

09:10

Применение методики контроля хаоса для устранения автомодуляции в лампе обратной волны

© А.М. Долов, С.П. Кузнецов

Саратовское отделение Института радиотехники и электроники РАН,
410019 Саратов, Россия
e-mail: kuznetsov@sgu.ru

(Поступило в Редакцию 29 января 2003 г.)

Предлагается метод подавления автомодуляции в лампе обратной волны. Для этого вводится дополнительная цепь запаздывающей обратной связи, благодаря чему уровень амплитуды выходного сигнала оказывает влияние на величину поступающего в пространство взаимодействия тока электронного пучка. Результаты численного моделирования демонстрируют возможность увеличения рабочего тока примерно вдвое при сохранении одночастотного режима генерации.

Подход к устройствам СВЧ электроники с длительным взаимодействием как к нелинейным распределенным динамическим системам основан на нестационарной нелинейной теории и разработан для различных модификаций лампы обратной волны (ЛОВ) [1–3], лампы бегущей волны [4], гиротронов [5]. В частности, в классической ЛОВ типа О обнаружены и исследованы нетривиальные бифуркации — потеря устойчивости одночастотной генерации с рождением автомодуляции и возникновение динамического хаоса [1,6–12].

Нестационарные процессы и сложные режимы динамики в ЛОВ могут представлять практический интерес. В частности, возможно использование ЛОВ с хаотической динамикой как генератора шума со спектром, сосредоточенным в определенной полосе частот, и перестройкой средней частоты при изменении ускоряющего напряжения [7–10]. В релятивистских ЛОВ особенности процесса установления колебаний (наличие формирующегося на начальном участке высокого всплеска амплитуды поля) полезно учитывать при решении проблемы эффективной генерации импульсов [11,12]. Во многих случаях, однако, возникновение автомодуляции выступает как паразитный эффект, препятствующий реализации одночастотной генерации с относительно высокими уровнями мощности и КПД, которые должны были бы достигаться при увеличении рабочего тока. В качестве одного возможного подхода к устранению автомодуляции было рекомендовано выбирать рабочие режимы с большим пространственным зарядом [8], в качестве другого обсуждалась модификация ЛОВ, использующая связанные волноведущие структуры [13]. В настоящей работе, отталкиваясь от представления о ЛОВ как о динамической системе, мы предлагаем обратиться к разработанной в нелинейной динамике идее стабилизации неустойчивых состояний, получившей известность как управление хаосом („controlling chaos“).

Впервые эта концепция была высказана в 1990 г. группой исследователей из Мэрилендского университета [14], показавших, как можно реализовать периоди-

ческую динамику вместо хаотического режима в нелинейной системе посредством слабых контролируемых воздействий на какой-либо доступный для регуляции параметр системы. Позднее были предложены и другие варианты управления хаосом для стабилизации неустойчивости или для направления фазовой траектории в желаемую область. Один простой и во многих случаях эффективный метод основан на использовании запаздывающей обратной связи [15]. К настоящему времени известно много эффективных примеров управления хаосом: в нелинейном осцилляторе [16], в лазерах [17], в системах, демонстрирующих неустойчивость спиновых волн [18], в биологических и медицинских приложениях [19], в космической навигации [20].

Как известно, в ЛОВ (рис. 1) электронный пучок движется со скоростью, близкой к фазовой скорости волны, что обеспечивает эффективное взаимодействие, тогда как групповая скорость волны направлена навстречу пучку, что обеспечивает наличие внутренней обратной связи, абсолютный характер неустойчивости и возможность автоколебаний при токе пучка, превышающем некоторое стартовое значение. При дальнейшем увеличении тока возникает автомодуляция. Ее механизм поясняется приведенной на рис. 1, *b* пространственно-временной диаграммой. Пусть в некоторый момент (*I*) амплитуда высокочастотного поля на левом конце системы, где встреливается электронный пучок, относительно велика. Это приводит к перегруппировке электронов в пучке вдоль линии (характеристики) $x - v_0 t = \text{const}$: распределение амплитуды высокочастотного тока по длине выглядит, как показано на нижней вставке. В результате амплитуда тока у правого конца в момент (*II*) оказывается относительно малой. Тогда на линии, отвечающей распространению волнового пакета с групповой скоростью по характеристике $x + v_{\text{en}} t = \text{const}$, амплитуда поля будет меньше. Поэтому в момент $t \cong L/v_0 + L/v_{\text{en}}$ амплитуда сигнала на левом конце минимальна (*III*). Меньшее поле более эффективно группирует пучок (верхняя вставка), и на

