

01.3;11

## **Разделение хаотических сигналов при некогерентном приеме с использованием опорного генератора хаоса**

© Ю.А. Дмитриев

Московский физико-технический институт  
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН  
E-mail: Yuri.Dmitriev@bk.ru

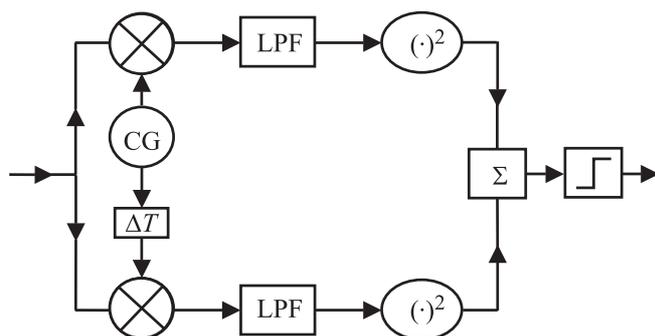
Поступило в Редакцию 15 ноября 2012 г.

Предлагается схема некогерентного приема хаотических радиоимпульсов, использующая опорный генератор хаоса. Проводится исследование схемы и устанавливается ее работоспособность и эффективность. Показывается, что схема обладает селективными свойствами и может быть использована для разделения импульсов, генерируемых несколькими разными источниками.

Прямохаотическая схема связи (ПХСС) с энергетическим приемом к настоящему времени используется в ряде устройств передачи информации [1], вошла в стандарт сверхширокополосной беспроводной персональной связи (Wireless personal area network) IEEE 802.15.4a. [2] и в стандарт беспроводных натальных систем связи (Wireless body area networks) IEEE 802.15.6. [3].

В этой схеме передача информации осуществляется с помощью хаотических радиоимпульсов, расположенных на определенных позициях временной оси. В простейшем случае для передачи единицы используется импульс, для передачи нуля — отсутствие импульса. Так, например, для передачи трехбитовой последовательности 1, 0, 1 используются наличие импульса на первой позиции, отсутствие на второй позиции и наличие импульса на третьей позиции.

Скорость передачи информации с помощью ПХСС варьируется от единиц kbps до сотен Mbps. В качестве приемника в них используются приемники на основе детектора огибающей. При этом в силу малого уровня мощности входного сигнала его перед детектированием необходимо многократно усилить.



**Рис. 1.** Структура приемника огибающей с опорным генератором хаоса, где CG — опорный генератор хаоса,  $\Delta T$  — задержка,  $\otimes$  — перемножитель, LPF — фильтр нижних частот,  $(\cdot)^2$  — квадратичный детектор,  $\Sigma$  — сумматор,  $\lceil$  — пороговое устройство.

В данной работе вводится альтернативная схема энергетического приема хаотических радиоимпульсов, требующая существенно меньшего предварительного усиления сигнала и обладающая селективными свойствами.

Стандартная структура приемника огибающей хаотических радиоимпульсов включает в себя: усилитель, квадратичный (или логарифмический) детектор, фильтр нижних частот и пороговое устройство.

Предлагаемая альтернативная схема некогерентного приема хаотических радиоимпульсов показана на рис. 1.

В этой схеме входной сигнал разделяется на 2 части, поступающие соответственно на первый и второй перемножители. В первом перемножителе происходит перемножение принимаемого сигнала с сигналом опорного генератора хаоса. А во втором перемножителе поступающий со входа сигнал перемножается с сигналом от опорного генератора хаоса, задержанным на величину, равную четверти периода его автокорреляционной функции. Сигнал с такой задержкой в среднем ортогонален сигналу без задержки.

Получаемые после перемножения в каждой из ветвей сигналы пропускаются через фильтры нижних частот, согласованные по частоте среза с длинами хаотических радиоимпульсов, возводятся в квадрат и суммируются, после чего суммарный сигнал поступает на вход порого-

вого устройства. На основе отклика порогового устройства принимается решение о наличии импульса или его отсутствии.

