

Выделение радиосигналов на фоне шумов на основе эффекта стохастического резонанса

Харченко О. И., Карташов В. М.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина

E-mail: oksana.kharchenko@nure.ua, volodymyr.kartashov@nure.ua

В ряде приложений радиотехники и радиолокации необходимо решать задачу обнаружения сигналов в сложной помеховой обстановке. Основной и наиболее сложной проблемой приема сигналов является проблема помехоустойчивости, т.е. задача отыскания наилучших способов приема радиосигналов при наличии помех. Сложность проблемы существенно усугубляется вследствие резкого увеличения числа источников сигналов, что приводит к повышению интегрального фона электромагнитных помех и, как следствие, усложнению задачи выделения полезного сигнала. Ослабляя вредное действие помех, можно увеличить надежность передачи сообщений и дальность действия радиотехнических систем. Источники шума могут не просто мешать работе нелинейных устройств, но и, наоборот, существенно увеличивать чувствительность систем к слабым внешним воздействиям. Одним из примеров такого воздействия является стохастический резонанс (СР). Стохастический резонанс характеризуется конструктивной ролью шума, т.е. предоставляет возможность усиливать за счет шума сигналы с амплитудой существенно меньшей его интенсивности. СР является междисциплинарным понятием и обнаруживается в различных областях науки от социологии до медицины и биологии. Приведены результаты анализа выделения радиосигналов с помощью эффекта СР. В качестве объекта исследования рассмотрены линейно-частотно модулированный и фазо-кодо-манипулированный сигналы, которые являются сигнальной базой радиолокационных и телекоммуникационных систем. Рассчитан амплитудный спектр радиосигналов и сигналов на выходе стохастического резонатора, в этом случае показана возможность усиления сигналов и уменьшения шума на выходе стохастического резонатора. Определена зависимость отношения сигнал/шум на выходе стохастического резонатора для моделей колебаний в виде аддитивной смеси радиосигнала и белого гауссова шума при различных значениях дисперсии входного шума. Показано, что при любом значении дисперсии шума отношения сигнал/шум на выходе стохастического резонатора выше, чем на выходе согласованного фильтра. Показано, что эффект стохастического резонанса обеспечивает выделение радиосигнала на фоне белого гауссова шума.

Ключевые слова: стохастический резонанс; стохастический резонатор; отношение сигнал/шум; согласованный фильтр; дисперсия; белый гауссов шум

DOI: [10.20535/RADAP.2021.86.39-44](https://doi.org/10.20535/RADAP.2021.86.39-44)

Введение

В ряде приложений радиотехники и радиолокации необходимо решать задачу обнаружения сигналов в сложной помеховой обстановке. Основной и наиболее сложной проблемой приема сигналов является проблема помехоустойчивости, т.е. задача отыскания наилучших способов приема радиосигналов при наличии помех [1, 2]. Сложность проблемы существенно усугубляется вследствие резкого увеличения числа источников сигналов, что приводит к повышению интегрального фона электромагнитных помех и, как следствие, усложнению задачи выделения полезного сигнала. Ослабляя вредное действие помех, можно увеличить надежность передачи сообщений и дальность действия радиотехнических систем.

Поэтому повышение помехоустойчивости радиоприемных устройств представляется одним из перспективных и практически возможных методов увеличения дальности действия телекоммуникационных и других радиотехнических систем [1, 2].

Обнаруженный в конце прошлого века эффект стохастического резонанса (СР) [3, 4] открывает широкие перспективы в приложении к выделению радиосигналов.

1 Эффект стохастического резонанса

Понятие СР было введено физиками, исследующими возникновение ледниковых периодов [5].

Данный термин определяет явление в нелинейных системах, когда слабый входной сигнал может быть усилен и оптимизирован с помощью шума. Эффект СР характеризует отклик нелинейной системы на слабый входной сигнал. При этом выходные параметры нелинейной системы, такие как коэффициент усиления и отношение сигнал/шум, при определенных условиях имеют отчетливо выраженный максимум.

