

09

Экспериментальное исследование генерации хаотических колебаний в ансамбле двух каскадно-связанных фазовых систем

© К.Г. Мишагин, В.В. Матросов, В.Д. Шалфеев, В.В. Шохнин

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
E-mail: mishagin@rf.unn.ru

Поступило в Редакцию 3 июня 2005 г.

Представлены результаты экспериментального исследования хаотической динамики каскадного соединения двух фазовых систем. Произведена классификация различных хаотических режимов. Экспериментально показано, что рассматриваемая система является генератором хаотически-модулированных колебаний в широкой области пространства параметров.

В последнее время интенсивно обсуждается проблема использования динамического хаоса для передачи информации [1–3]. Для такого применения желательно, чтобы хаотический сигнал обладал широким спектром, также желательно, чтобы генерация хаотических колебаний была возможна в широкой области параметров.

Фазовые системы (системы фазовой автоподстройки — ФАП) [4] широко применяются в традиционных системах связи, основанных на использовании регулярных сигналов. Системы фазовой автоподстройки способны работать как на низких, так и на сверхвысоких частотах, обладают высокой помехоустойчивостью. В работах [2,3] было предложено использование фазовых систем для решения задач, связанных с передачей информации на основе динамического хаоса, включая задачу генерации хаотических колебаний. Известно, что в фазовой системе со сложным фильтром (например, с фильтром второго порядка) существуют регулярные и хаотические автомодуляционные режимы [5], однако области параметров, внутри которых существуют хаотические режимы, очень малы, что ограничивает использование такой системы в качестве генератора хаоса. В работах [2,3,6,7] было

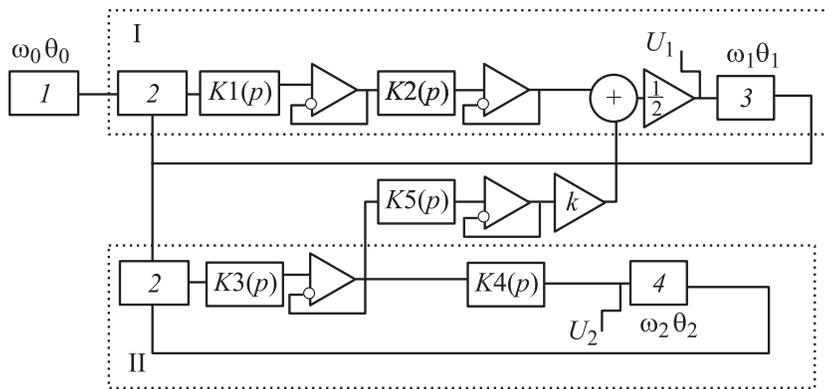


Рис. 1. Ансамбль двух каскадно-связанных фазовых систем.

показано, что объединение фазовых систем в малые ансамбли позволяет осуществить генерацию хаотических колебаний в широких и однородных областях параметров. В частности, в работе [2] произведено качественно-численное исследование модели ансамбля из двух каскадно-соединенных фазовых систем. В данной работе представлены экспериментальные результаты, подтверждающие возможность генерации хаотических сигналов в таком ансамбле в широкой области пространства параметров системы.

В качестве фазовой системы в эксперименте используется широко распространенная микросхема системы фазовой автоподстройки частоты 74НС4046А, предназначенная для синхронизации сигналов вида меандра. Данная микросхема позволяет конструировать кольцо управления системы фазовой автоподстройки, задавать частоту и полосу удержания подстраиваемых генераторов. Функциональная схема экспериментальной установки изображена на рис. 1. На представленной схеме: 1 — опорный генератор; 2 — фазовый дискриминатор, который реализует операцию булевой алгебры ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ; 3, 4 — генераторы разрывных колебаний, частота которых управляется напряжением; $K_{1,2,3,4,5}(p)$ — коэффициенты передачи низкочастотных

