NON-LINEAR FILTERING OF CHAOTIC SIGNAL IN THE PRESENCE OF NOISE

A.N. Kazimirov, kazimirovan@susu.ru, V.F. Telezhkin, telezhkinvf@susu.ru
South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The creation of radio engineering systems based on the effects of stochastic and chaotic dynamic is a promising direction. The task of developing such systems must be oriented toward using the results of theoretical studies of processes in nonlinear radiophysical systems. The subject of this study is the nonlinear filtering of a mixture of chaotic oscillations and noise based on the stochastic resonance effect occurring in a bistable system with the aim of isolating the information chaotic signal. Usually, noise is considered to be “white”, and the signal is narrow-band. As a bistable system, a Schmitt trigger can be used. For narrowband signals, the stochastic resonance effect has been studied in sufficient detail theoretically, for broadband information signals, applied research is insufficient. The stochastic resonance effect is a phenomenon in which the response of a nonlinear system to a weak external signal amplifies with increasing noise intensity to some optimal value. In the study of radio engineering systems, chaotic oscillations can be used as information systems. Theoretical basis for research of information processing systems in radio engineering systems using chaotic signals is research in the field of nonlinear radiophysics. Of particular importance in this case is the selection of solutions at the model level, in particular, based on the results of circuit simulation of practically realized devices on the existing element base.

1. Introduction

Development of radio technical systems based on the effects of stochastic and chaotic speaker is promising. The task of developing such systems it is necessary to focus on using the results of theoretical research of processes in nonlinear radiophysical systems. To describe the dynamics of such systems are used nonlinear differential equations of Lorenz or Ressler model type [1, 2] are mainly used to describe the dynamics of such systems. Currently, to generate chaotic signals are used by models on the basis of the generator Chua [3, 4], logistic map, TENT-dimensional display and two dimensional display of Hannon [5–9], three or more high-dimensional mappings display Richter [10–14], the generator of the Van der Pol nonlinear feedback [15].

The subject of this research is the nonlinear filtering of a mixture of chaotic oscillations and noise on the basis of the effect of stochastic resonance occurring in a bistable system, with the objective of allocating the information of a chaotic signal. Usually believe the noise is “white”, and the signal is narrowband. As a bistable system can be applied Schmitt trigger. In this formulation, the effect of stochastic resonance is investigated completely enough in theory. The effect of stochastic resonance is a phenomenon in which the response of a nonlinear system to a weak external signal increases with the increase of the noise intensity up to a certain optimum value. The real-time information signals have a certain frequency band, taking into account current trends on the use of complex modulation schemes and the extension band signals to transmit information, it is necessary to consider the phenomenon of stochastic resonance in application to such signals. When you use the phenomenon of stochastic resonance in a bistable nonlinear dynamical system, the conditions for enhancing weak information signal as a result of its interaction with noise. For the simulation of a real information signal (speech, music) can be used of the chaotic oscillation. Chaos, presented in the form of time sequence data is viewed as a manifestation of a deterministic dynamics, albeit complex, typical for nonlinear systems. From a modern point of view of chaotic and stochastic oscillations can be identified by various methods. Nonlinear dy-
Краткие сообщения

Нематические системы с хаотической динамикой, и под влиянием шума изучаются в теоретических рамках. Здесь имеется исследование в области нелинейного фильтрования, но они посвящены сигналам с классическими модами. Чтобы привести теоретические исследования на уровень математических моделей для практического использования в радиоинженерных системах, например, эффект стохастической резонанса для сигнальной обработки с интеграцией сигнала и шума представляет собой вызов для дальнейших исследований. В большинстве исследований отмечено потенциальное использование эффекта стохастической резонанса для улучшения отношения сигнальной мощности к шумовой мощности. Основывается на этих процессах в практическом аспекте, программа симуляции Multisim. Другие результаты математического моделирования были представлены на предыдущих конференциях [16].

2. Моделирование

В Multisim создан генератор хаотических колебаний на основе нелинейного фильтра на основе бистабильной системы, триггера Schmitt, источник шума — внутренний генератор “thermal_noise”. Что происходит, в таком системе, процессы изучаются и анализируются с использованием виртуальных инструментов. На рис. 1 показан схемный чертеж всего устройства. Генерация хаотических колебаний — транзисторный генератор с резонансной системой, типа лестницы. Schmitt trigger и другие вспомогательные устройства собраны на операционных усилителях.