Уравнение СР имеет вид [4]

$$dy/dt = y(t) - y(t)^3 + s(t) + \xi(t), \quad (1)$$

где $\xi(t)$ – белый гауссов шум; $s(t)$ – процесс на входе нелинейного устройства, обладающего эффектом СР; $y(t)$ – процесс на выходе нелинейного устройства, обладающего эффектом СР.

В настоящее время это явление признано фундаментальным и обнаружено в различных областях науки, от биологии, химии до социологии [6].

Нелинейное устройство, обладающее эффектом СР, носит название стохастический резонатор [7].

2 Выделение радиоимпульса с помощью эффекта СР

В настоящее время в радиотехнических и коммуникационных системах передача информации осуществляется с применением радиосигналов, где в свою очередь используются различные виды модуляций и манипуляций сигналов.

Частотно-модулированные сигналы широко применяются в радиолокации, радионавигации, системах связи и т.д. Использование сложных сигналов в радиолокации обеспечивает высокую разрешающую способность по дальности и скорости и позволяет существенно повысить информативность радиосистем. Наиболее часто используются линейно-частотно модулированные (ЛЧМ) и фазо-кодо манипулированные (ФКМ) сигналы, как наиболее простые в формировании и обработке, которые обеспечивают требуемые качественные параметры РЛС. Основные их достоинства: большие дальность и вероятность обнаружения сочетаются с высоким обнаружением по дальности, надежность обнаружения сложных целей и селекции, высокая надежность классификации целей по отраженным сигналам, защищенность от узкополосных помех [8, 9].

2.1 Выделение ЛЧМ радиоимпульсов из аддитивной смеси с шумом

Особенностью радиоимпульсов с ЛЧМ является изменение во времени мгновенной частоты по линейному закону [10]:

$$\omega(t) = \omega_0 + \beta t,$$

где ω_0 – несущая частота; β – коэффициент размерности рад./с², равный скорости изменения мгновенной частоты.

На Рис. 1 приведен пример выделения сигнала с ЛЧМ с помощью эффекта СР. Наглядно видно усиление сигнала и уменьшение шума на выходе.

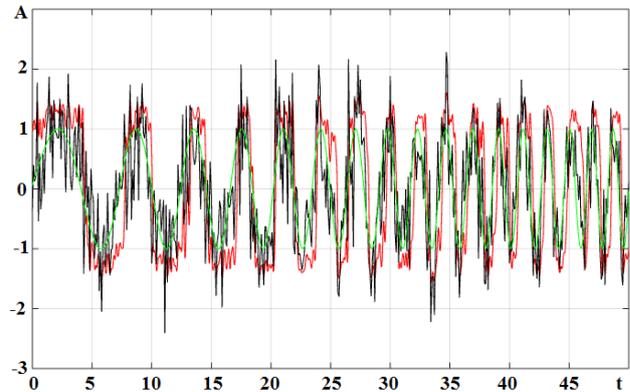


Рис. 1. Выделение ЛЧМ сигнала из аддитивной смеси сигнала и гауссова шума (входной сигнал – зеленый, аддитивная смесь сигнала и гауссова шума – черный; дисперсия входного шума $D = 0.4$, выходной сигнал – красный)

Амплитудные спектры сигналов приведены на Рис. 2.

