяет получать генерацию шумоподобных хаотических сигналов с разделенными или перекрывающимися спектрами. В последнем случае ширина спектра излучения примерно вдвое превосходит ширину спектра регулярной ЛОВ той же длины.

Генерация мощного СВЧ излучения со сложным спектром представляет практический интерес для ряда приложений, включая нагрев плазмы, различные системы связи и локации. По этой причине в настоящий момент разрабатывается ряд методов генерации подобного излучения. В частности, в [1,2] реализованы автомодуляционные режимы генерации в мощной ЛОВ. В [3,4] проведено моделирование двухчастотного режима генерации в гиротроне миллиметрового диапазона. Однако данный проект рассчитан на одновременное возбуждение двух мод с отличной поперечной структурой поля, что может усложнить практическое использование такого генератора. В работе [5] двухчастотный режим реализован экспериментально в генераторе черенковского типа путем одновременной запитки двух электродинамических систем двумя параллельными электронными пучками. В случае импульсных релятивистских пучков очевидным недостатком такой схемы является

необходимость синхронизации пучков и последующего мультиплексирования выходного излучения.

В настоящей работе для релятивистских ЛОВ исследованы возможности генерации многочастотных сигналов при запитке электродинамической системы одним пучком. Показано, что генерацию на нескольких близко расположенных частотах с одинаковой поперечной структурой поля достаточно просто реализовать в секционированной системе со ступенчатым изменением расстройки синхронизма между пучком и рабочей волной. В случае мощных релятивистских ЛОВ, в качестве электродинамических систем которых используются отрезки гофрированных волноводов, такое изменение может быть достигнуто путем вариации периода гофрировки.

Рассмотрим модель ЛОВ с электродинамической системой в виде отрезка гофрированного волновода круглого сечения, пронизываемого трубчатым электронным пучком. Динамика ЛОВ с переменной расстройкой синхронизма в приближении, когда изменение энергии электронов в процессе взаимодействия относительно мало, описывается следующей системой самосогласованных уравнений (ср. [6]):

$$\frac{\partial A}{\partial \tau} - \frac{\partial A}{\partial \xi} = -\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} e^{-i\theta} d\theta_0,$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \xi} = u + \Delta(\xi) \frac{\partial u}{\partial \xi} = -\text{Re} \{ A e^{i\theta} \} \quad (1)$$

с начальными и граничными условиями

$$A|_{\tau=0} = A_0(\xi), \quad A|_{\xi=L} = 0, \quad \theta|_{\xi=0} = \theta_0 \in [0, 2\pi), \quad u|_{\xi=0} = 0.$$

Здесь использованы следующие нормированные переменные:  $\xi = C\omega z / v_0 \gamma_0^2$  — продольная координата,  $L$  — безразмерная длина пространства взаимодействия в той же нормировке,  $\tau = C\omega \times (t - z/v_0) / \gamma_0^2 (1 + v_0/v_{gr})$  — временная переменная,  $A = \gamma_0 \times e E_z / C^2 \omega m v_0$  — безразмерная амплитуда синхронной пространственной  $(-1)$ -й гармоники поля излучения,  $\theta = \omega t + h z - \int_0^z \bar{h}(z) dz$  — фазы электронов относительно синхронной гармоники поля,  $\bar{h}(z) = 2\pi/d(z)$ ,  $d(z)$  — переменный период гофрировки,  $h$  — модуль

продольного волнового числа основной пространственной гармоники,  $u = (1 - \gamma/\gamma_0)/\beta_0^2 C$  — относительное изменение энергии электронов,

$$\Delta(\xi) \equiv \frac{\gamma_0^2 v_0}{\omega C} \left( \bar{h}(z) - h - \frac{\omega}{v_0} \right)$$

— переменная расстройка синхронизма электронов с рабочей волной,  $C = (\gamma_0^3 e J |Z| / 2 m v_0^2)^{1/3}$  — параметр Пирса,  $|Z|$  — сопротивление связи с замедленной гармоникой [7],  $J$  — ток пучка,  $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$  — релятивистский масс-фактор электронов,  $\omega$  — частота точного синхронизма, выбранная в качестве несущей частоты,  $v_0$  — начальная поступательная скорость электронов,  $\beta_0 = v_0/c$ .

