

04:09:10:12

Влияние обратной связи на сложную динамику электронного потока с виртуальным катодом в виртоде

© А.Е. Храмов

Государственный учебно-научный центр "КОЛЛЕДЖ"
Саратовского государственного университета

Поступило в Редакцию 17 октября 1997 г.

Приводятся результаты численного моделирования нелинейной динамики релятивистского электронного потока с виртуальным катодом в виркаторной системе на пролетном релятивистском электронном пучке без внешней обратной связи с ней.

В связи с появлением эффективных источников сильноточных релятивистских электронных пучков (РЭП), токи которых превышают 10–100 кА при энергии ускорения 0.1–10 MeV, резко возросли мощности практически всех классических СВЧ устройств. Однако успехи в ускорительной технике не могут быть использованы в полной мере в этих приборах, так как ток пучка в них ограничен. По мере приближения тока к определенному уровню эффективность взаимодействия электронов с электромагнитными полями падает. От этого недостатка свободны генераторы на сверхкритических токах — виркаторы [1], которые используют для фазовой селекции электронов колебания так называемого виртуального катода (ВК) — области в пространстве взаимодействия с потенциалом, близким к потенциалу катода. В настоящее время наиболее важным следует считать применение виркаторов для генерации сверхмощных импульсов СВЧ излучения. Однако была показана возможность управления прибором с ВК внешним СВЧ сигналом, что делает возможным применение приборов с ВК в качестве модулей фазированных антенных решеток.

В данной работе приводятся результаты исследований нелинейной динамики электронного потока с ВК в виркаторной системе на пролетном РЭП без внешней запаздывающей обратной связи и с ней.

Исследуемая система представляет собой отрезок цилиндрического волновода, замкнутого с обеих сторон проводящими стенками. Внутри системы инжектируется моноскоростной электронный поток. Характерной особенностью системы является внешняя обратная связь, которая осуществляется за счет кинематической модуляции влетающих в пространство дрейфа электронов электромагнитным сигналом, снимаемым из пространства взаимодействия и воздействующим на поток с задержкой τ .

Описание нелинейных и нестационарных процессов в такой системе строится на основе самосогласованной системы уравнений Максвелла и кинетического уравнения Власова. Для ее численного решения используется консервативная разностная схема [2,3]. Основными параметрами, от которых зависит поведение нашей системы, являются отношение тока пучка к предельному вакуумному току, обозначаемое α , и параметры обратной связи: время задержки τ и координата места, откуда снимается сигнал обратной связи.

Хорошо известно, как из численных, так и из натуральных экспериментов, что электронный поток с ВК обладает сложной нерегулярной динамикой. В [4] в рамках электростатической модели было показано, что электронный поток с ВК в диоде Пирса может демонстрировать различные виды поведения, включая динамический хаос. В данной работе были проведены исследования в рамках модели виркатора, которая учитывает непотенциальные эффекты, ограничивающие скорость распространения электромагнитных волн в системе [5].

На рис. 1, *a-c* представлены спектры мощности, проекции аттракторов и временные реализации тока пучка из области формирования ВК для различных значений α . Отметим, что временная реализация выбиралась после затухания переходного процесса.

При малых значениях надкритичности α ($\alpha < 2$) в системе устанавливаются периодические колебания релаксационного типа (рис. 1, *a* $\alpha = 1.5$). Спектр мощности содержит узкие пики, которые являются кратными гармониками основной частоты $\omega_0 \approx 2\omega_p$, где $\omega_0 = 2\pi/T_0$ (T_0 — характерный масштаб колебаний, соответствующий полному времени пролета отраженных от ВК электронов), ω_p — плазменная частота электронного пучка. Проекция аттрактора соответствует однократному предельному циклу. С увеличением параметра α ($2 < \alpha < 5$) происходит разрушение периодических колебаний (рис. 1, *b*, $\alpha = 3.7$). В спектре присутствует шумовой пьедестал, на фоне которого виден