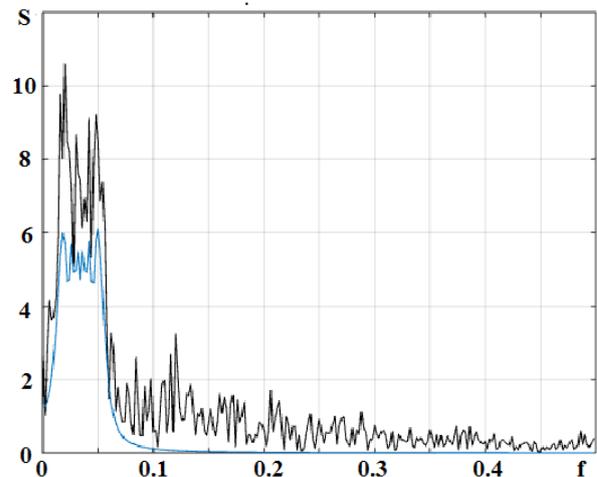


Рис. 2. Амплитудный спектр ЛЧМ сигнала (синяя линия) и процесса на выходе стохастического резонатора (черная линия)

В этом случае отношение сигнал/шум на выходе $SNR = 7.83$ по мощности и усиление по мощности равно $k = 2.26$.

В данном случае происходит усиление сигнала (Рис. 1, 2), следовательно, коэффициент усиления мощности больше 1.

При определенных условиях на выходе стохастического резонатора можно получить высокое отношение сигнал/шум. Рис. 3 иллюстрирует данный вывод. При различных значениях дисперсии шума получаем выигрыш в отношении сигнал/шум. Но в этом случае нет усиления сигнала.

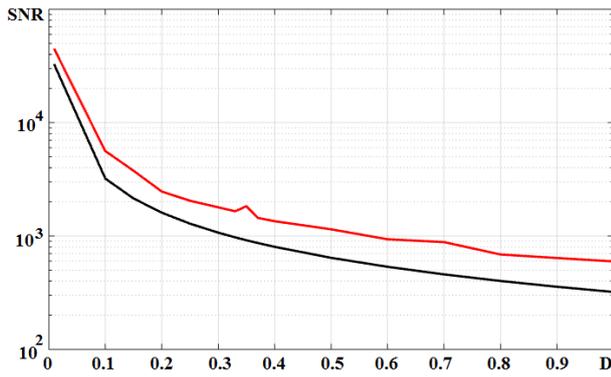


Рис. 3. Зависимость отношения сигнал/шум (SNR) на выходе стохастического резонатора (красная линия) по мощности и на выходе согласованного фильтра (черная линия) от дисперсии входного шума (параметры сигнала ЛЧМ в относительных единицах частота $f = 0.13$; $\beta = 4$; $\tau_i = 10$)

Кривая зависимости отношения сигнал/шум (SNR) на выходе стохастического резонатора от дисперсии входного шума имеет локальный максимум при дисперсии шума $D = 0.35$.

Кроме того, при любом значении дисперсии шума отношение сигнал/шум на выходе стохастического резонатора выше, чем на выходе согласованного фильтра.

2.2 Выделение радиоимпульсов с ФКМ из аддитивной смеси с шумами

Радиоимпульсы с ФКМ представляют собой импульсную последовательность, в которой начальная фаза их высокочастотного заполнения изменяется на определенную величину. Они обеспечивают повышение помехоустойчивости приема и скрытность при излучении таких сигналов [13].

Как правило, начальные фазы парциальных прямоугольных импульсов различаются на π , что приводит к максимально возможной степени отличия, обеспечивая максимальную помехоустойчивость [13].

Математическая модель ФКМ сигнала имеет вид

$$s(t) = \begin{cases} A \sin(2\pi f_0 t + \varphi_i), & (i-1)\Delta < t < i\Delta; \\ 0, & t < 0 \text{ и } t > i\Delta, \end{cases}$$

где $i = 1, \dots, N$; $\Delta = T/N$ – интервал времени, на которые разбивается радиоимпульс длительности T , число интервалов равно N ; φ_i – код фазы.

Введем обозначение $\cos \varphi_i = d_i$. Отсюда ФКМ сигнал можно записать в виде

$$s(t) = A d_i \sin(2\pi f_0 t + \varphi_i), \quad (i-1)\Delta < t < i\Delta,$$

где d_i принимает значения +1 или -1 [10, 13].