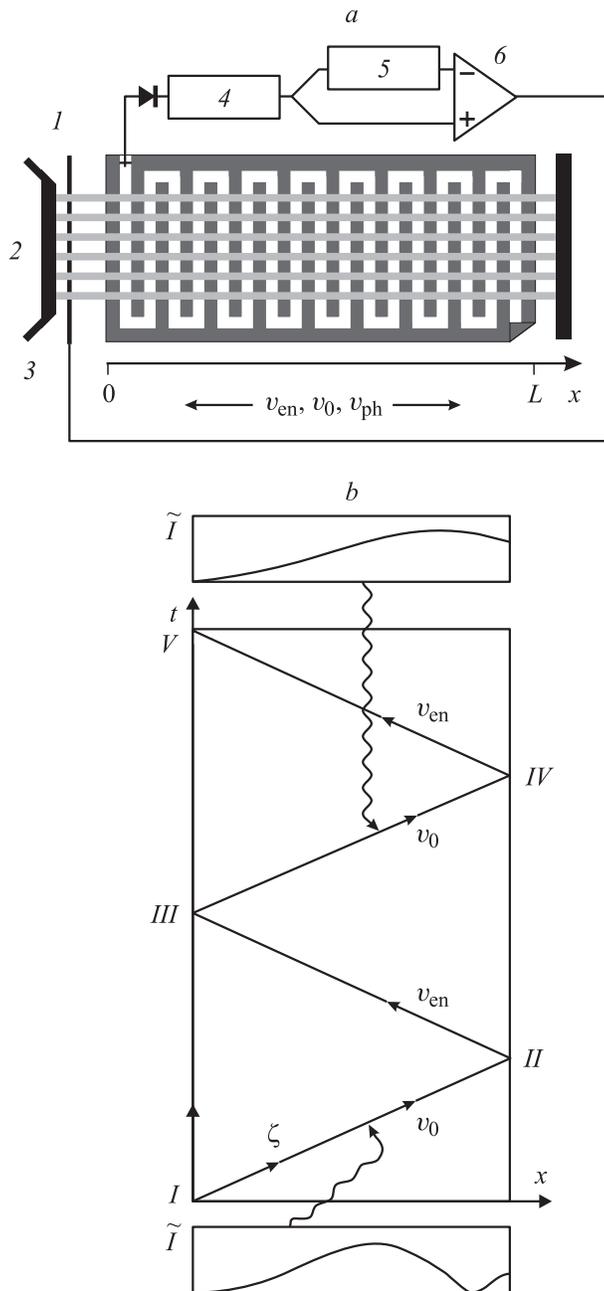


Рис. 1. Схема (а) лампы обратной волны (с добавленной схемой подавления автомодуляции на основе метода управления хаосом с использованием запаздывания) и иллюстрация (б), поясняющая механизм возникновения автомодуляции на пространственно-временной диаграмме. 1 — СВЧ выход, 2 — катод, 3 — управляющий электрод, 4 — фильтр, 5 — задержка, 6 — усилитель.

соответствующей характеристике достигается максимум тока у правого конца (IV). В результате новый максимум поля (I) на левом конце возникнет через время $T \cong 2(L/v_0 + L/v_{en})$. Это дает оценку периода автомодуляции. Численные расчеты уточняют числовой фактор: вместо 2 он оказывается близким к 1.5.