![Fig. 1](image)

В Fig. 2 показан пример всего устройства, процессы отображаются на виртуальных приборах. Слева вверху показаны формы сигнала и шума, проходящие через нелинейный фильтр колебаний. Внизу соответственно, реализация шума и сигнала с добавленным шумом. В правой части вверху — спектр сигнала с добавленным шумом, спектр сигнала и спектр колебаний на выходе нелинейного фильтра. Параметры всех трех спектрометров одинаковые [17].
In the absence of noise the signal level is insufficient to switch the Schmitt trigger, so the output signal of the nonlinear filter (Fig. 3).

The spectrum of chaotic oscillations (envelope spectrum) at the output of the transistor oscillator is shown in Fig. 4.

In Fig. 5 the spectrum of the noise added to the chaotic oscillation is shown.

A mixture of chaotic oscillations and noise, and separate the “noise path” is shown in Fig. 6.

Switching of the Schmitt trigger begins to happen, but the noise level is still far from optimal and the dynamics of the process at the output of the nonlinear filter does not match the signal, chaotic oscillation at the input (Fig. 7).
If the noise level increases and becomes close to the optimum, then input signal and its spectrum appear quite noisy (Fig. 8 and 9).
The input oscillation and the oscillation output of the Schmitt trigger for this case is shown in Fig. 10.
In the case of optimal noise spectrum of the input fluctuations (additive mixture of chaotic oscillations and noise) is shown in Fig. 11, and the chaotic oscillation and the oscillation at the output of the nonlinear filter – in Fig. 12. The spectrum of output fluctuations, respectively, is in Fig. 13.

With increasing noise levels above the optimum in Fig. 14 shows the original chaotic oscillation and the oscillation at the output of the nonlinear filter. The spectrum of output oscillations is in Fig. 15.
In the spectrum of the output oscillations increases the level of high frequency components and the whole dynamics of the output process less corresponds to the original chaotic oscillation.

Studies have shown the possibility of separating complex signal from its mixture with noise. Circuit simulation reduces the time of study compared to the theoretical research and then will quickly move to the physical implementation of the device.

**References**

1. Lorenz E.N. Deterministic Nonperiodic flow. *J. Atmos. Sci.*, 1963, vol. 20, pp. 130–133.
2. Rossler O.E. An Equation for Continuous Chaos. *Phys. Lett. A.*, 1976, vol. 57A, 5, pp. 397–398.
3. Matsumoto T. A Chaotic Attractor from Chua’s Circuit. *IEEE Trans. Circuits Syst.*, 1984, vol. CAS-31, pp.1055–1058.
4. Zlong G.-Q., Ayrom F. Experimental Confirmation of Chaos from Chua’s Circuit. *Int. J. Circuit Theory Appl.*, 1985, vol. 13, pp. 93–98.
5. Carcasses J., Mira C., Bosch M., Simo C., Tatjer J.C. “Crossroad Area – Spring Area” Transition (I) Parameter Plane Representation. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 1991, vol. 1, no. 1, pp. 183–196.
6. Carcasses J., Mira C., Bosch M., Simo C., Tatjer J.C. “Crossroad Area – Spring Area” Transition (II). Foliated Parametric Representation. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 1991, vol. 1, no. 2, pp. 339–348.
Краткие сообщения