Как правило, в качестве модулирующих сигналов используются сигналы с кодом Баркера, так

как в их корреляционных функциях реализуется наименьший уровень боковых лепестков, что обеспечивает помехоустойчивость связи, радиолокации и т.д. Рассмотрим сигнал Баркера для количества позиций $N = 13$.

Применим к данному сигналу преобразование СР. На Рис. 4 приведен пример выделения ФКМ сигнала с помощью эффекта СР. Наглядно видно усиление сигнала и уменьшение шума на выходе.

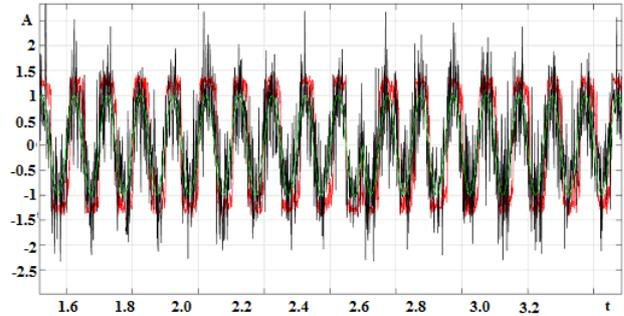


Рис. 4. Выделение ФКМ сигнала с помощью эффекта СР из аддитивной смеси сигнала и гауссова шума (входной сигнал - черный, аддитивная смесь сигнала и гауссова шума – зеленый; дисперсия входного шума $D = 0.4$, выходной сигнал - красный)

Рис. 5 иллюстрирует амплитудный спектр ФКМ сигнала и сигнала на выходе стохастического резонатора. В этом случае дисперсия выходного шума равна $D = 0.01$, а коэффициент усиления равен $k = 1.2$.

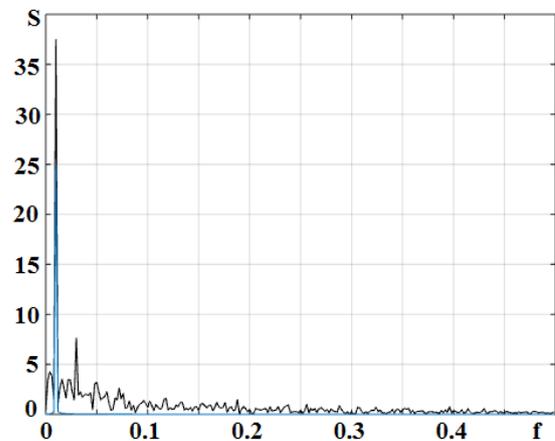


Рис. 5. Амплитудный спектр ФКМ сигнала (синяя линия) и процесса на выходе стохастического резонатора (черная линия) (временная зависимость сигналов приведена на Рис. 4)

В данном случае происходит усиление сигнала (Рис. 4, 5), следовательно, коэффициент усиления мощности больше 1.

При определенных условиях на выходе стохастического резонатора можно получить высокое отношение сигнал/шум. Рис. 6 иллюстрирует данный вывод. При различных значениях дисперсии шума получаем выигрыш в отношении сигнал/шум. Но в этом случае нет усиления сигнала.

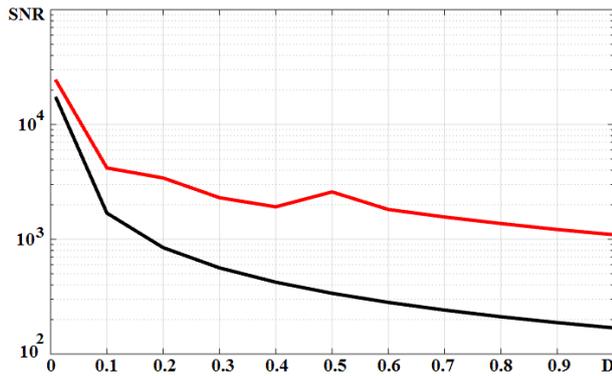


Рис. 6. Зависимость отношения сигнал/шум (SNR) на выходе стохастического резонатора (красная линия) и на выходе согласованного фильтра (черная линия) от дисперсии входного шума (параметры ФКМ сигнала $f = 1$; $N = 13$; $\tau_i = 65$)

Кривая зависимости отношения сигнал/шум (SNR) на выходе стохастического резонатора от дисперсии входного шума имеет локальный максимум при дисперсии шума $D = 0.5$.

