

ГАРМОНИЧЕСКИЕ ПОМЕХИ В ХАОТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ СВЯЗИ

Б.И. Шахтарин¹, С.В. Митин²¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

e-mail: shakhtarin@mail.ru

²Академия Федеральной службы охраны РФ, г. Орел, Российская Федерация

e-mail: tician@yandex.ru

Системы связи, использующие хаотические модули с нелинейным подмешиванием информации, в принципе показали свою работоспособность, хотя и с некоторыми ограничениями. Одной из проблем, стоящих на пути реализации таких систем, является возможность наличия помех в канале связи. В этом случае приходится иметь дело с задачей электромагнитной совместимости, решение которой требует разработки методики сравнительной оценки качества хаотических систем связи, включающей в себя определение допустимых уровней помех и возможности снижения их влияния. Рассмотрено влияние монохроматических помеховых сигналов в канале системы связи, основанной на использовании динамического хаоса с нелинейным подмешиванием информационного сигнала, на структуру сигнала, выделяемого в приемнике. Выявлены ключевые особенности воздействия помех на хаотическую систему, проанализированы результаты численного моделирования спектральных характеристик принимаемого сигнала.

Ключевые слова: динамический хаос; хаотическая система связи; синхронизация.

HARMONIC INTERFERENCE IN CHAOTIC COMMUNICATION SYSTEM

B.I. Shakhtarin¹, S.V. Mitin²¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

e-mail: shakhtarin@mail.ru

²Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation, Orel, Russian Federation

e-mail: tician@yandex.ru

The communication systems using chaotic modules with nonlinear dithering have demonstrated their workability in principle, though with certain restrictions. One of the problems hindering the implementation of these systems is the probable occurrence of interference in the communication channel. In this case we have to deal with the electromagnetic compatibility problem, for solving which the development of a technique of comparative quality evaluation of chaotic communication systems is required, including the determination of admissible interference levels and possibility of reducing their effect. The influence of monochromatic interference signals in the channel of the dynamical chaos-based communication system with nonlinear dithering upon the structure of a signal extracted in the receiver is considered. The key features of interference effect on the chaotic system are revealed. The results of numerical simulation of spectral characteristics of the received signal are analyzed.

Keywords: dynamical chaos, chaotic communication system, synchronization.

В последнее время интенсивно изучаются системы связи, использующие динамический хаос [1–7], так как исследователей привлекают

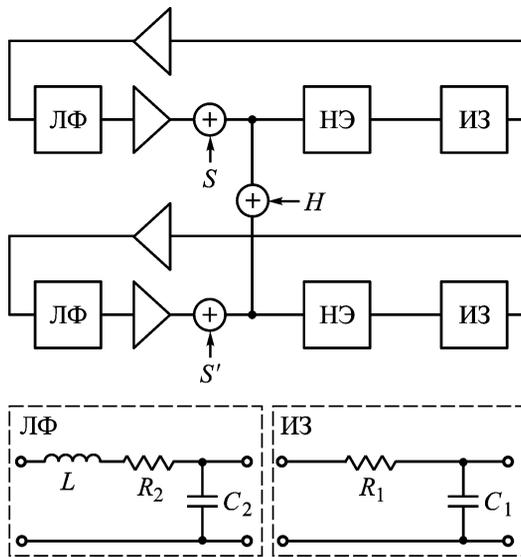


Рис. 1. Функциональная схема системы связи с нелинейным подмешиванием в виде интегрирующей цепочки (S – информационный сигнал, вводимый в передатчик; S' – сигнал на выходе приемника; H – помеха)

потенциальные возможности таких систем [8]. Передача информации с помощью хаотической пары передатчик-приемник могла бы стать основой нового типа засекреченной связи.