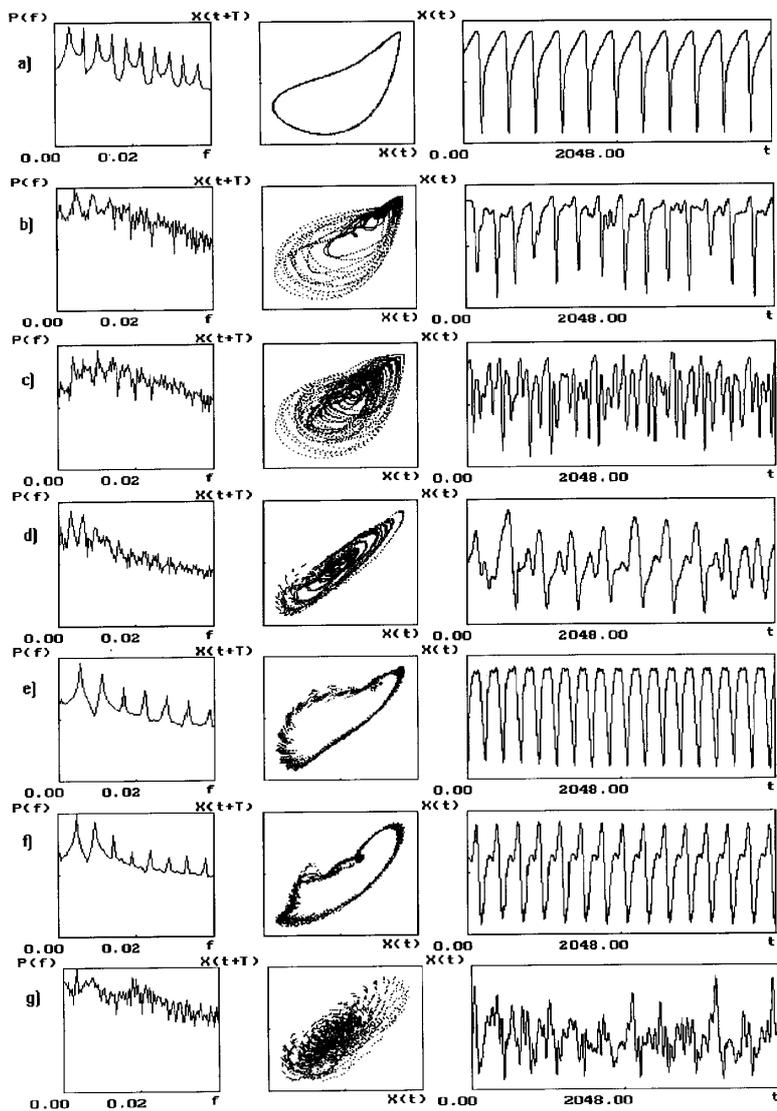


Рис. 1. Фазовые портреты, спектры мощности и временные реализации колебаний тока для различных значений параметров.

ярко выраженный пик основной частоты и пики ее гармоник, которые с увеличением α поглощаются шумовым пьедесталом. Из фазового портрета видно, что хаотический аттрактор появляется на основе одного неустойчивого предельного цикла, соответствующего притягивающему предельному множеству для периодического движения. На временной реализации кроме хаотического поведения амплитуды наблюдаются случайные сбои фазы колебаний. Это позволяет предположить наличие в системе в данном диапазоне изменения α хаоса винтового типа, образом которого в фазовом пространстве является неоднородный аттрактор. При $\alpha > 5$ (рис. 1, *c*) спектр сильно зашумлен, на нем нет четко выраженных пиков, структура аттрактора достаточно сложна и состоит из множества неустойчивых периодических орбит.

Все вышесказанное позволяет предположить наличие сложной нелинейной динамики в системе "электронный поток с ВК — электромагнитное поле". Для уточнения характеристик сложного поведения системы обратимся к определению фрактальной размерности восстановленного аттрактора. На рис. 2, *a-c* приведены зависимости наклона корреляционного интеграла [6,7] от ϵ в двойном логарифмическом масштабе для различных значений размерности пространства вложения m .