КПД системы определяется как  $\eta = (\gamma_0 + 1) \gamma_0^{-1} \cdot C \bar{\eta}$ , где

$$\bar{\eta} = (2\pi)^{-1} \int_0^{2\pi} u \cdot d\theta_0$$

— приведенный КПД, черта сверху означает усреднение по времени реализации. При выводе системы предполагалось, что волновое число основной пространственной гармоники, групповая скорость рабочей волны  $v_{gr}$ , а также импеданс связи одинаковы в разных секциях. Кроме того, использовалась линейная аппроксимация дисперсионной характеристики электродинамической системы в рабочем диапазоне частот.

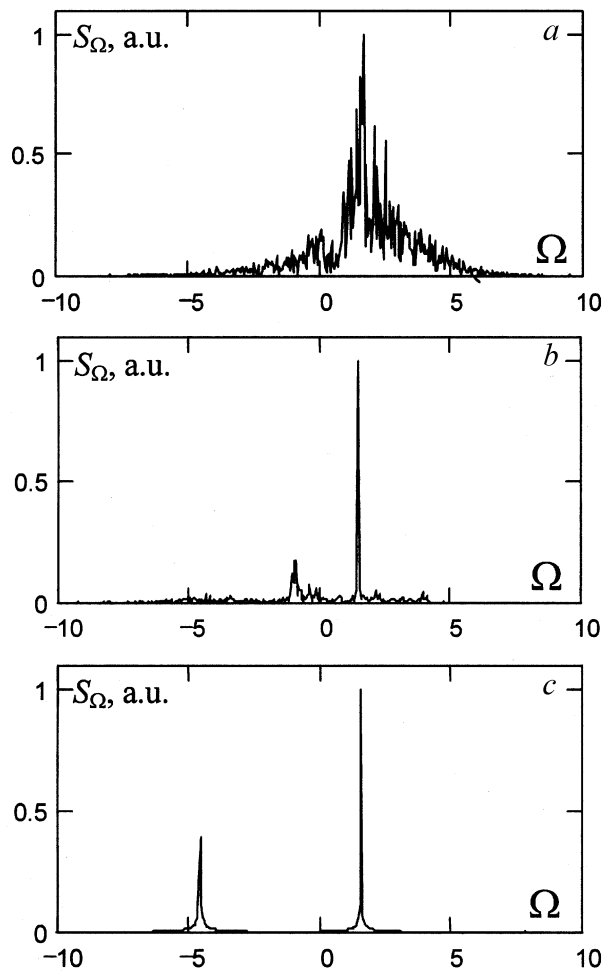
При  $\Delta(\xi) \equiv \text{const}$  система уравнений (1) описывает динамику регулярной ЛОВ [6,8], в которой поведение системы определяется единственным параметром — безразмерной длиной  $L$ . Генератор стартует при  $L \approx 2$ , затем при  $L \geq 3$  режим стационарной генерации сменяется режимом периодической автомодуляции с периодом  $T_{AM} \approx 1.5L$  и далее с ростом длины ( $L \geq 5.5$ ) устанавливается режим стохастической автомодуляции. Отметим, что в режиме периодической автомодуляции расстояние между спектральными компонентами  $\Delta f$  ограничивается интервалом длин, на котором реализуется периодическая автомодуляция  $1/\Delta f = T_{AM}$ . При этом как величины амплитуд волн сателлитов, так и количество спектральных составляющих существенно меняются при варьировании параметра  $L$ .

Введение скачка расстройки на границе регулярных секций открывает дополнительные возможности генерации многочастотных сигналов.

Для двухсекционной ЛОВ зададим изменение расстройки в следующем виде:  $\Delta(\xi) = \Delta_1 \cdot \chi(\xi - L_1)$ , где  $\Delta_1$  — величина изменения расстройки на границе двух секций,  $L_1$  — длина первой секции,  $\chi(\xi)$  — функция Хевисайда. Важно подчеркнуть, что переход между секциями с точки зрения взаимодействия электронов с синхронной волной можно считать скачкообразным, если его длина мала в масштабе обратного инкремента. С другой стороны, с электродинамической точки зрения изменение периода гофрировки может быть адиабатическим, т.е. переходная область может включать в себя достаточно большое число периодов гофрировки, чем достигается отсутствие заметных отражений от указанной области. Моделирование показывает, что при достаточно больших величинах расстройки синхронизма между секциями оказывается возможной генерация на двух разнесенных частотах. Оптимальной для двухчастотного режима генерации является полная длина системы  $L = 6 - 6.5$ . При этом поскольку на вход первой секции поступает невозмущенный пучок, ее длина ограничивается снизу стартовой длиной регулярной ЛОВ, а сверху — длиной, на которой происходит потеря устойчивости стационарной генерации.