Система связи с нелинейным подмешиванием. В работе [1] предложена схема связи с нелинейным подмешиванием, которая формально относится к классу инверсных хаотических систем связи [3]. Функциональная схема системы связи с нелинейным подмешиванием показана на рис. 1. Базовым элементом хаотического модуля этой системы является кольцевой генератор хаоса [9]. Верхняя часть схемы представляет собой передатчик, нижняя – приемник. Для моделирования ситуаций, связанных с наличием помехи в канале связи, предусмотрена возможность добавления в канал помехи $H(t)$. Передатчик состоит из нелинейного элемента (НЭ), инерционного звена (ИЗ), линейного фильтра (ЛФ), сумматора и двух операционных усилителей, служащих в качестве буферных элементов. Приемник состоит из тех же элементов, но вместо сумматора используется вычитатель, реализующий операцию, обратную суммированию. Нелинейный элемент преобразует сигнал в соответствии с заданной зависимостью. Линейный фильтр представляет собой ФНЧ второго порядка и предназначен для выделения требуемой полосы частот. На выходе передатчика образуется смесь информационного и хаотического сигналов. Далее эта смесь поступает в канал связи. В приемнике на вычитателе формируется сигнал $S'(t)$.

Моделирование системы связи при наличии помехи. Система уравнений, описывающих передатчик, имеет вид

$$\begin{aligned}\dot{X}_1 &= \frac{1}{T}f(Y_1 + S) - \frac{1}{T}X_1; \\ \dot{Y}_1 &= \omega^2 Z_1 - qY_1; \\ \dot{Z}_1 &= X_1 - Y_1.\end{aligned}\tag{1}$$

Систему уравнений, описывающих приемник, можно записать так:

$$\begin{aligned}\dot{X}_2 &= \frac{1}{T}f(U) - \frac{1}{T}X_2; \\ \dot{Y}_2 &= \omega^2 Z_2 - qY_2; \\ \dot{Z}_2 &= X_2 - Y_2; \\ S' &= U - Y_2.\end{aligned}\tag{2}$$

Параметры в системах уравнений (1) и (2) определяются следующим образом: $T = R_1 C_1$, $\omega^2 = 1/LC_2$, $q = R_2/L$; здесь R_1 , R_2 , C_1 , C_2 , L – параметры приемника или передатчика (см. рис. 1), так как обе эти системы принимаем идентичными; $X_{1,2}(t)$ – сигналы на входе ЛФ; $Y_{1,2}(t)$ – сигналы на выходе ЛФ; $U(t)$ – сигнал, поступающий на вход приемника. Характеристика НЭ

$$f(V) = MV \exp(-V^2),$$

где M – постоянный коэффициент, V – сигнал на входе НЭ, $f(V)$ – сигнал на выходе НЭ. Коэффициент M играет роль нормирующего множителя в нелинейном преобразовании сигнала. При несовпадении этих коэффициентов НЭ передатчика и приемника ухудшается качество выделения информационного сигнала, увеличивается число посторонних спектральных компонент.

Рассмотрим случай отсутствия помехи в канале. На вход приемника поступает сигнал $U(t) = S(t) + Y_1(t)$. После прохождения НЭ $U(t)$ преобразуется в $N_2(t)$. Далее, пройдя ИЗ и ЛФ, $N_2(t)$ переходит в $Y_2(t)$. Введем обозначение $F[S(t)] = FS(j\omega)$ – спектр сигнала $S(t)$. Тогда для линейных блоков ИЗ и ЛФ можно записать

$$FY_2(j\omega) = K(j\omega)FN_2(j\omega),\tag{3}$$

где $K(j\omega) = K_{ИЗ}(j\omega)K_{ЛФ}(j\omega)$ – общий коэффициент передачи ИЗ и ЛФ. На вычитающем блоке происходит следующее:

$$FU(j\omega) - FY_2(j\omega) = FS'(j\omega).\tag{4}$$

Если параметры передатчика и приемника совпадают и в канале нет помех, то

$$FS'(j\omega) \equiv FS(j\omega), \text{ т.е. } S'(t) \equiv S(t).$$

Теперь рассмотрим случай наличия помехи в канале связи. На вход приемника поступает смесь сигналов $U_H(t) = H(t) + S(t) + Y_1(t)$. Спектр сигнала $N_{2H}(t)$ на выходе НЭ будет $FN_{2H}(j\omega)$. В случае отсутствия помехи в канале на выходе НЭ будет сигнал $N_2(t)$ со спектром $FN_2(j\omega)$. Формально можно определить, что