При $\alpha < 2$ (рис. 2, *a* $\alpha = 1.5$) размерность предельного множества целая, что соответствует регулярному многообразию. С увеличением надкритичности размерность становится дробной. При $2 < \alpha < 5$ (рис. 2, *b*, $\alpha = 3.7$) размерность предельного множества насыщается при размерности пространства вложения, равной четырем. Корреляционная размерность аттрактора D_e монотонно растет с увеличением α . Насыщение размерности аттрактора при $m < 5$ позволяет предположить, что система "электронный поток с ВК — электромагнитное поле" обладает $1.5 \div 2$ степенями свободы. Характер спектра, конечность и дробность фрактальной размерности позволяют утверждать, что при превышении током пучка предельного вакуумного тока в пределах $2 < \alpha < 5$ в виркаторе устанавливается режим динамического хаоса. При надкритичности $\alpha > 5$ (рис. 2, *c*, $\alpha = 12$) видно, что размерность аттрактора не насыщается при значениях размерности пространства вложения $m < 9$. Длительность временных реализаций не позволяет корректно оценить размерность аттрактора для значений $m > 9$. Такое поведение D_e оставляет вопрос о детерминированности хаотического режима при $\alpha > 5$ открытым.

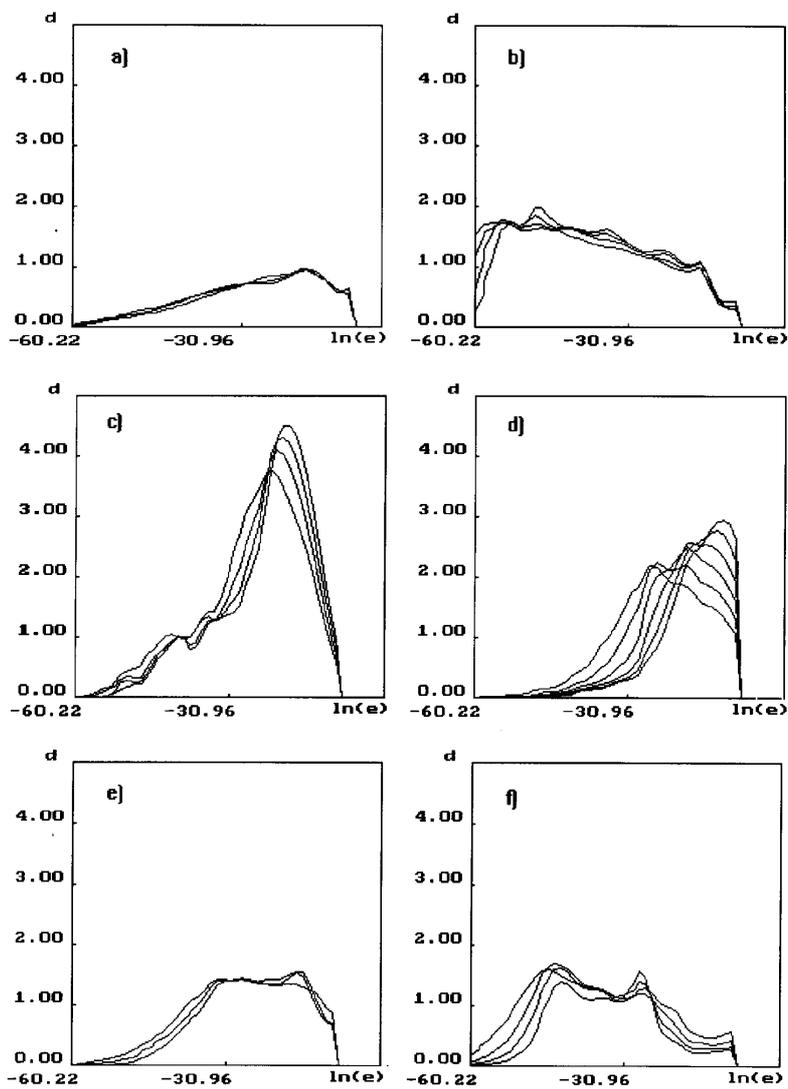


Рис. 2. Зависимость наклона корреляционного интеграла восстановленного аттрактора при различных размерностях пространства вложения m для некоторых режимов поведения.