7. Elhadj Z., Sprott J.C. A Minimal 2-Dquadratic Map with Quasi-periodic Route to Chaos. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2008, no. 5, pp. 1567–1577. DOI: 10.1142/S021812740802118X
8. Froeschlé C., Lega E., Guzzo M. Analysis of the Chaotic Behaviour of Orbits Diffusing along the Arnold Web. Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 2006, vol. 95, iss. 1-4, pp. 141–153. DOI: 10.1007/s10569-006-9004-2
9. Guzzo M., Lega E., Froeschlé C. First Numerical Evidence of Global Arnold Diffusion in Quasi-Integrable Systems. Discrete and Continuous Dynamical Systems – Series B, 2005, vol. 5, no. 3, pp. 687–698. DOI: 10.3934/dcdsb.2005.5.687
10. Richter H. The Generalized Henon Maps: Examples for Higher-Dimensional Chaos. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2002, vol. 12, no. 6, pp. 1371–1384. DOI: 10.1142/s0218127402005121
11. Richter H. On a Family of Maps with Multiple Chaotic Attractors. Chaos, Solitons & Fractals, vol. 36, no. 3, 2008, pp. 559–571. DOI: 10.1016/j.chaos.2007.07.089
12. Elhadj Z., Sprott J.C. Classification of Three-Dimensional Quadratic Diffeomorphisms with Constant Jacobian. Frontiers of Physics in China, 2009, vol. 4, no. 1, pp. 111–121. DOI: 10.1007/s11467-009-0005-y
13. Kaneko K. Doubling of Torus. Progress of Theoretical Physics, 1983, vol. 69, no. 6, pp. 1806–1810. DOI: 10.1143/ptp.69.1806
14. Stagliano J., Wersingera Jr., Slaminkab E. Doubling Bifurcations of Destroyed T2 Tori. Physica D, 1996, vol. 92, no. 3-4, pp. 164–177. DOI: 10.1016/0167-2789(95)00273-1
15. Beck C., Schlogl F. Thermodynamics of Chaotic Systems. Cambridge. Cambridge Univ. Press, 1993. 461 p.
16. Kazimirov A.N., Telezhkin V.F. [Generator of Superbroadband Fractal Signal for Radio Engineering Communication Systems]. Doklady 16-y Mezhdunarodnoy konferentsii “Tsifrovaya obrabotka signalov i ikh primenenie” (DSPA-2014) [Reports of 16-th International Conference “Digital Processing of Signals and its Application”] (DSPA-2014). Vol. 1. Moscow, 2013, pp. 401–404. (in Russ.)
17. Dombrovsky A.N., Reshetnyak S.A. [Stochastic Resonance and Filtration of Signals in Nonlinear System of the Second Order]. Radio Engineering, 2007, no. 9. pp. 19–25. (in Russ.)

Received 7 March 2018

УДК 612.17 (075.8) DOI: 10.14529/ctcr180314

НЕЛИНЕЙНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ХАОТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ПРИ НАЛИЧИИ ШУМОВ

A.N. Kazimirov, V.F. Telezhkin
Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Создание радиотехнических систем на основе эффектов стохастической и хаотической динамики является перспективным направлением. Задачу разработки таких систем необходимо ориентировать на использование результатов теоретических исследований процессов в нелинейных радиофизических системах. Предметом настоящего исследования является нелинейная фильтрация смеси хаотического колебания и шума на основе эффекта стохастического резонанса, происходящего в бистабильной системе, с целью выделения информационного хаотического сигнала. Обычно полагают шум «белым», а сигнал узкополосным. В качестве бистабильной системы может быть применен триггер Шмитта. Для узкополосных сигналов эффект стохастического резонанса исследован достаточно подробно в теоретическом плане, для широкополосных информационных сигналов прикладные исследования недостаточны. Эффект стохастического резонанса — это явление, при котором отклик нелинейной системы
на слабый внешний сигнал усиливаются с ростом интенсивности шума до некоторого его оптимального значения. При исследовании радиотехнических систем в качестве информационных могут использоваться хаотические колебания. Теоретической базой для исследований систем обработки информации в радиотехнических системах с использованием хаотических сигналов служат исследования в области нелинейной радиофизики. Особое значение при этом имеет отбор решений на модельном уровне, в частности по результатам схемотехнического моделирования практически реализуемых устройств на существующей элементной базе.

Ключевые слова: стохастический резонанс, хаотическая динамика, бистабильная система, триггер Шмитта, нелинейная динамическая система, хаотическая динамика, оптимальный уровень шума, нелинейный фильтр, спектральный анализ исследуемых колебаний.