$$\Delta FN_{2H}(j\omega) = FN_{2H}(j\omega) - FN_2(j\omega), \quad (5)$$

тогда

$$FN_{2H}(j\omega) = FN_2(j\omega) + \Delta FN_{2H}(j\omega).$$

После прохождения сигнала $N_{2H}(t)$ через линейные блоки ИЗ и ЛФ его можно представить в спектральной форме:

$$FY_{2H}(j\omega) = K(j\omega) FN_{2H}(j\omega). \quad (6)$$

На вычитающем блоке выделяется сигнал со спектром

$$FS'(j\omega) = FU_H(j\omega) - FY_{2H}(j\omega).$$

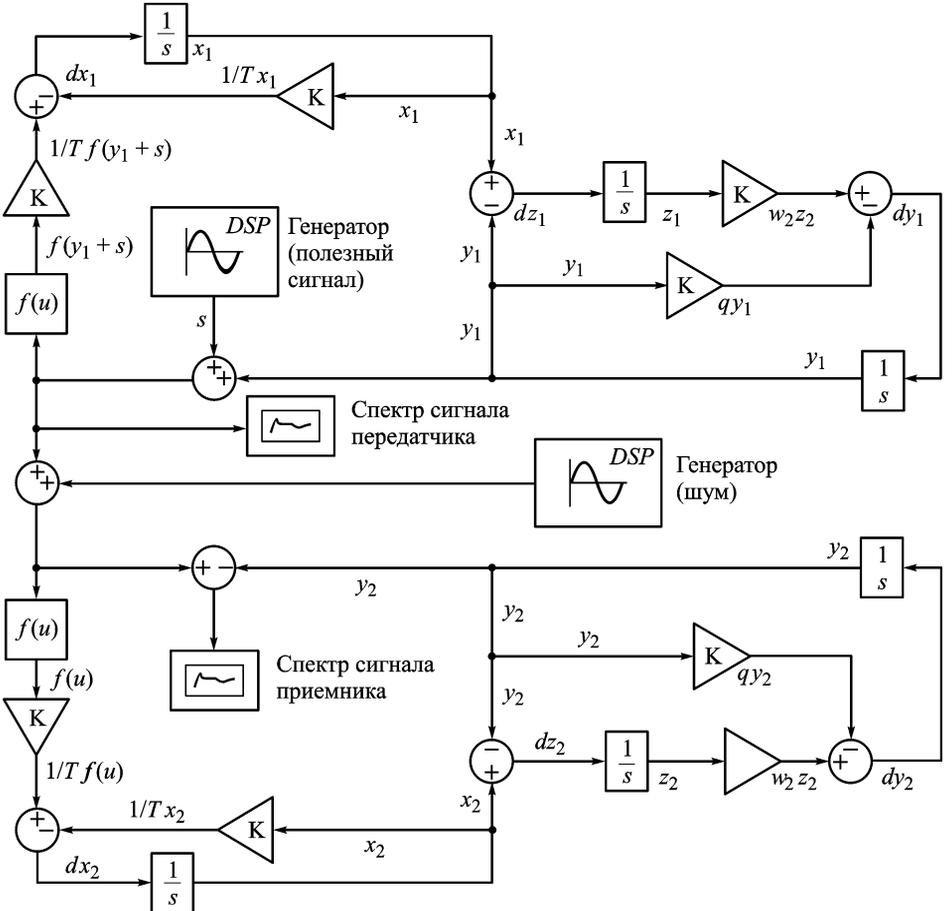


Рис. 2. Схема модели системы связи с нелинейным подмешиванием в Simulink

Учитывая (3)–(6), получаем

$$FS'(j\omega) = FS(j\omega) + FH(j\omega) - K(j\omega) \Delta FN_{2H}(j\omega). \quad (7)$$

Таким образом, из (7) следует, что спектр сигнала на выходе приемника состоит из трех компонент: полезной $FS(j\omega)$, компоненты $FH(j\omega)$ и шумовой $K(j\omega) \Delta FN_{2H}(j\omega)$. Вид шумовой компоненты определяется формой спектра сигнала, свойствами фильтров и характеристикой НЭ.