Отношение сигнал/шум на выходе стохастического резонатора выше чем отношение сигнал/шум на выходе согласованного фильтра при любых значениях дисперсии входного шума.

Выводы

Показана возможность применения эффекта СР для выделения радиосигналов на примерах ЛЧМ и ФКМ сигналов.

Сравнение результатов обработки ЛЧМ сигнала с помощью эффекта СР и согласованного фильтра показали, что стохастический резонатор обеспечивает более высокое отношение сигнал/шум на выходе.

Расчет амплитудный спектр ЛЧМ и ФКМ входных сигналов и сигналов на выходе стохастического резонатора, показана возможность усиления сигнала наряду с эффектом уменьшения шумов.

Сравнение результатов обработки ФКМ сигнала с помощью эффекта СР и согласованного фильтра показали, что стохастический резонатор обеспечивает более высокое отношение сигнал/шум на выходе.

Перечень ссылок

1. Sklar B. Digital communications. Fundamentals and Applications. Second Edition / University of California, Los Angeles. 2001. 1104 p.
2. Ж. Макс. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: В 2-х томах / Пер. с франц. — М.: Мир, 1983. — Т. 1.
3. Anishchenko V. S. Local and global approaches to the problem of Poincaré recurrences. Applications in nonlinear dynamics / Anishchenko V.S.,

Boev Ya.I., Semenova N.I., Strelkova G.I. // Physics Reports. — 2015. — Volume 587. — P. 1-39. doi:10.1016/j.physrep.2015.05.004.

4. Barbini L. Weak signal detection based on two dimensional stochastic resonance / L. Barbini, M.O.T. Cole, A.J. Hillis, J.L. du Bois. // 2015 23rd European Signal Processing Conference (EUSIPCO). — 2015. — P. 2147–2151. DOI: 10.1109/EUSIPCO.2015.7362764.
5. Anishchenko V. S. Stochastic resonance: noise-enhanced order / Anishchenko V. S., Neiman A. B., Moss F., Schimansky-Geier L. // Physics-Uspekhi. — 1999. — 42(1)/ — P. 7-34. doi:10.1070/PU1999v042n01ABEH000444/meta.
6. Moses J. M., Ayyagari R. A Brief Survey of Stochastic Resonance and Its Application to Control // IFAC Proceedings Volumes. — 2014. — Vol. 47, Iss. 1. — P. 313-320. doi:10.3182/20140313-3-IN-3024.00223.
7. Chen H., Varshney P. K., Kay S. M., Michels J. H. Theory of the Stochastic Resonance Effect in Signal Detection: Part I—Fixed Detectors // IEEE Transactions on Signal Processing. — Vol. 55, No. 7. — P. 3172-3184. doi: 10.1109/TSP.2007.893757.
8. Батурин Н. Г., Гомозов В. И., Зюзин А. В. Измерение параметров линейно-модулированных сигналов и их нестабильности / Ярославль: Изд-во «Норд». — 2004. — 176 с.
9. Гомозов А. В., Гомозов В. И., Ермаков Г. В., Титов С. В. Фокусировка электромагнитного излучения и ее применение в радиоэлектронных средствах СВЧ / Под ред. В. И. Гомозова, Харьков:КП «Городская типография». — 2011. — 330 с.
10. Волощук Ю. І. Сигнали та процеси у радіотехніці: Підручник для студентів вищих навчальних закладів / Харків: "Компанія СМІТ". — 2003. — 444 с.
11. Култышев Н. А. Оценка помехозащищенности радиолокационных систем обзора морской поверхности для разных типов антенн радиолокационных систем // Радиопромышленность. — 2018. — № 2. — С. 40–47. <https://doi.org/10.21778/2413-9599-2018-2-40-47>.
12. А. Ф. Романенко, Г. А. Сергеев. Вопросы прикладного анализа случайных процессов / М: «Сов. Радио». — 1968. — 255 с.
13. Антипенский Р. Разработка моделей сложных сигналов / Компоненты и технологии, №7. — 2007. — С. 157-160.