В последнее время актуальной становится проблема управления характеристиками поведения виркаторной системы. Поэтому особый интерес представляет генератор на сверхкритическом токе РЭП с управляемой обратной связью — виртод [8]. Экспериментально было показано сильное влияние обратной связи на характеристики прибора.

Рассмотрим случай, когда сигнал обратной связи снимается из области ВК. На рис. 1, *d-f* и 2, *d-f* приведены характеристики колебаний в системе при фиксированном α для различных τ : *d*) соответствует $\tau = 20$; *e*) — $\tau = 40$; *f*) — $\tau = 60$.

Исследования показали, что динамика системы определяется соотношением между характерным масштабом колебаний в системе T_0 и временем задержки обратной связи τ . Введение обратной связи с малым временем задержки ($\tau < T_0/2$) приводит к усложнению динамики системы: в спектре поднимается шумовой пьедестал, размерность пространства вложения $m > 10$ (рис. 1, *d, 2, d*). Это связано с возбуждением большого числа степеней свободы в системе. При $\tau > T_0/2$ наблюдается упорядочение колебаний в системе вплоть до установления регулярных движений. В зависимости от τ меняется вид фазового портрета, размерность предельного множества, спектральный состав излучения. При этом характерная частота генерации меняется в пределах $(0.7 \div 1.5)\omega_0$, где ω_0 — частота свободных колебаний ВК. Заметим, что изменение времени задержки сигнала обратной связи позволяет также управлять амплитудой колебаний ВК, а следовательно, и уровнем генерируемой мощности в системе. Существует оптимальное время задержки τ , при котором максимальна электронная мощность взаимодействия P_e в системе. Отношение $(P_e)_{\max}/(P_e)_{\min} \approx 0.5$, отношение $(P_e)_{\max}$ к уровню мощности свободных колебаний ВК порядка 0.65.

На рис. 1, *g* показаны характеристики колебаний в системе для случая включения обратной связи в области коллектора. Колебания сильно нерегулярны, спектр мощности шумоподобен. Аттрактор имеет сравнительно однородную структуру.

Список литературы

- [1] Thode L.E. // High Power Microwave Sources / Ed. by V.L. Granatstein and I. Alexeff. Artech House, Boston, 1987. Ch. 14. P. 507.
- [2] Бэдсел Ч., Ленгтон А. Физика плазмы и численное моделирование. М.: Энергоатомиздат, 1989. 452 с.

- [3] *Свешников А.Г., Якунин С.А.* // Математическое моделирование. 1989. Т. 1. № 4. С. 1–25.
- [4] *Anfinogenov V.G.* Proc. of the Third International Specialist Workshop on Nonlinear dynamics of electronic system. University College Dublin, 28–29 July 1995. P. 79–82.
- [5] *Кузелов М.В., Рухадзе А.А.* Электродинамика плотных электронных пучков в плазме. М.: Наука, 1990. 336 с.
- [6] *Grassberg P., Procaccia J.* // Phys. Rev. Lett. 1983. V. 50. N 5. P. 346–356.
- [7] *Кипчатов А.А., Красичков Л.В., Андрушкевич А.В.* // Международный семинар. Нелинейные цепи и системы. Т. 2. 16–18 июня 1992, Москва, Россия. С. 308–317.
- [8] *Гадецкий Н.Н., Магда И.И., Найстетер С.И.* и др. // Физика плазмы. 1993. Т. 19. В. 4. С. 530–541.