Моделирование проводилось в системе Simulink при следующих значениях параметров: $M = 40$, $R_1 = 50$ Ом, $C_1 = 1$ мкФ, $R_2 = 100$ Ом, $C_2 = 100$ нФ, $L = 20$ мГн. В качестве информационного и помехового сигналов были использованы гармонические сигналы $S(t) = A_S \sin(2\pi f_S t)$ и $H(t) = A_H \sin(2\pi f_H t)$. Амплитуда $A_S = 28$ мВ и частота $f_S = 5$ кГц информационного сигнала на протяжении эксперимента оставались неизменными, в то время как параметры помехи менялись. Модель, составленная из блоков Simulink, приведена на рис. 2.

Спектры сигналов на выходе передатчика и приемника при отсутствии помехи $H(t)$ в канале связи изображены на рис. 3. В случае синхронного хаотического отклика на выходе приемника наблюдается сигнал $S'(t)$, идентичный информационному сигналу $S(t)$. Если в канал добавить помеху $H(t)$, то на выходе приемника появляется

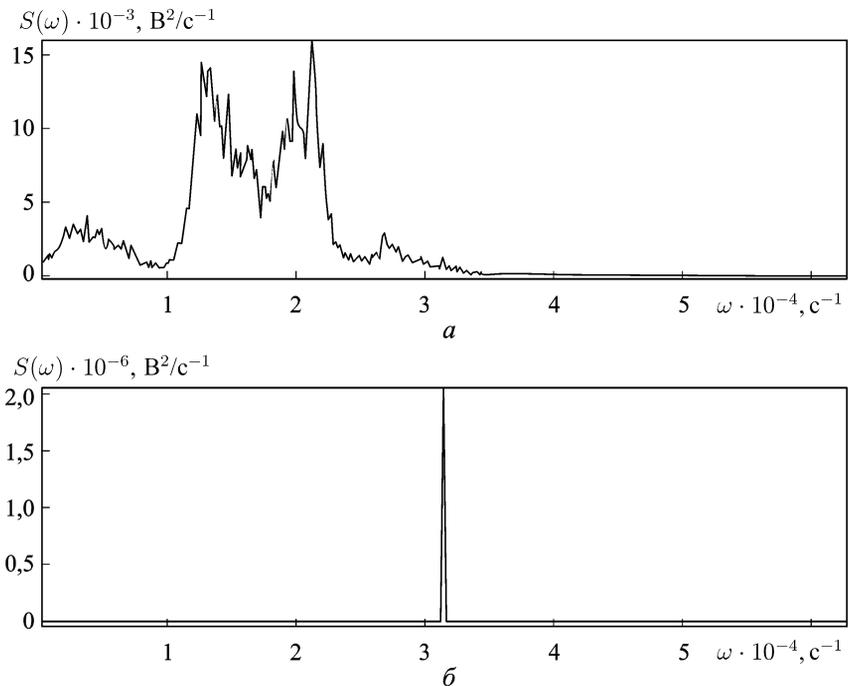


Рис. 3. Энергетический спектр сигнала на выходе передатчика (а) и выходе приемника (б) в отсутствие помехи

дополнительный хаотический спектр, сформированный из смеси хаотического сигнала и помехи, поступающих на вход приемника. На рис. 4, *а*, *б* представлены спектры сигналов $S(t)$ при различных ам-