Ожидается, что схема будет эффективно работать в случае, когда автокорреляционная функция процесса в опорном генераторе хаоса спадает достаточно медленно, а генератор хаоса в передатчике и опорный генератор хаоса в приемнике лишь незначительно различаются по своим характеристикам. Для того чтобы определить степень и эффективность работоспособности предлагаемого приемника, необходимо провести математическое моделирование работы схемы с учетом несовпадения значений параметров и начальных условий в передающей и приемной системах.

Моделирование производилось с использованием в качестве модели источника хаоса в передатчике и приемнике кольцевой автоколебательной системы с 4,5 степенями свободы.

Описывающие динамику системы уравнения имеют вид

$$\begin{aligned} T\dot{x}_1 + x_1 &= mF(x_5), \\ \ddot{x}_2 + \alpha_2\dot{x}_2 + \omega_2^2x_2 &= \omega_2^2x_1, \\ \ddot{x}_3 + \alpha_3\dot{x}_3 + \omega_3^2x_3 &= \alpha_3\dot{x}_2, \\ \ddot{x}_4 + \alpha_4\dot{x}_4 + \omega_4^2x_4 &= \alpha_4\dot{x}_3, \\ \ddot{x}_5 + \alpha_5\dot{x}_5 + \omega_5^2x_5 &= \alpha_5\dot{x}_4, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\omega_2, \dots, \omega_5$  — резонансные частоты фильтров второго порядка;  $\alpha_2, \dots, \alpha_5$  — коэффициенты диссипации;  $T$  — постоянная времени фильтра нижних частот первого порядка;  $m$  — коэффициент усиления;  $F(x)$  — характеристика нелинейного элемента, описываемая функцией

$$F(x) = |x + e_1| - |x - e_1| + \frac{1}{2}(|x - e_2| - |x + e_2|), \quad (2)$$

где  $e_1$  и  $e_2$  — константы, однозначно определяющие характеристику  $F(x)$ .

За счет выбора параметров  $\omega_2, \dots, \omega_5, \alpha_2, \dots, \alpha_5$  и  $T$  в системе могут быть реализованы хаотические колебания с различной относительной шириной полосы спектра мощности  $\beta$ , в том числе широкополосной

и сверхширокополосной [4,5]:

$$\beta = 2 \frac{f_2 - f_1}{f_2 + f_1} = \frac{\Delta f}{f_{cp}}, \quad (3)$$

где  $\Delta f = f_2 - f_1$ ,  $f_{cp} = (f_1 + f_2)/2$ ,  $f_1, f_2$  — частоты, ограничивающие полосу хаотического сигнала слева и справа по уровню 10 dB.

Рассмотрим возможность использования введенной схемы некогерентного приема для широкополосных и сверхширокополосных хаотических сигналов.

Моделирование производилось при значениях параметров автоколебательной системы (1)

для широкополосного случая:

$$\alpha_2 = 0.192; \quad \alpha_3, \dots, \alpha_5 = 0.14; \quad T = 4.8; \quad \omega_2, \dots, \omega_5 = 0.7, \quad (4)$$

и для сверхширокополосного случая:

$$\alpha_2 = 0.192; \quad \alpha_3, \dots, \alpha_5 = 0.7; \quad T = 4.8; \quad \omega_2, \dots, \omega_5 = 0.7. \quad (5)$$

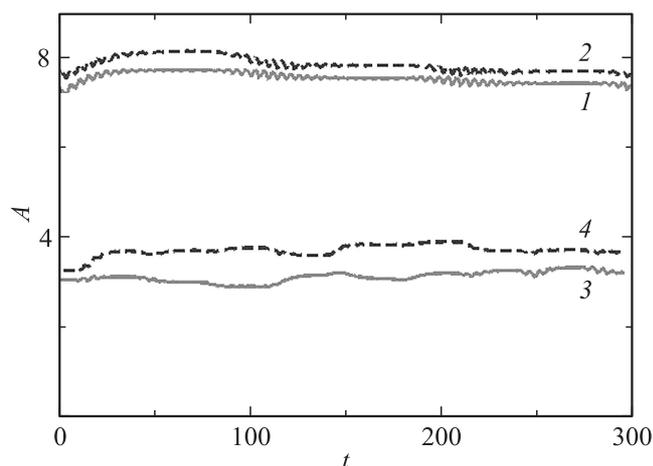
Значение параметра  $m$  выбиралось так, чтобы получить хаотический режим генерации. Относительная ширина полосы спектра мощности в широкополосном случае составляла  $\beta = 0.13$ .