фильтров первого порядка ($p = d/dt$), k — коэффициент связи:

$$K_i(p) = \frac{1}{1 + T_i p}, \quad (1)$$

где $T_i = R_i C_i (i = 1 \dots 5)$ — постоянные времени фильтров, $R_1 = R_3 = 2.2 \text{ k}\Omega$, $R_4 = R_5 = 5 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 0 = 10 \text{ k}\Omega$, $C_1 = C_3 = 6.8 \text{ nF}$, $C_2 = C_4 = C_5 = 33 \text{ nF}$, $T_1 = T_2 = 14.9 \mu\text{s}$, $T_4 = T_5 = 165 \mu\text{s}$, $T_3 = 0 = 330 \mu\text{s}$ (изменяемый параметр). Частота колебаний в генераторах 3, 4 при отсутствии внешнего сигнала и шума на входе: $f_1 = f_2 = 71 \text{ kHz}$ — центральная частота. В ходе экспериментальных измерений частоты генераторов 3, 4 не изменялись. Сигнал, поступающий на вход фазовой системы и генерируемый на ее выходе, представляет собой однополярный меандр с амплитудой 5 V. Максимальные частотные расстройки входного сигнала для систем I, II относительно центральной частоты, при которых генераторы 3, 4 могут быть синхронизованы (полосы удержания $\Delta F_{1,2}$), имеют следующие значения: $\Delta F_1 = 13.85 \text{ kHz}$, $\Delta F_2 = 27.7 \text{ kHz}$. В ходе экспериментальных измерений варьировались следующие величины: коэффициент обратной связи, направленной от цепи управления второй фазовой системы в цепь управления первой фазовой системы $k (k = 0-1)$, частота опорного генератора f_0 и инерционность T_2 второго фильтра в кольце управления системы I.

В фазовых системах возможны режимы, когда разность фаз колебаний управляемого генератора и опорного сигнала является ограниченной (синхронные и квазисинхронные режимы) либо неограниченно возрастает или убывает (режимы биений). Для идентификации различных динамических режимов и визуализации фазовых портретов были сконструированы два цифровых детектора для определения разности фаз между опорным сигналом и сигналом на выходе генераторов в системах I и II. Таким образом, оказывается возможным определение разностей фаз $\theta_1 - \theta_0$ и $\theta_2 - \theta_0$ (рис. 1) на интервале от 0 до 2π .

В представленной экспериментальной схеме фазовые системы имеют фильтры второго порядка в кольцах управления. Динамика изолированной фазовой системы с фильтром второго порядка описана в работе [5], показано, что данная система демонстрирует хаотическую динамику в малых областях в пространстве параметров. Эти области находятся вне пределов изменения параметров рассматриваемой экспериментальной схемы. Таким образом, связываемые системы обладают

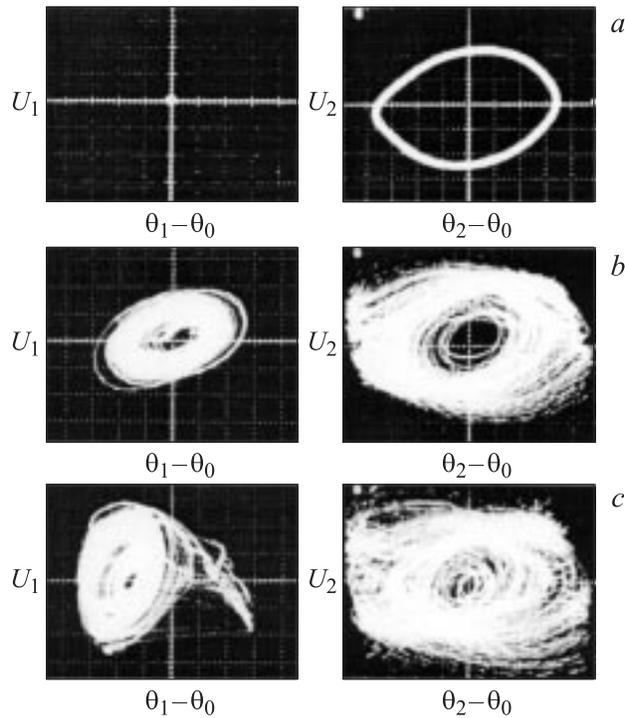


Рис. 2. Проекция фазовых портретов (*a–c*), область генерации хаотически-модулированных колебаний в первой фазовой системе (*d*), спектр хаотически-модулированного колебания (*e*).