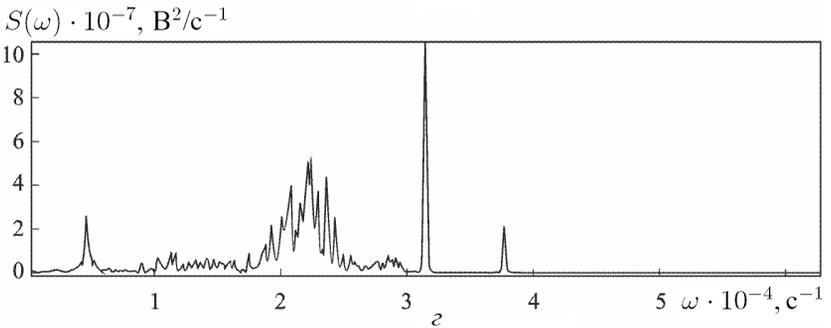
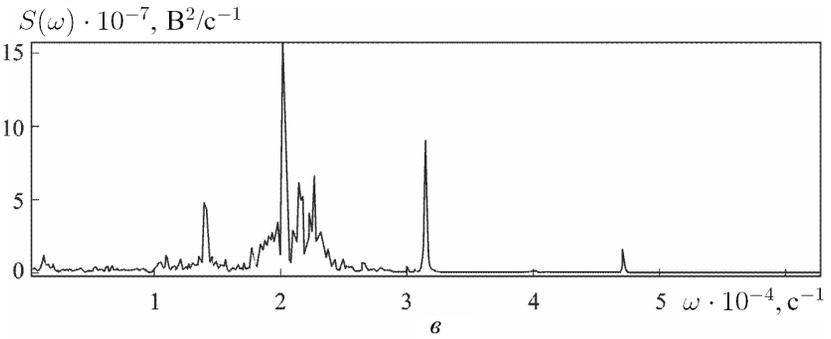
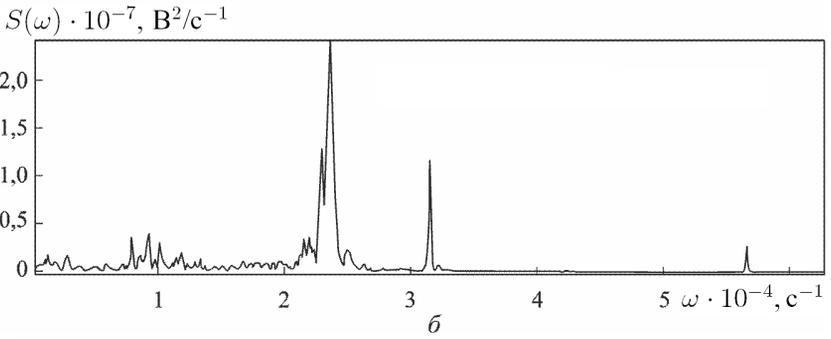
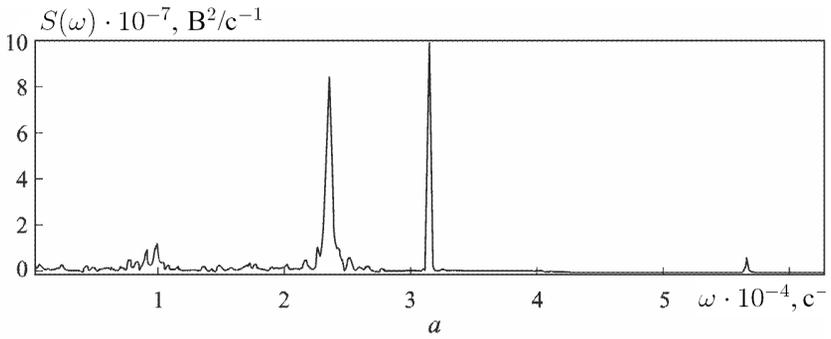


Рис. 4. Энергетический спектр сигнала на выходе приемника для различных амплитуд помехового сигнала (*а* – 7 мВ, *б* – 14 мВ) и для различных частот помехового сигнала (*в* – 7,5 кГц, *г* – 6 кГц)

плитудах помехи (7 и 14 мВ) с частотой $f_H = 9$ кГц. При увеличении амплитуды помехи ОСШ в единичной полосе сигнала на выходе приемника ухудшается. Так, при помехе 7 мВ (рис. 4, а) ОСШ по мощности на выходе составляет 34 дБ, а при помехе 14 мВ (рис. 4, б) ОСШ = 23 дБ. Численный эксперимент показал, что при выбранных параметрах системы выделение информационного сигнала возможно при ОСШ более 2 дБ (что соответствует амплитуде помехи 40 мВ).

Изменение частоты помехи приводит к изменению спектра и ОСШ. На рис. 4, в, г приведены спектры сигналов $S(t)$ при амплитуде помехи 10 мВ и частотах: 7,5 кГц (в) и 6 кГц (г). Видно, что и в этих случаях возможно выделение информационного сигнала.