Анализ динамики системы показал, что нерегулярные режимы возникают в диапазоне значений  $m > 40$ . При моделировании приема в опорном генераторе хаоса использовалось значение  $m = 70$ . Спектр колебаний при этом значении  $m$  довольно изрезанный, что характерно и при других значениях  $m$  в этом случае.

Значение параметра  $m$  при формировании хаотических импульсов в передатчике варьировалось с целью моделирования различий в параметрах автоколебательной системы приемника и автоколебательной системы передатчика.

Прямые расчеты показали, что сигналы на выходе первого и второго фильтров оказываются в силу выбранной задержки практически ортогональными и содержат в себе почти всю полезную энергию сигнала, поступающую на вход приемника, в том числе при некоторых различиях параметров и начальных условий автоколебательных систем в передатчике и приемнике.

В качестве примера на рис. 2 (кривая 1 и 2) приведено сравнение суммы квадратов сигналов, получаемых после фильтров для случая с



**Рис. 2.** Уровень сигнала на выходе приемника при приеме импульса в приемнике с опорным генератором и в приемнике с квадратичным детектором при разных значениях параметров и начальных условий в передатчике и приемнике: кривые 1 и 2 — широкополосный случай, кривые 3 и 4 — сверхширокополосный случай.

несовпадающими значениями параметров ( $m = 70$  и  $m = 80$ ) и несовпадающими начальными условиями по первой переменной ( $x_1 = 3$  и  $x_2 = 5$ ) в передатчике и приемнике (кривая 1), и уровень сигнала на выходе приемника при приеме импульса, получаемый в случае использования приемника огибающей с квадратичным детектором (кривая 2).

Таким образом, в случае широкополосных хаотических сигналов рассматриваемая схема приема работает вполне эффективно. Рассмотрим эффективность предложенной схемы для хаотических сигналов со сверхширокой полосой частот. Для определенности расчеты проводились для относительной полосы частот  $\beta = 0.35$ . При моделировании коэффициент усиления в опорном генераторе был выбран  $m = 30$ .

Анализ ситуации в случае различных начальных условий и отличающихся значений параметров показывает, что эффективная работа приемника в случае сверхширокополосного сигнала также возможна, однако при этом условии на возможный разброс параметров и начальных условий становится значительно жестче. На рис. 2 (кривые 3 и 4)

приведены сигнал на выходе приемника при приеме импульса перед пороговым устройством и его сравнение с сигналом на выходе квадратичного детектора огибающей. Значение коэффициента усиления в автоколебательной системе передатчика и приемника равно 30.5 и 30 соответственно, а начальные условия по первой координате 4 и 5. При более значительных разбросах начальных условий и значений параметров эффективность приемника резко снижается. Таким образом, если в случае широкополосного сигнала разброс коэффициента усиления может достигать 10–15%, то в случае сверхширокополосного сигнала он не должен превышать 1.5–2%.

Дальнейшее расширение полосы хаотического сигнала  $\beta > 0.4$  резко снижает эффективность рассматриваемой схемы приемника и делает ее непригодной для практического использования вследствие жестких требований к разбросу начальных условий и значений параметров.

Принципиальным отличием рассматриваемого приемника от приемника огибающей с квадратичным или логарифмическим детектором является свойство селективности, т. е. прием сигнала возможен только в тех случаях, когда параметры автоколебательной системы передатчика и приемника близки друг к другу. Это наталкивает на мысль о возможности принципиально нового способа разделения хаотических сигналов при некогерентном приеме.