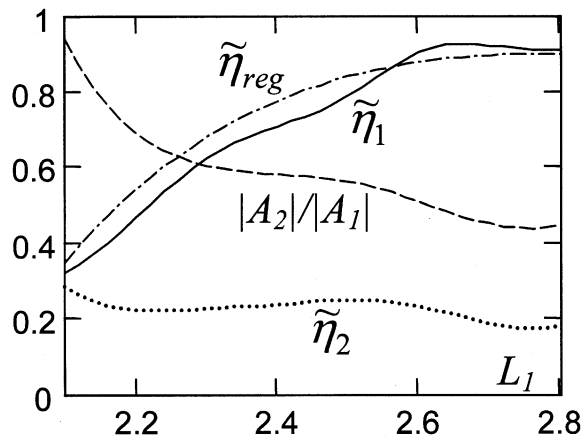
На рис. 1 показаны спектры выходного сигнала двухсекционной ЛОВ при  $L_1 = 2.4$ ,  $L_2 = 3.6$  для последовательно возрастающего по абсолютному значению и отрицательного по знаку смещения расстройки синхронизма во второй секции относительно первой. При относительно небольшом смещении (рис. 1, *a*) спектр генерации практически идентичен спектру регулярной ЛОВ соответствующей длины (режим хаотической генерации с непрерывным спектром). Увеличение расстройки приводит к срыву режима хаотической автомодуляции и установлению двухчастотного режима с относительно низким уровнем второй спектральной составляющей (рис. 1, *b*). Дальнейшее увеличение расстройки приводит к росту амплитуды сигнала второй частоты (рис. 1, *c*), при этом разность частот, в рамках данной модели, неограниченно возрастает пропорционально  $\Delta_1$ . Аналогичные процессы происходят и при положительных значениях изменения расстройки синхронизма между секциями.

В режиме двухчастотной генерации из условия сохранения потока мощности приведенный КПД может быть представлен в виде  $\tilde{\eta} = \tilde{\eta}_1 + \tilde{\eta}_2$ , где  $\tilde{\eta}_{1,2} = |A_{1,2}|^2/4$  — относительная энергоотдача электронного пучка в каждой из секций,  $A_{1,2}$  — амплитуды спектральных составляющих излучения. На рис. 2 показаны приведенный КПД каждой из секций



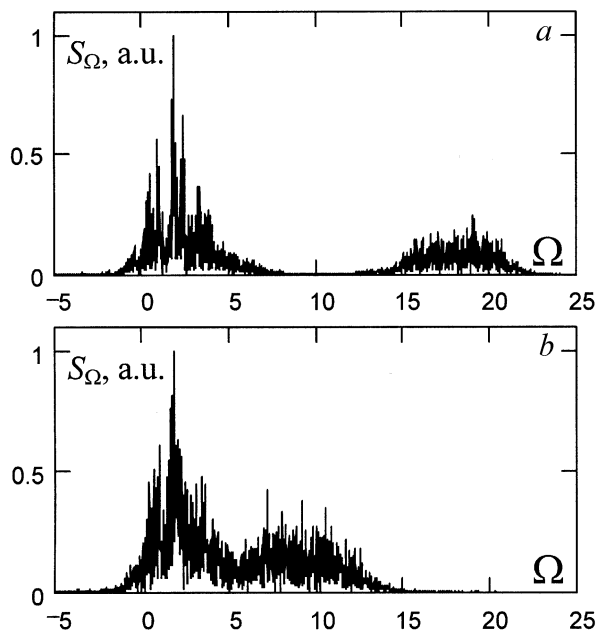
**Рис. 1.** Спектры генерации двухсекционной ЛОВ ( $L_1 = 2.4$ ,  $L_2 = 1.5 \cdot L_1$ ) при  $\Delta_1 = -2$  (a),  $\Delta_1 = -4$  (b),  $\Delta_1 = -8$  (c).