Неидентичность приемника и передатчика, связанная с разбросом параметров элементов, может привести к различию в коэффициенте M НЭ. При небольших отклонениях и наличии синхронного хаотического отклика на выходе приемника наблюдается сигнал, идентичный информационному. Спектры сигнала на выходе приемника для $M = 40$ и 38 приведены на рис. 5 (в передатчике $M = 40$).

Заключение. Моделирование подтвердило, что в присутствии помехи спектр выходного сигнала состоит из трех компонент: информационного, помехового и добавочного шумового спектров, что следует из формулы (7). Эта структура выходного сигнала сохраняется при

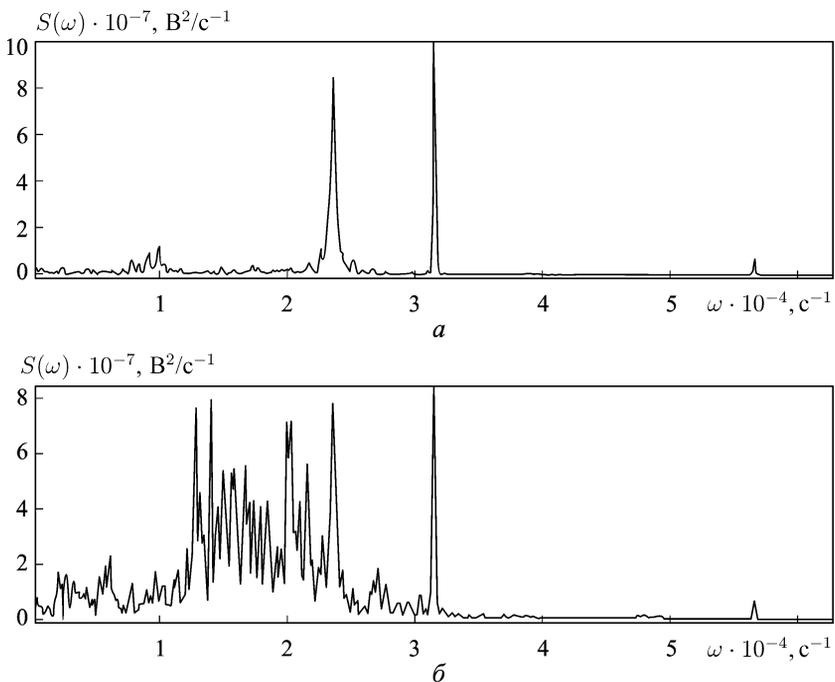


Рис. 5. Энергетический спектр сигнала на выходе приемника для различных коэффициентов M :

а – $M = 40$, б – $M = 39$

любых параметрах помехи в канале. При этом возможно выделение информационной составляющей сигнала на выходе приемной части системы. Если отсутствует помеха и соблюдается условие синхронного хаотического отклика, то в спектре сигнала $S(t)$ наблюдается только информационная составляющая.

При увеличении амплитуды помехового сигнала $H(t)$ ухудшается ОСШ в единичной полосе информационного сигнала $S(t)$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волковский А.Р., Рульков Н.В. Синхронный хаотический отклик нелинейной системы передачи информации с хаотической несущей // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. № 3. С. 71–75.
2. Дмитриев А.С., Кузьмин Л.В., Панас А.И., Старков С.О. Эксперименты по передаче информации с использованием хаоса через радиоканал // Радиотехника и электроника. 1998. Т. 43. № 9. С. 1115–1128.
3. Дмитриев А.С., Кузьмин Л.В., Панас А.И. Схема связи с суммированием по модулю хаотического и информационного сигналов // Радиотехника и электроника. 1999. Т. 44. № 8. С. 988–996.
4. Шалфеев В.Д., Осипов Г.В., Козлов А.К., Волковский А.Р. Хаотические колебания – генерация, синхронизация, управление // Зарубежная радиоэлектроника. 1997. № 10. С. 27–49.
5. Хаслер М. Передача информации с использованием хаотических сигналов // Зарубежная радиоэлектроника. 1998. № 11. С. 33–43.
6. Дмитриев А.С., Кяргинский Б.Е., Панас А.И., Старков С.О. Прямохаотические схемы передачи информации в сверхвысококачастотном диапазоне // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46. № 2. С. 224–233.
7. Дмитриев А.С., Кяргинский Б.Е., Панас А.И., Пузиков Д.Ю., Старков С.О. Эксперименты по сверхширокополосной прямохаотической передаче информации в сверхвысококачастотном диапазоне // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47. № 10. С. 1219–1228.
8. Нелинейная динамика хаотических и стохастических систем / В.С. Анищенко, Т.Е. Вадивасова, В.В. Астахов. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1999.
9. Генераторы хаотических колебаний / Б.И. Шахтарин и др. М.: Гелиос-АРВ, 2007.

