

09

Хаотические колебания двух каскадно связанных генераторов с частотным управлением

© Д.В. Касаткин, В.В. Матросов

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

E-mail: kasatkin@neuron.appl.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 28 ноября 2005 г.

Обсуждаются вопросы генерации хаотически модулированных колебаний в автогенераторных системах с частотным управлением. Показано, что путем объединения двух таких систем в ансамбль удастся существенно расширить области генерации хаотических колебаний в пространстве параметров, при этом появляется дополнительная возможность управления свойствами колебаний за счет параметров связей.

PACS: 84.30.Ng

Идея использования в системах связи хаотических колебаний в качестве несущих нашла достаточно широкий отклик в литературе. Очевидные преимущества таких систем, связанные со свойствами широкополосности и сверхширокополосности хаотических сигналов, наличием богатых возможностей управления хаотическими колебаниями и, следовательно, возможностей модуляции хаотических колебаний, выдвинули исследования в этом направлении в ряд актуальных и перспективных [1]. Одной из ключевых проблем этого направления является проблема создания эффективных источников хаотических колебаний для различных частотных диапазонов, обладающих свойствами управляемости. Представляется перспективной разработка источников хаотических колебаний на базе генераторов с частотным и фазовым управлением (систем частотной и фазовой автоподстройки — ЧАП и ФАП), так как, с одной стороны, такие устройства широко применяются при решении актуальных задач радиофизики и радиотехники, связанных с формированием, приемом и обработкой сигналов [2], с другой стороны, эти же устройства способны генерировать модулированные колебания различной сложности [3,4]. Исследования систем ФАП

показали, что наилучших результатов по генерации хаотически модулированных колебаний удастся достичь путем объединения нескольких систем в ансамбль [5–8]. В данной работе демонстрируется, что при объединении в ансамбль ЧАП также удастся существенно увеличить области существования хаотических колебаний у этих систем.

Рассмотрим ансамбль, состоящий из двух каскадно связанных частотно-управляемых генераторов с фильтрами третьего порядка в цепях управления, с обычными и инвертированными характеристиками частотных дискриминаторов. При каскадном типе соединения входным сигналом для ЧАП₁ является опорный сигнал, а входным сигналом для ЧАП₂ является выходной с ЧАП₁. Кроме основной связи в ансамбле реализована дополнительная связь по цепям управления. С помощью этой связи удастся не только изменить общую динамику ансамбля, но и управлять свойствами генерируемых колебаний. Динамика рассматриваемого ансамбля описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \mu_1 \frac{d^3 x_1}{dt^3} + \lambda_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + \frac{dx_1}{dt} + x_1 + \Phi_1(x_1) + \kappa \Phi_2(x_2 - x_1) &= \sigma_1, \\ \mu_2 \frac{d^3 x_2}{dt^3} + \lambda_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + b \frac{dx_2}{dt} + x_2 + \Phi_2(x_2 - x_1) &= \sigma_2, \end{aligned} \quad (1)$$

где x_i и σ_i — текущие и начальные частотные рассогласования i -го генератора относительно опорного сигнала соответственно, μ_i , λ_i и b — безразмерные параметры фильтров, κ — параметр дополнительной связи, $\Phi_i(x) = 2a_i x / (1 + (a_i x)^2)$ — характеристика частотного дискриминатора в цепи управления i -го генератора, $a_i > 0$ отвечает обычной характеристике частотного дискриминатора, $a_i < 0$ — инвертированной ($i = 1, 2$).