$\tilde{\eta}_{1,2}$  и отношение амплитуд спектральных составляющих  $|A_2|/|A_1|$  в зависимости от длины первой секции. Графики построены при достаточно большом отрицательном значении скачка расстройки синхронизма



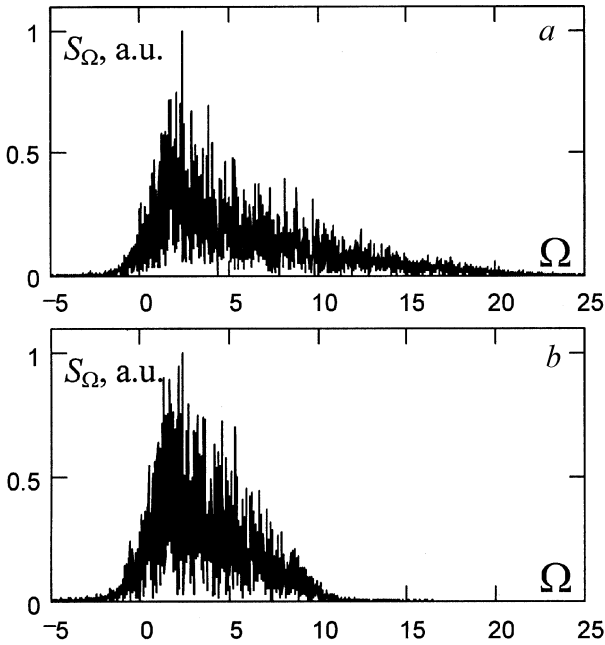
**Рис. 2.** Зависимости приведенного КПД каждой из секций  $\tilde{\eta}_{1,2}$ , а также отношения амплитуд гармоник  $|A_2|/|A_1|$  от длины первой секции  $L_1$  при  $\Delta_1 = -10$ . Для сравнения приведена зависимость приведенного КПД регулярной ЛОВ  $\tilde{\eta}_{reg}$  от длины.

$\Delta = -10$  при оптимальном значении длины второй секции, когда сигнал в ней максимален. Как следует из рисунка, КПД второй секции относительно мал, поскольку в эту секцию поступает электронный пучок, приобретший значительный энергетический разброс после взаимодействия в первой секции. В то же время КПД первой секции очень слабо отличается от КПД однородной лампы той же длины. На вход этой секции поступает излучение из второй секции, однако его частота настолько сдвинута от рабочей частоты для данной секции, что это поле оказывается несинхронным с электронным потоком. Таким образом, при большом разnose частот влияние второй секции на первую оказывается незначительным по сравнению с обратным влиянием. В этой связи КПД второй секции  $\tilde{\eta}_2$  значительно увеличивается только в области, где длина первой секции близка к стартовой, что обусловлено снижением эффективности генерации в первой секции, вследствие чего уменьшается эффективный разброс электронов по энергиям и фазам на входе второй секции. При этом амплитуда второй частоты может даже превышать амплитуду основной, что позволяет получать двухчастотный сигнал с произвольным соотношением амплитуд спектральных составляющих.



**Рис. 3.** Спектры генерации двухсекционной ЛОВ ( $L_1 = 6.3$ ,  $L_2 = 11.7$ ) в автомодуляционном режиме:  $\Delta_1 = 15$  — разделение спектров (*a*);  $\Delta_1 = 6$  — перекрытие спектров (*b*).

Важно подчеркнуть, что, увеличивая полную длину пространства взаимодействия и варьируя длину секций замедляющей системы, можно достичь сочетания различных динамических режимов. Например, первая секция генерирует в одночастотном режиме, а вторая — в режиме периодической или стохастической автомодуляции с центральной частотой, смещенной относительно частоты первой секции. Естественно, возможна ситуация, когда обе секции генерируют хаотический сигнал с разнесенными частотами. На рис. 3 представлены спектры генерации двухсекционной ЛОВ с  $L = 18$  в случае, когда спектры генерации отдельных секций разделены (рис. 3, *a*), и в случае перекрытия спектров (рис. 3, *b*). В последнем случае полная ширина спектра превышает ширину спектра регулярной ЛОВ соответствующей длины (рис. 4, *b*)