исключительно регулярной собственной динамикой в доступной области параметров. В первой фазовой системе возможен либо синхронный режим, либо режим биений, тем самым ее динамика не отличается от динамики фазовой системы с фильтром первого порядка. Во второй фазовой системе кроме синхронного режима и биений также возможен регулярный квазисинхронный режим. В таком режиме частота управляемого генератора второй системы изменяется периодически относительно некоторой средней, равной частоте опорного сигнала, при этом разность фаз $\theta_2 - \theta_0$ ограничена ($|\theta_2 - \theta_0| < 2\pi$).

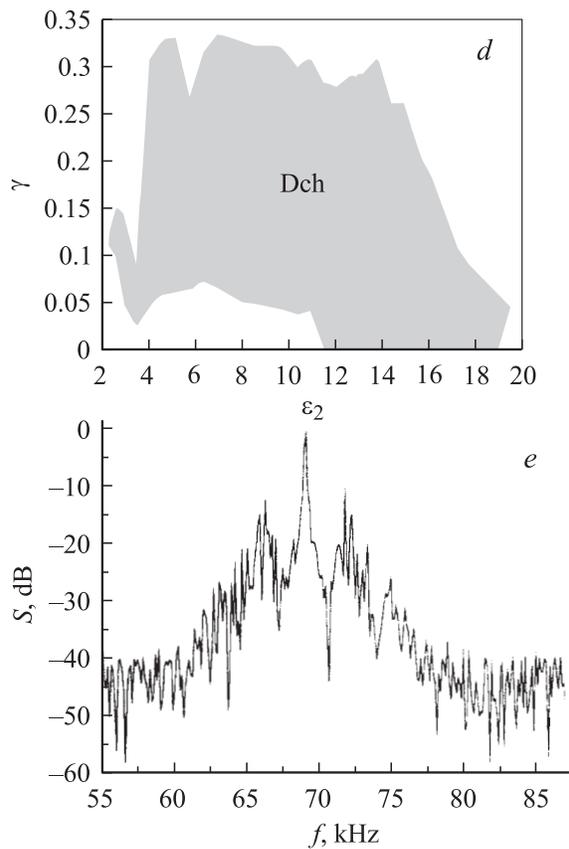


Рис. 2 (продолжение).

На рис. 2, *a–c* представлены проекции фазовых портретов системы для различных значений параметра обратной связи k , частота опорного колебания $f_0 = 69.6$ kHz, $R_2 = 5$ k Ω . На представленных рисунках вдоль вертикальных осей отложены величины напряжений на входах управляемых генераторов $U_{1,2}$ (рис. 1), которые пропорциональны мгновенным разностям частот управляемых генераторов и опорного колебания, а вдоль горизонтальных осей отложены значения разностей

фаз $\theta_1 - \theta_0$ и $\theta_2 - \theta_0$. Таким образом, снимки слева соответствуют проекциям на переменные для первой фазовой системы, а рисунки справа — для второй фазовой системы.