В основе исследования динамических режимов рассматриваемого ансамбля по модели (1) лежит взаимно однозначное соответствие между аттракторами математической модели и динамическими режимами управляемых генераторов: состояния равновесия отвечают режимам стационарной генерации, предельные циклы и хаотические аттракторы — автомодуляционным режимам с регулярной и хаотической модуляцией. Таким образом, изучение областей существования различных типов динамических режимов в пространстве параметров сводится к анализу областей существования аттракторов модели (1) того или иного типа. Эти исследования можно проводить путем построения и

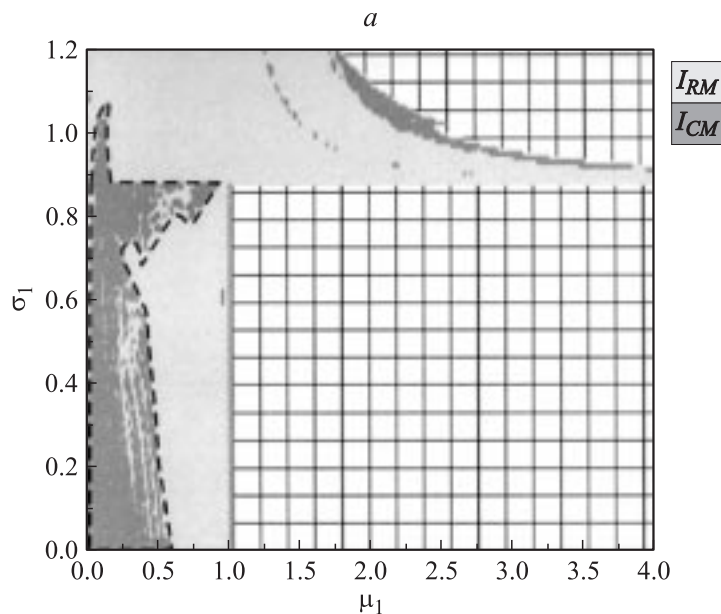


Рис. 1. Карты динамических режимов модели (1) при $\sigma_2 = 0.84$, $\mu_2 = 0.7$, $\lambda_2 = \lambda_1 = 1$, $b = 1$, $a_2 = a_1 = 10$, $\kappa = 0.1$ (а) и $\sigma_2 = 0.2$, $\mu_2 = 1$, $\lambda_2 = \lambda_1 = 1$, $b = 1$, $a_2 = a_1 = -10$, $\kappa = 0.1$ (б).

анализа двухпараметрических карт динамических режимов, алгоритм построения которых базируется на методе отображения Пуанкаре.

На рис. 1 представлены карты динамических режимов рассматриваемого ансамбля на плоскости параметров $\{\mu_1, \sigma_1\}$ в случае объединения ЧАП с обычными (рис. 1, а) и инвертированными (рис. 1, б) характеристиками частотных дискриминаторов. Здесь тип динамического режима характеризуется цветом. При рассматриваемых значениях параметров основными динамическими режимами ансамбля являются автомодуляционные режимы: I_{RM} — регулярные и I_{CM} — хаотические. Штриховкой выделены области параметров, где системы неустойчивы. Отметим, что индивидуальная динамика второго генератора при рассматриваемых значениях параметров является регулярной — режим колебаний с регулярной модуляцией, первый же генератор в зависимости от

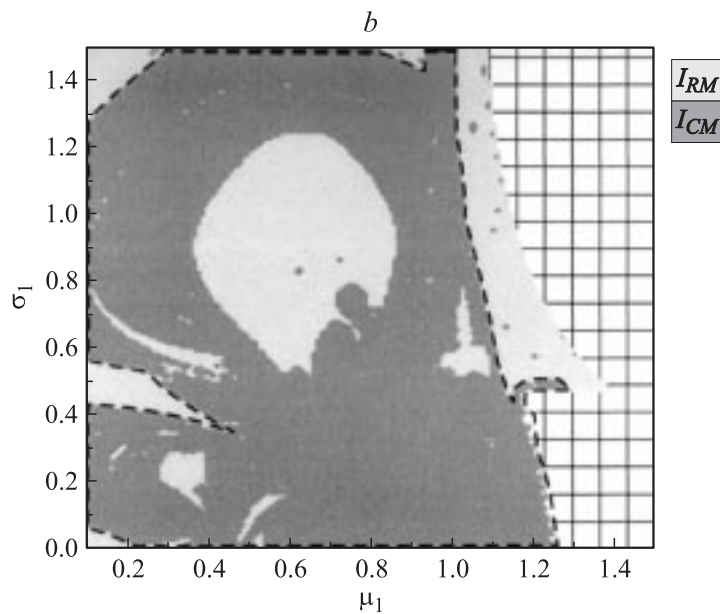


Рис. 1 (продолжение).