**Литература**

1. Lorenz, E.N. Deterministic Nonperiodic flow / E.N. Lorenz // J. Atmos. Sci. – 1963. – Vol. 20. – P. 130–133.
2. Rossler, O.E. An Equation for Continuous Chaos / O.E. Rossler // Phys. Lett. A. – 1976. – Vol. 57A, 5. – P. 397–398.
3. Matsumoto, T. A Chaotic Attractor from Chua’s Circuit / T. Matsumoto // IEEE Trans. Circuits Syst., – 1984. – Vol. CAS-31. – P. 1055–1058.
4. Zong, G.-Q., Ayrom F. Experimental Confirmation of Chaos from Chua’s Circuit / G.-Q. Zong, F. Ayrom // Int. J. Circuit Theory Appl. – 1985. – Vol. 13. – P. 93–98.
5. “Crossroad Area – Spring Area” Transition (I) Parameter Plane Representation / J. Carcasses, C. Mira, M. Bosch et al. // International Journal of Bifurcation and Chaos. – 1991. – Vol. 1, no. 1. – P. 183–196.
6. “Crossroad Area – Spring Area” Transition (II), Foliated Parametric Representation / J. Carcasses, C. Mira, M. Bosch et al. // International Journal of Bifurcation and Chaos. – 1991. – Vol. 1, no. 2. – P. 339–348.
7. Elhadj, Z. A Minimal 2-Dquadartical Map with Quasi-periodic Route to Chaos / Z. Elhadj, J.C. Sprott // International Journal of Bifurcation and Chaos. – 2008. – No. 5. – P. 1567–1577. DOI: 10.1142/S021812740802118X
8. Froeschlé, C. Analysis of the Chaotic Behaviour of ORbits Diffusing along the Arnold Web / C. Froeschlé, E. Lega, M. Guzzo // Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy. – 2006. – Vol. 95, iss. 1–4. – P. 141–153. DOI: 10.1007/s10569-006-9004-2
9. Guzzo, M. First Numerical Evidence of Global Arnold Diffusion in Quasi-Integrable Systems / M. Guzzo, E. Lega, C. Froeschlé // Discrete and Continuous Dynamical Systems – Series B. – 2005. – Vol. 5, no. 3. – P. 687–698. DOI: 10.3934/dcdsb.2005.5.687
10. Richter, H. The Generalized Henon Maps: Examples for Higher-Dimensional Chaos / H. Richter // International Journal of Bifurcation and Chaos. – 2002. – Vol. 12, no. 6. – P. 1371–1384. DOI: 10.1142/s0218127420051212
11. Richter, H. On a Family of Maps with Multiple Chaotic Attractors / H. Richter // Chaos, Solitons & Fractals. – 2008. – Vol. 36, no. 3., P. 559–571. DOI: 10.1016/j.chaos.2007.07.089
12. Classification of Three-Dimensional Quadratic Diffeomorphisms with Constant Jacobian / Z. Elhadj, J.C. Sprott // Frontiers of Physics in China. – 2009. – Vol. 4, no. 1. – P. 111–121. DOI: 10.1007/s11467-009-0005-y
13. Kaneko, K. Doubling of Torus / K. Kaneko // Progress of Theoretical Physics. – 1983. – Vol. 69, no. 6. – P. 1806–1810. DOI: 10.1143/ptp.69.1806
14. Stagliano, J. Doubling Bifurcations of Destroyed T2 Tori / J. Stagliano, J. Wersingera, E. Slaminkeb // Physica D. – 1996. – Vol. 92, no. 3–4. – P. 164–177. DOI: 10.1016/0167-2789(95)00273-1
15. Beck, C. Thermodynamics of Chaotic Systems / C. Beck, F. Schlogl. – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1993. – 461 p.
16. Казимиров, А.Н. Генератор сверхширокополосного фрактального сигнала для радиотехнических систем связи / А.Н. Казимиров, В.Ф. Тележкин // Доклады 16-й Международной конференции “Цифровая обработка сигналов и их применение” (DSPA-2014). – М., 2013. – Т. 1. – С. 401–404.
Краткие сообщения

17. Домбровский, А.Н. Стохастический резонанс и фильтрация сигналов в нелинейной системе второго порядка / А.Н. Домбровский, С.А. Решетняк // Радиотехника. – 2007. – № 9. – С. 19–25.

Казимиров Андрей Николаевич, канд. техн. наук, доцент кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; kazimirovan@susu.ru.

Тележкин Владимир Федорович, д-р техн. наук, профессор кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; telezhkinvf@susu.ru.

Поступила в редакцию 7 марта 2018 г.

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Kazimirov, A.N. Non-Linear Filtering of Chaotic Signal in the Presence of Noise / A.N. Kazimirov, V.F. Telezhkin // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2018. – Т. 18, № 3. – С. 133–142. DOI: 10.14529/ctcr180314

FOR CITATION

Kazimirov A.N., Telezhkin V.F. Non-Linear Filtering of Chaotic Signal in the Presence of Noise. Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics, 2018, vol. 18, no. 3, pp. 133–142. DOI: 10.14529/ctcr180314