Идея заключается в следующем: на передающей стороне формируется несколько хаотических сигналов (в принципе, некоторые из них могут и не быть хаотическими, это не сказывается на существовании предлагаемого метода), каждый из которых характеризуется своим набором параметров автоколебательной системы. В свою очередь и параметры автоколебательной системы (опорного генератора) приемника могут быть выбраны таким же образом. Пусть указанный набор параметров выбран таким образом, чтобы для любой пары набора параметров, кроме пары, когда набор параметров одинаковый в приемнике и передатчике, эффективность приема была значительно ниже, чем для собственной моды передатчика с соответствующей модой колебания приемника.

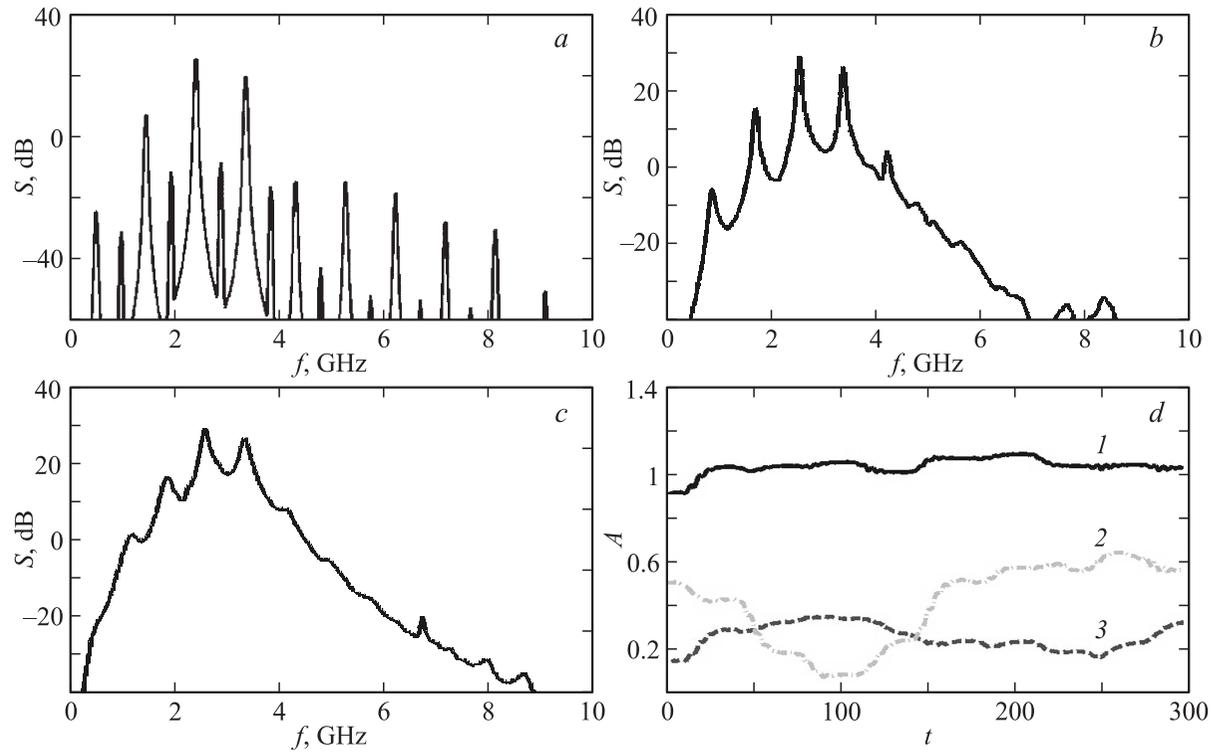
Приемник с фиксированной модой будет эффективно принимать сигналы той же моды от передатчика и будет неэффективен для других мод передатчика. Поэтому возможно одновременная работа в эфире нескольких пар приемопередатчиков, каждая из которых будет работать на собственной моде хаотических колебаний или сложных колебаний

другого типа. При этом при соблюдении определенных условий, такие пары приемопередатчиков не будут мешать работе друг друга. Рассматриваемый тип разделения сигналов принципиально отличается от известных типов, таких как: частотное разделение сигналов, временное разделение сигналов и кодовое разделение сигналов. Фактически в рассматриваемом случае связь в различных парах приемопередатчиков может осуществляться одновременно в одном и том же диапазоне частот, при этом будут различаться какие-то физические характеристики колебаний, например форма спектра или что-то другое.