параметров σ_1 и μ_1 может находиться в одном из трех вышеуказанных режимов. Введение дополнительной связи κ позволяет перевести генераторы ансамбля в режим генерации хаотически модулированных колебаний даже в случае, когда первый генератор находится в режиме стационарной генерации.

Построенные карты позволяют оценить размеры областей существования динамических режимов определенного типа относительно размеров анализируемой области. На рис. 1, *a* и *b* области существования хаотических колебаний занимают соответственно 6.8 и 52%, для одиночной ЧАП с аналогичными параметрами подобные характеристики соответственно равны 2.3 и 25%.

Известно, что области существования хаотических колебаний в пространстве параметров могут содержать внутри себя подобласти с регулярной динамикой. Поэтому в качестве еще одной характеристики областей существования хаотических колебаний будем использовать показатель хаотической эффективности $I = (S_c - S_r)/S_c$, где S_c —

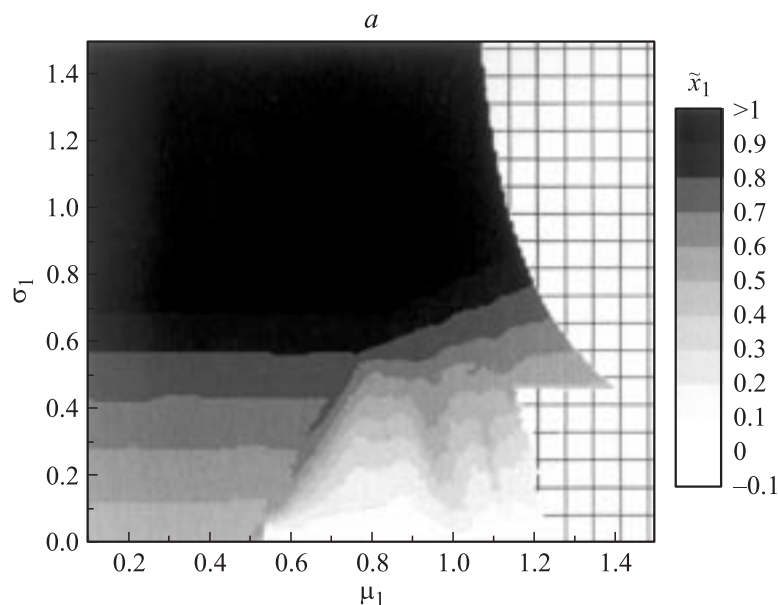


Рис. 2. Зависимости характеристик модулирующих колебаний первого генератора ансамбля от параметров μ_1 , σ_1 в случае объединения ЧАП с инвертированными характеристиками частотных дискриминаторов: среднее отклонение частоты модулирующих колебаний от опорной частоты (a), амплитуда модулирующих колебаний (b).

размер области с хаотической динамикой, ограниченной некоторым контуром, S_r — суммарный размер областей с регулярной динамикой внутри рассматриваемого контура. Показатели хаотической эффективности для областей, выделенных на рис. 1, a и b пунктиром, составляют соответственно $I = 0.82$ и $I = 0.76$. Для одиночной ЧАП эти показатели равны 0.84 в случае обычной и 0.46 в случае инвертированной характеристики дискриминатора.