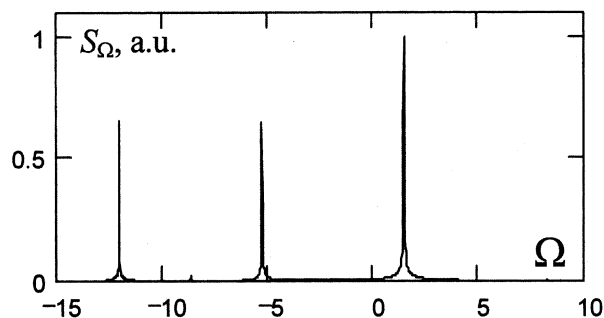
**Рис. 4.** Спектр генерации: *a* — двухсекционной ЛОВ ( $L_1 = 6$ ,  $L_2 = 12$ ) с линейным изменением параметра расстройки синхронизма во второй секции при  $\Delta_1 = 10$ ; *b* — регулярной ЛОВ той же длины.

примерно в 1.5 раза, а КПД составляет порядка 70% КПД регулярной ЛОВ.

Моделирование показывает, что для расширения спектра более привлекательной является ситуация, когда в первой секции расстройка постоянна, а во второй меняется по линейному закону  $\Delta(\xi) = \chi(\xi - L_1) \cdot \Delta_1 \cdot (\xi - L_1)/L$ . Как следует из рис. 4, *a* в этом случае возможно почти двукратное увеличение ширины спектра, при этом КПД сохраняется на уровне 95% относительно КПД регулярной ЛОВ.

Отметим в заключение, что путем увеличения числа секций существует возможность генерации линейчатых спектров, состоящих из большего числа частот. В частности, на рис. 5 представлен спектр генерации трехсекционной ЛОВ, в которой изменение расстройки





**Рис. 5.** Спектр генерации трехсекционной ЛОВ ( $L_1 = 2.2$ ,  $L_2 = 2.9$ ,  $L_3 = 2.9$ ) при  $\Delta_1 = -8$ ,  $\Delta_2 = -14$ .

задавалось в виде:  $\Delta(\xi) = \Delta_1 \cdot \chi(\xi - L_1) + (\Delta_2 - \Delta_1) \cdot \chi(\xi - L_2)$ , где  $L_{1,2}$  — координаты границ первой и второй секций,  $\Delta_{1,2}$  — величины изменения расстройки синхронизма относительно первой секции. При этом в определенной области параметров можно осуществлять независимое управление частотами каждой из спектральных компонент.

Таким образом, приведенный анализ показывает, что имеет место ряд возможностей синтеза спектра генерации в мощных релятивистских ЛОВ, которые в дальнейшем предполагается реализовать на базе микросекундного ускорителя „Сатурн“ (ИПФ РАН) [9].

Авторы выражают признательность Н.Ф. Ковалеву и Н.И. Зайцеву за стимулирующие обсуждения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 00-02-16412а.

## Список литературы

- [1] Гинзбург Н.С., Зайцев Н.И., Иляков Е.В. и др. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 20. С. 66–71.
- [2] Гинзбург Н.С., Зайцев Н.И., Иляков Е.В. и др. // ЖТФ. 2001. Т. 71. В. 11. С. 73–80.
- [3] Dumbrajs O. // Int. J. IR & MM waves. 1997. V. 18. N 11. P. 211.
- [4] Dumbrajs O. et al. // IEEE Trans. on Plasma Sci. 1999. V. 27. N 2. P. 327.
- [5] Yang Z., Liang Z., Zhang B. et al. // Int. J. IR & MM waves. 1999. V. 20. N 1. P. 83.

- [6] *Гинзбург Н.С., Кузнецов С.П., Федосеева Т.Н.* // Изв. вузов. Радиофизика. 1978. Т. 21. В. 7. С. 1037.
- [7] *Ковалев Н.Ф.* // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1978. В. 3. С. 102–106.
- [8] *Гинзбург Н.С., Кузнецов С.П.* // Релятивистская высокочастотная электроника. Проблемы повышения мощности и частоты излучения. Горький: ИПФ АН СССР, 1981. С. 101–144.
- [9] *Зайцев Н.И., Иляков Е.В., Кораблев Г.С.* и др. // ПТЭ. 1995. В. 3. С. 138–145.