References

- [1] Sklar B. (2001). *Digital communications. Fundamentals and Applications. Second Edition*. University of California, Los Angeles, 1104 p.
- [2] Maks Zh. (1983). *Metody i tekhnika obrabotki signalov pri fizicheskikh izmereniyah: V 2-h tomah* [Max J. Methods and techniques of signal processing in physical measurements]. M.: Mir, Vol. 1. [In Russian, translation from french].
- [3] Anishchenko V. S., Boev Ya. I., Semenova N. I., Strelkova G. I. (2015). Local and global approaches to the problem of Poincaré recurrences. Applications in nonlinear dynamics. *Physics Reports*, Vol. 587, pp. 1-39. doi:10.1016/j.physrep.2015.05.004.

- [4] Barbini L., Cole M. O. T., Hillis A. J., du Bois J. L. (2015). Weak signal detection based on two dimensional stochastic resonance. *2015 23rd European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, pp. 2147-2151, doi: 10.1109/EUSIPCO.2015.7362764.
- [5] Anishchenko V. S., Neiman A. B., Moss F., Schimansky-Geier L. (1999). Stochastic resonance: noise-enhanced order. *Physics-Uspekhi*, Vol. 42, No.1, pp. 7-34. DOI: 10.1070/PU1999v042n01ABEH000444.
- [6] Moses J. M., Ayyagari R. (2014). A Brief Survey of Stochastic Resonance and Its Application to Control. *IFAC Proceedings Volumes*, Vol. 47, Iss. 1, pp. 313-320. doi:10.3182/20140313-3-IN-3024.00223.
- [7] Chen H., Varshney P. K., Kay S. M., Michels J. H. (2007). Theory of the Stochastic Resonance Effect in Signal Detection: Part I—Fixed Detectors. *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 55, No. 7, pp. 3172-3184. DOI: 10.1109/TSP.2007.893757.
- [8] Baturin N. G., Gomofov V. I., Zyuzin A. V. (2004). *Izmerenie parametrov linejno-modulirovannykh signalov i ikh nestabil'noste*. Yaroslavl': Izd-vo «Nord». 176 s. [In Russian].
- [9] Gomofov A. V., Gomofov V. I., Ermakov G. V., Titov S. V. (2011). *Fokusirovka elektromagnitnogo izlucheniya i ee primenenie v radioelektronnykh sredstvakh SVCH*. Pod red. V. I. Gomofova. Har'kov: KP «Gorodskaya tipografiya», 330 s. [In Russian].
- [10] Voloshchuk Yu. I. (2003). *Syhnaly ta protsesy u radiotekhnitsi: Pidruchnyk dlia studentiv vyshchyykh navchalnykh zakladiv*. Kharkiv: "Kompaniia SMIT", 444 s. [In Ukrainian].
- [11] Kultyshev N. A. (2018). Estimation of jamming protection of radar location systems of sea surface review for different types of antennas radar. *Radio industry (Russia)*, Vol. 28, Iss. 2, pp. 40-47. doi: 10.21778/2413-9599-2018-2-40-47. [In Russ.]
- [12] Romanenko A. F., Sergeev G. A. (1968). *Voprosy prikladnogo analiza sluchajnykh processov*. M: «Sov. Radio», 255 s. [In Russian].
- [13] Antipenskiy R. (2007). Razrabotka modelej slozhnykh signalov. *Komponenty i tekhnologii*, No. 7, pp. 157-160. [In Russian].