Поясним процесс возбуждения хаотических колебаний в экспериментальной схеме, проиллюстрированный на рис. 2, *a–c*. Когда обратная связь между фазовыми системами отсутствует, первая фазовая система находится в режиме синхронизации, а вторая — в регулярном квазисинхронном режиме (рис. 2, *a*). Введение обратной связи приводит к возникновению колебаний в цепи управления первой фазовой системы, которые становятся хаотическими при достаточно малом значении параметра связи $k \approx 0.04$ (диагностика хаотического режима производится визуально по наблюдению проекций фазовых портретов). Так как переход к хаосу происходит в крайне узкой области изменения параметра k , то сценарий перехода экспериментально не наблюдается, можно лишь заметить, что данный переход является мягким, т.е. хаотический аттрактор возникает в окрестности регулярного предельного движения, теряющего устойчивость. На рис. 2, *b* представлены проекции фазовых портретов для значения параметра обратной связи $k = 0.3$. В первой системе наблюдаются хаотические колебания, при этом разность фаз $\theta_1 - \theta_0$ ограничена. Такой режим соответствует генерации на выходе первого управляемого генератора квазисинхронных колебаний, частота которых хаотически изменяется около некоторой средней, стабилизированной относительно частоты опорного сигнала. Такие колебания относятся к типу хаотически-модулированных колебаний и представляются наиболее интересными [3] с точки зрения их использования в качестве хаотической несущей для передачи информации. Во второй системе разность фаз $\theta_1 - \theta_0$ не ограничена, такие колебания соответствуют режиму хаотических биений. При увеличении параметра $k \geq 0.6$ первая система также переходит в режим хаотических биений (рис. 2, *c*, $k = 0.6$). В рассматриваемой экспериментальной схеме при наложенных ограничениях на параметры ($f_1 = f_2$, $k = 0 - 1$, $R_2 = 0 - 10 \text{ k}\Omega$ и других фиксированных параметрах) наблюдаются следующие хаотические режимы: либо генерация хаотически-модулированных колебаний в первой фазовой системе и генерация колебаний в режиме хаотических биений во второй системе, либо генерация в режимах хаотических биений в обеих системах.

В результате экспериментального исследования установлено, что рассматриваемая схема способна генерировать хаотически-модулированные колебания на выходе первой фазовой системы в широкой области параметров. Область существования такого режима представлена на рис. 2, *d* в плоскости параметров (γ, ε_2) при $k = 0$, где $\gamma = (f_1 - f_0)/\Delta F_1$, $\varepsilon_2 = R_2 C_2 \Delta F_1$. Аналогичная область существования такого режима имеет место для отрицательных значений γ . Можно отметить, что полученная область генерации хаотически-модулированных колебаний хорошо согласуется с результатами качественно-численного исследования.

На рис. 2, *e* представлен экспериментально измеренный спектр мощности хаотически-модулированного колебания на выходе первой фазовой системы. Спектр представлен в окрестности первой гармоники опорного колебания (напомним, что в данной схеме используются генераторы разрывных колебаний, дающие на выходе сигнал вида меандра), равной в данном случае $f_0 = 69$ kHz, другие параметры: $k = 0.3$, $R_2 = 5$ kΩ. Одной из принципиально важных характеристик спектра является его ширина, которая для хаотически-модулированного колебания может быть оценена как

$$\eta = \frac{\Delta f}{f_0} \approx 0.25, \quad (2)$$

где Δf — ширина спектра на уровне -40 dB. Такая оценка позволяет нам отнести хаотически-модулированные сигналы, генерируемые в рассматриваемой схеме, к классу широкополосных.

Таким образом, в данной работе впервые экспериментально получена генерация хаотических колебаний в ансамбле связанных фазовых систем. Продемонстрированы различные хаотические режимы (квази-синхронные хаотические колебания, хаотические биения). Показано, что ансамбль двух каскадно-связанных фазовых систем позволяет генерировать хаотически-модулированные колебания в широкой области параметров системы. Показано, что хаотически-модулированные колебания обладают широким спектром.

Работа поддержана грантом РФФИ (№ 05-02-17409), программой „Университеты России“ (УР.03.01.179) и программой „Развитие научного потенциала высшей школы“, а также академической программой компании Интел.

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] *Korsinova M.V., Matrosov V.V., Shalfeev V.D.* // Int. J. Bifurcation and Chaos. 1998. V. 9. N 5. P. 963–973.
- [3] *Шалфеев В.Д., Матросов В.В., Корзинова М.В.* // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 1998. № 11. С. 44–56.
- [4] *Системы фазовой синхронизации* / Под ред. В.В. Шахгильдяна, Л.Н. Белюстиной. М.: Радио и связь, 1982. 288 с.
- [5] *Матросов В.В.* // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 23. С. 4–8.
- [6] *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. 111–129.
- [7] *Матросов В.В., Касаткин Д.В.* // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48. С. 637–645.