По-видимому, воспрепятствовать возникновению автомодуляции можно изменением во времени тока пучка на входе в пространство взаимодействия с тем, чтобы он был больше при появлении максимумов и меньше при появлении минимумов амплитуды поля. На рис. 1, а схематически показано, как это сделать путем введения дополнительной цепи контроля, базируясь на идее схемы управления хаосом с использованием запаздывания [15]. Снимаемый с выхода ЛОВ высокочастотный сигнал подвергается детектированию и фильтрации, в результате чего выделяется огибающая сигнала в режиме реализующейся или потенциально возможной автомодуляции. Далее, сигнал разветвляется и поступает на вход дифференциального усилителя, причем по одной из ветвей он передается с запаздыванием, примерно на полпериода автомодуляции. С выхода усилителя сигнал подается как дополнительное напряжение смещения на управляющий электрод (сетку) в электронной пушке и регулирует тем самым величину тока пучка на входе в пространство взаимодействия.

Продемонстрируем возможность подавления автомодуляции в численном эксперименте, для чего обратимся к уравнениям нестационарной нелинейной теории ЛОВ [1,8]. Удобно использовать стандартную нормировку безразмерных переменных и параметров, где в качестве тока пучка в формулах фигурирует средний постоянный ток I_0 . Изменение тока из-за присутствия цепи контроля учитывается в уравнении возбуждения введением в правую часть множителя, который постоянен на характеристике, отвечающей пучку, но меняется во времени, т.е. от характеристики к характеристике. Уравнения имеют следующий вид:

$$\partial^2 \theta / \partial \xi^2 = -\text{Re} F \exp(i\theta), \quad \partial F / \partial \tau - \partial F / \partial \xi = A(\tau) I,$$

$$I = -\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \exp(-i\theta) d\theta, \quad (1)$$

$$\theta|_{\xi=0} = \theta_0, \quad \partial \theta / \partial \xi|_{\xi=0} = 0, \quad F|_{\xi=l} = 0. \quad (2)$$

Безразмерные независимые переменные $\xi = \beta_0 C x$ и $\tau = \omega_0 C (1 + v_0/v_{en})^{-1} (t - x/v_0)$ определены так, что координата ξ отсчитывается вдоль характеристики (рис. 1, б). β_0 и ω_0 есть волновое число и круговая частота волны в замедляющей системе при ее синхронизме с электронным пучком, а $C = \sqrt[3]{I_0 K / 4U}$ — параметр Пирса, выражающийся через ток пучка, сопротивление связи замедляющей системы K и ускоряющее напряжение U . Величина $F(\xi, \tau) = \mathcal{E} / 2\beta_0 U C^2$ есть безразмерная комплексная амплитуда высокочастотного поля $E(x, t) = \text{Re}[\mathcal{E}(x, t) \exp(i\omega_0 t - i\beta_0 x)]$, а величина $\theta(\xi, \tau, \theta_0)$ характеризует фазу электрона относительно волны и относится к частице, влетевшей в пространство взаимодействия с начальной фазой θ_0 и имеющей в момент τ координату ξ . В отсутствие цепи контроля стационарный режим генерации возникает при значениях параметра безразмерной длины $l > l_{st} \cong 1.974$, а

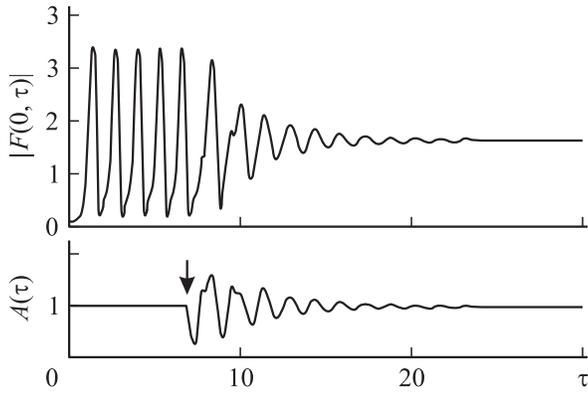


Рис. 2. Зависимость безразмерной амплитуды высокочастотного поля на выходе ЛОВ и нормированного тока пучка от времени при $l = 3.5$. Момент включения контроля показан стрелкой, параметры цепи контроля $c = 0.95$ и $T = 0.8$.