Виділення радіосигналів на фоні шумів на основі ефекту стохастичного резонансу

Харченко О. І., Карташов В. М.

У ряді застосувань радіотехніки і радіолокації необхідно вирішувати задачу виявлення сигналів в складних заводських обставинах.

Основною і найбільш складною проблемою приймання сигналів є проблема завадостійкості, тобто завдання розробки найкращих способів приймання радіосигналів за наявності завод. Це пояснюється підвищенням вимог до якості відтворення сигналів.

Наведено результати аналізу виділення радіосигналів за допомогою ефекту стохастичного резонансу. В якості об'єкту дослідження розглянуто лінійно-частотно-модульоване та фазо-кодо-маніпульоване коливання, які є сигнальною базою радіолокаційних і телекомунікаційних систем.

Джерела шуму можуть не просто заважати роботі нелінійних пристроїв, але і, навпаки, істотно збільшувати чутливість систем до слабких зовнішніх впливів. В цьому полягає явище стохастичного резонансу, де наявність шуму надає можливість підсилити сигнали з амплітудою, яка є істотно меншою інтенсивності шуму. Саме тому, стохастичний резонанс є міждисциплінарним поняттям та виявляється в різних галузях науки від соціології до медицини і біології.

В роботі розраховано амплітудний спектр радіосигналу і процесу на виході стохастичного резонатора, показана можливість підсилення сигналу і зменшення шуму на виході стохастичного резонатора.

Визначена залежність відношення сигнал/шум на виході стохастичного резонатора для моделі сигналу у вигляді адитивної суми радіосигналу і білого гаусівського шуму при різних значеннях дисперсії вхідного шуму. Показано, що при будь-якому значенні дисперсії вхідного шуму відношення сигнал/шум на виході стохастичного резонатора вище, ніж на виході узгодженого фільтру.

Показано, що ефект стохастичного резонансу забезпечує виділення радіосигналу на фоні білого гаусівського шуму.

Ключові слова: стохастичний резонанс; стохастичний резонатор; відношення сигнал/шум; узгоджений фільтр; дисперсія; білий гаусівський шум

Standing out of Radiosignals on the Background of Noises Based on the Effect of Stochastic Resonance

Kharchenko O. I., Kartashov V. M.

The main and most difficult problem of signals receiving is the problem of noise immunity to find the best methods of receiving radio signals in the presence of interference.

The analysis of radio signals standing out with the help of stochastic resonance effect are given. The linear frequency modulated and phase-code-manipulated signals are considered as an object of research. Linear frequency modulated phase-code-manipulated signals are widely used in radar and telecommunication systems.

The phenomenon of stochastic resonance is a type of cooperative effect of noise and weak signal under a certain non-linear circumstance, in which the weak signal can be amplified and detected by a suitable amount of noise. The stochastic resonance is observed, quantified, and described in a plethora of physical and biological systems, including neurons. Stochastic resonance is an interdisciplinary concept and is found in various fields of science from sociology to medicine and physics.

The amplitude spectrum of the radio signal and the process at the output of the stochastic resonator are calculated. The possibility of the signal amplifying and noise reducing at the stochastic resonator output is shown.

Dependence of signal-to-noise ratio at stochastic resonance output is determined for signal model in form of additive mixture of radio signal and white Gaussian noise at different values of variance of input noise. It is shown that at any noise dispersion value the signal-to-noise ratio at the stochastic resonator output is higher than at the output of

the matched filter. Matched filter is derived to maximize signal to noise ratio.

In addition, the dependence of the noise factor of the stochastic resonator on the noise dispersion at the input is determined. The noise factor is greater than one and increases with the input noise level.

The stochastic resonance effect is shown to provides the standing out of the radio signal against the background white Gaussian noise.

Key words: stochastic resonance; stochastic resonator; signal-to-noise ratio; matched filter; dispersion; white Gaussian noise; radiosignal; linear frequency modulated signal; phase-code-manipulated signal; noise factor