Чтобы убедиться в возможности реализации такого принципа разделения сигналов, были проведены соответствующие численные расчеты со значениями параметров, соответствующих сверхширокополосному случаю (5). В автоколебательных системах передатчика и приемника изменяемым параметром был коэффициент усиления  $m$ . Для того чтобы результаты расчетов могли быть сопоставлены друг с другом, производилась соответствующая нормировка амплитуды колебаний (поскольку при изменении параметра  $m$  амплитуда колебаний довольно сильно менялась). Для моделирования были выбраны значения параметра  $m = 10, 30, 70$ , два из которых 30 и 70 соответствуют хаотическим колебаниям, а 10 соответствуют сложным регулярным колебаниям. Спектры мощности колебаний, соответствующие этим значениям параметров, приведены на рис. 3, *a–c*. Они демонстрируют, что данные типы колебаний имеют разную структуру спектра, но находятся в одной и той же полосе частот.

При моделировании, в опорном генераторе хаоса в приемнике, выбиралось одно из значений параметра  $m$  и на вход приемника подавались сигналы, соответствующие последовательно значениям параметров, выбираемых при моделировании:  $m = 10, 30, 70$ . В качестве примера на рис. 3, *d* приведены кривые для приема набора сигналов при значениях параметра в генераторе приемника  $m = 30$  и значениях параметра  $m$  в генераторе передатчика, равном 10, 30, 70.

Кривая 1 соответствует приему хаотического импульса со значением параметра в передатчике  $m = 30$ . Кривые 2 и 3 относятся к приему при значениях параметра в передатчике  $m = 10$  и 70 соответственно. Вид этих кривых показывает, что при эффективном приеме импульса со значением параметра, соответствующим значению параметра опорного источника хаоса в приемнике, уровень сигнала на выходе приемника при приеме сигналов с другими значениями параметров значительно



**Рис. 3.** Спектры мощности колебаний для значений коэффициента усиления  $m$ , равных 10 (а), 30 (б), 70 (в), и сравнение уровней сигналов на выходе приемника при приеме импульса (д).

ниже. Такие сигналы могут рассматриваться как „чужие“ и отсекаются с помощью соответствующего выбора порогового значения в устройстве принятия решения.

В работе предложена схема некогерентного приема хаотических радиоимпульсов, использующая опорный генератор хаоса в приемнике. Проведены исследования этой схемы и показана ее способность приема хаотических радиоимпульсов. Установлено, что предложенная схема обладает селективностью по отношению к значениям параметров автоколебательной системы передатчика и приемника, заключающейся в том, что она эффективно принимает сигнал при относительно небольших различиях в значениях параметров и начальных условий.

Показано, что селективность рассматриваемого некогерентного приемника позволяет различать различные моды хаотических сигналов и, в частности, построить новый способ разделения сигналов со сложной структурой, отличающийся от трех основных известных: частотного, временного и кодового.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке ФЦП „Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы“ (гос. контракт № 11.519.11.4027) и программы фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН „Современные проблемы радиофизики“.

## Список литературы

- [1] *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Клецов А.В.* и др. // РЭ. 2008. Т. 53. № 10. С. 1278.
- [2] 802.15.4a-2007. IEEE Standard for Information Technology — Telecommunications and Information Exchange Between systems — Local and metropolitan area networks — specific requirement. Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). N.Y.: IEEE, 2007.  
[ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=4299494](http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=4299494).
- [3] IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. Part 15.6: Wireless Body Area Networks. 29 February 2012.
- [4] *Бельский Ю.Л., Дмитриев А.С., Панас А.И.* и др. // РЭ. 1992. Т. 37. № 4. С. 660.
- [5] *Dmitriev A.S., Panas A.I., Starkov S.O.* // Int. J. Bifurcation and Chaos. 1996. V. 6. N 5. P. 851.