автомодуляция — при $l > l_{AM} \cong 2.9$ [1]. Заметим, что принципиальным условием применимости теории, обеспечивающим медленность изменения амплитуды поля во времени и пространстве, является малость параметра Пирса.

Примем, что в присутствии контроля ток электронного пучка определяется выражением

$$J(t) = I_0 + g\Delta V, \quad (3)$$

где

$$\Delta V = V(t) - V(t - \Delta t) \cong \beta_0^{-1} (|\mathcal{E}(0, t)| - |\mathcal{E}(0, t - \Delta t)|)$$

— напряжение на выходе цепи контроля; $V(t)$ — амплитуда высокочастотного потенциала на выходе ЛОВ; Δt — время запаздывания; g — постоянный коэффициент, имеющий размерность проводимости.

Полагая $A = J/I_0$ и переходя к безразмерным переменным, мы должны написать

$$\begin{aligned} A(\tau) &= 1 + 2gUI_0^{-1}C^2(|F(0, \tau)| - |F(0, \tau - T)|) \\ &= 1 + cI^{-1}(|F(0, \tau)| - |F(0, \tau - T)|), \end{aligned} \quad (4)$$

где $c = 2gUC^2I/I_0 = \pi gKN$ и $T = \omega_0C(1 + v_0/v_{en})^{-1} \times \Delta t$ — безразмерные константы, характеризующие цепь контроля.

Численное решение уравнения (1) совместно с (2) и (4) проводилось методом конечных разностей [1,8]. На рис. 2 показан пример зависимости амплитуды выходного сигнала от времени при $l \cong 3.5$. Контроль выключен вначале и включается в момент, отмеченный стрелкой. Хорошо видно, как возникшая интенсивная автомодуляция затухает и устанавливается режим стационарной одночастотной генерации: амплитуда сигнала становится постоянной и не зависящей от времени. При этом дополнительные члены в соотношении (4) взаимно уничтожаются и $A \equiv 1$. Это тот же самый

режим, который находят в стационарной теории, но присутствие цепи контроля делает его устойчивым. Параметры цепи контроля $c = 0.95$ и $T = 0.8$ подобраны эмпирически с тем, чтобы стационарный режим генерации возникал в наиболее широком диапазоне безразмерной длины l . При указанных параметрах c и T это имеет место для $l_{st} < l \leq 3.7$. Таким образом, по сравнению с обычной ЛОВ удастся поднять порог автомодуляции по l примерно в 1.27 раз, а по величине рабочего тока — в два раза (1.27^3). Безразмерная амплитуда выходного сигнала $|F|$ меняется при этом мало. Поэтому КПД $\eta = 2^{-5/3}I_0^{1/3}U^{-1/3}K^{1/3}|F|^2$ и мощность $P = 2^{-5/3}I_0^{4/3}U^{2/3}K^{1/3}|F|^2$, максимально достижимые в режиме одночастотной генерации, возрастают примерно в 1.3 и 2.5 раза. Вероятно, эти показатели можно улучшить, используя более совершенные методы контроля.

В заключение подчеркнем существенные моменты, которые нужно иметь в виду при практической реализации рассмотренного метода подавления автомодуляции. Во-первых, фильтр должен задерживать высокочастотную составляющую сигнала и пропускать основную частоту автомодуляции (в экспериментах [6–9] это частоты порядка 1 GHz и 50 MHz соответственно). Во-вторых, время задержки должно быть порядка полпериода автомодуляции, т.е. времени обхода сигнала по петле обратной связи $L/v_0 + L/v_{en}$. В-третьих, коэффициент передачи цепи контроля должен быть таков, чтобы сигнал на входе, отвечающий по порядку величины амплитуде высокочастотного поля, на выходе приводил к вариации тока порядка — среднего тока пучка. При этом абсолютная величина амплитуды высокочастотного напряжения оценивается как C^2U , где C — малый параметр (например, в экспериментах [6–9] $C \sim 0.005–0.1$), тогда как напряжение на управляющем электроде может быть меньше ускоряющего напряжения U , по-видимому, не более чем на порядок. Поэтому наличие усилителя в цепи контроля представляется принципиально необходимым.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 03-02-16192.