REFERENCES

- [1] Volkovskiy A.R., Rul'kov N.V. Synchronous chaotic response of a nonlinear data transmission system with a chaotic carrier. *Pis'ma v Zh. Tekh. Fiz.* [Tech. Phys. Lett.], 1993, vol. 19, no. 3, pp. 71–75 (in Russ.).
- [2] Dmitriev A.S., Kuz'min L.V., Panas A.I., Starkov S.O. Experiments on chaotic carrier data transmission via a radio channel. *Radiotekh. Elektron.* [Radio Eng. Electron.], 1998, vol. 43, no. 9, pp. 1115–1128 (in Russ.).
- [3] Dmitriev A.S., Kuz'min L.V., Panas A.I. Communication system with the chaotic and information signals added modulo a constant. *J. Commun. Technol. Electron.*, 1999, vol. 44, no. 8, pp. 918–925.
- [4] Shalf'eev V.D., Osipov G.V., Kozlov A.K., Volkovskiy A.R. Generation, synchronization, and control of chaotic vibrations. *Zarub. Radioelektron.* [Foreign Radioelectron.], 1997, no. 10, pp. 27–49 (in Russ.).
- [5] Khasler M. Information transmission using chaotic signals. *Zarub. Radioelektron.* [Foreign Radioelectron.], 1998, no. 11, pp. 33–43 (in Russ.).

- [6] Dmitriev A.S., Kyarginskiy B.E., Panas A.I., Starkov S.O. Plane scheme of chaotic carrier data communications at microwave frequencies. *J. Commun. Technol. Electron.*, 2001, vol. 46, no. 2, pp. 207–214.
- [7] Dmitriev A.S., Kyarginskiy B.E., Panas A.I., Puzikov D.Yu., Starkov S.O. Experiments on ultra wideband direct chaotic data transmission at microwave frequencies. *Radiotekh. Elektron.* [J. Commun. Technol. Electron.], 2002, vol. 47, no. 10, pp. 1219–1228 (in Russ).
- [8] Anishchenko V.S., Vadivasova T.E., Astakhov V.V. Nelineynaya dinamika khaoticheskikh i stokhasticheskikh system [Nonlinear dynamics of chaotic and stochastic systems]. Saratov, Saratov Univ. Publ., 1999.
- [9] Shakhhtarin B.I., Kobylkina P.I., Sidorkina Yu.A., Kondrat'ev A.V., Mitin S.V. Generatory khaoticheskikh kolebaniy [Generators of chaotic oscillations]. Moscow, Gelios-ARV Publ., 2007.

Статья поступила в редакцию 18.04.2012

Борис Ильич Шахтарин — д-р техн. наук, профессор кафедры “Автономные информационные и управляющие системы” МГТУ им. Н.Э.Баумана. Автор более 250 научных работ в области радиотехники, статистического анализа, фазовой синхронизации, формирования и обнаружения сигналов.

МГТУ им. Н.Э.Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

B.I. Shakhhtarin — Dr. Sci. (Eng.), professor of “Autonomous Information and Control Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 250 publications in the field of radio engineering, statistical analysis, phase synchronization, formation and detection of signals.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Сергей Владимирович Митин — доцент Академии Федеральной службы охраны РФ, Россия. Специалист в области хаотической динамики, систем связи на основе хаотических систем.

Академия ФСО РФ, Российская Федерация, 302034, г.Орел, ул.Приборостроительная, д. 35.

S.V. Mitin — assoc. professor of Academy of Federal Security Guard Service of RF. Specializes in the field of chaotic dynamics, communication systems based on chaotic systems. Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation, ul. Priborostroitel'naya, 35, Orel, 102034 Russian Federation.