Автомодуляционные колебания на выходе управляемого генератора появляются тогда, когда в цепи управления возникают модулирующие колебания. Образом модулирующих колебаний в фазовом пространстве модели (1) являются устойчивые предельные циклы и хаотические аттракторы. Характеристики этих аттракторов являются характери-

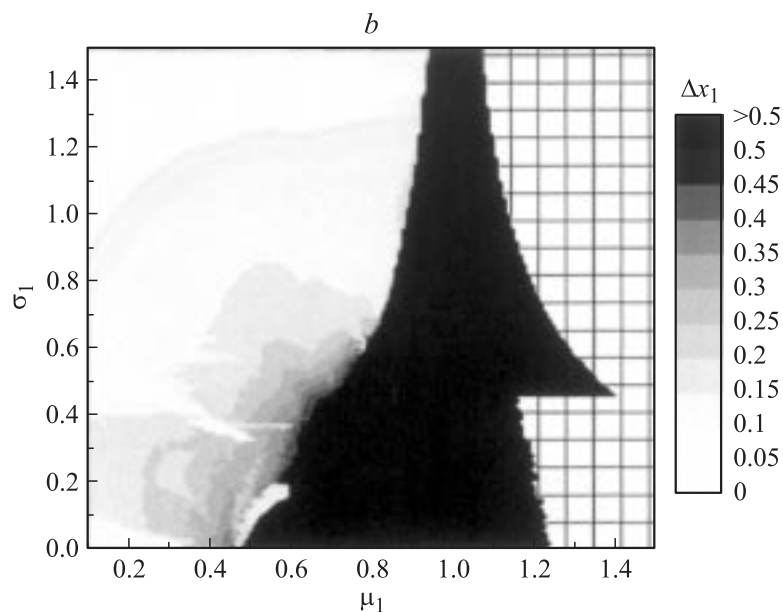


Рис. 2 (продолжение).

стиками модулирующих колебаний, в частности размеры аттрактора характеризуют глубину модуляции, а усредненные значения переменных x_1 и x_2 на этом аттракторе показывают, насколько средние частоты модулирующих колебаний отклонены от частоты опорного сигнала. На рис. 2 приведены диаграммы характеристик аттракторов, отвечающих автомодуляционным режимам, представленным на рис. 1, *b*. Эти диаграммы отражают влияние параметров ЧАП₁ на автомодуляционные режимы. Видно, что вариациями σ_1 и μ_1 можно добиться генерации хаотически модулированных колебаний, стабилизированных опорным сигналом $\bar{x}_1 \simeq 0$ (рис. 2, *a*), а также менять глубину модуляции Δx_1 в достаточно широких пределах (рис. 2, *b*).

Таким образом, представленные результаты свидетельствуют, что объединение частотно-управляемых генераторов в ансамбль предоставляет широкие возможности по генерации хаотических колебаний даже в случае, когда индивидуальная динамика объединяемых генераторов является регулярной. Показано, что объединение систем в ансамбль

позволяет расширить области генерации хаотических колебаний, а также повысить показатель хаотической эффективности этих областей по сравнению с одиночной системой. Установлено, что характеристиками автомодуляционных колебаний в ансамбле можно управлять как с помощью параметров объединяемых систем, так и с помощью параметров связей.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 05-02-17409), а также программы „Университеты России“ (проект УР.03.01.179).

Список литературы

- [1] *Дмитриев А.С., Панас А.И.* Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. М.: Изд-во физ.-мат. лит., 2002. 252 с.
- [2] *Капранов М.В., Кулешов В.Н., Уткин Г.М.* Теория колебаний в радиотехнике. М.: Наука, 1984. 320 с.
- [3] *Матросов В.В.* // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 23. С. 4–8.
- [4] *Заулин И.А., Пономаренко В.П.* // РЭ. 1993. Т. 38. № 5. С. 889–900.
- [5] *Шалфеев В.Д., Матросов В.В., Корзинова М.В.* // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 1998. № 11. С. 44–56.
- [6] *Korzinova M.V., Matrosov V.V., Shalfeev V.D.* // Int. J. Bifurcation and Chaos. 1999. V. 9. N 5. P. 963–973.
- [7] *Shalfeev V.D., Matrosov V.V.* Chaos in Circuits and Systems / Ed. by G. Chen and T. Ueta. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2002. P. 111–130.
- [8] *Мишагин К.Г., Матросов В.В., Шалфеев В.Д.* и др. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 24. С. 31–38.