Список литературы

- [1] Гинзбург Н.С., Кузнецов С.П., Федосеева Т.Н. // Изв. вузов. Сер. Радиофизика. 1978. Т. 21. № 7. С. 1037–1052.
- [2] Кузнецов С.П., Трубецков Д.И. // Изв. вузов. Сер. Радиофизика. 1977. Т. 20. № 2. С. 300–312.
- [3] Кузнецов С.П., Четвериков А.П. // Изв. вузов. Сер. Радиофизика. 1981. Т. 24. № 1. С. 109–117.
- [4] Булгакова Л.В., Кузнецов С.П. // Изв. вузов. Сер. Радиофизика. 1988. Т. 31. № 2. С. 207–221; № 5. С. 612–621.
- [5] Гинзбург Н.С., Завольский Н.А., Нусинович Г.С. и др. // Изв. вузов. Сер. Радиофизика. 1986. Т. 29. № 1. С. 106–114.
- [6] Безручко Б.П., Кузнецов С.П. // Изв. вузов. Сер. Радиофизика. 1978. Т. 21. № 7. С. 1053–1059.

- [7] Безручко Б.П., Кузнецов С.П., Трубецков Д.И. // Письма в ЖЭТФ. 1979. Т. 29. № 3. С. 180–184.
- [8] Безручко Б.П., Булгакова Л.В., Кузнецов С.П. и др. Экспериментальное и теоретическое исследование стохастических автоколебаний в лампе обратной волны. Лекции по электронике СВЧ и радиофизике. Изд-во СГУ, 1981. Кн. 5. С. 25–77.
- [9] Безручко Б.П., Булгакова Л.В., Кузнецов С.П. и др. // РиЭ. 1983. Т. 28. № 6. С. 1136–1139.
- [10] Рыскин Н.М., Титов В.Н., Трубецков Д.И. // ДАН. 1998. Т. 358. № 5. С. 620–623.
- [11] Гинзбург Н.С., Зайцев Н.И., Иляков Е.В. и др. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 20. С. 66–71.
- [12] Гинзбург Н.С., Зайцев Н.И., Иляков Е.В. и др. // Изв. вузов. Сер. Прикладная нелинейная динамика. 1999. Т. 7. № 5. С. 60–69.
- [13] Амиров Р.Ш., Безручко Б.П., Исаев В.А. и др. // Влияние отражений на нестационарные процессы в ЛОВО. Лекции по электронике СВЧ и радиофизике. Изд-во СГУ, 1983. Кн. 2. С. 90–105.
- [14] Ott E., Grebogi C., Yorke J.A. // Phys. Rev. Lett. 1990. Vol. 64. N 11. P. 1196–1199.
- [15] Pyragas K. // Phys. Lett. A. 1992. Vol. 170. N 6. P. 421–428.
- [16] Hant E.R. // Phys. Rev. Lett. 1991. Vol. 67. N 15. P. 1953–1955.
- [17] Meucci R., Gadomski W., Ciofini M. et al. // Phys. Rev. E. 1994. Vol. 49. N 4. P. R2528–R2531.
- [18] Azevedo A., Rezende S.M. // Phys. Rev. Lett. 1991. Vol. 66. N 10. P. 1342–1345.
- [19] Christini D.J., Collins J.J. // Phys. Rev. E. 1996. Vol. 53. N 1. P. R49–R52.
- [20] Bollt E.M., Meiss J.D. // Phys. Lett. A. 1995. Vol. 204. P. 373–378.