

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ СУРРОГАТНЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ СТАТИСТИЧЕСКОГО УСРЕДНЕНИЯ ФЛУКТУАЦИЙ ПАРАМЕТРОВ ХАОТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ПРИ ИХ ОБРАБОТКЕ

К.С. ВАСЮТА, Ф.Ф. ЗОЦ

В реальных условиях распространения радиоволн и при отражении от движущейся сложной цели форма хаотических радиолокационных сигналов искажается. При этом значительно ухудшается качество их обработки. В работе для повышения качества обнаружения хаотического радиолокационного сигнала с флуктуирующими параметрами предлагается применение технологии формирования суррогатных сигналов. Алгоритм формирования суррогатных сигналов позволяет сохранять спектральные, корреляционные и нелинейные свойства сигналов. На основе формирования таких клонов сигнала в работе предложено статистическое усреднение шума наблюдения и флуктуации параметров сигнала при их нормальном законе распределения. Применение суррогатных сигналов при обработке хаотических сигналов позволяет повысить вероятность их правильного обнаружения на 10 – 20 %.

*Ключевые слова:* хаотический сигнал, флуктуации параметров, суррогатный сигнал, качество обнаружения.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для скрытия факта функционирования радиолокационных систем применяют сложные шумоподобные сигналы, в том числе и хаотические. Применение традиционных (корреляционных) методов обработки таких сигналов [1] не обеспечивает требуемых показателей качества обнаружения. В частности, в работе [2] показано, что для обработки хаотических сигналов необходимо применение неклассических методов, которые учитывают их специфические свойства через динамические инварианты.

В реальных условиях распространения радиоволн нерегулярная форма хаотических сигналов сильно искажается. Подобные искажения наблюдаются и при отражении таких сигналов от радиолокационной цели. При этом значительно ухудшается качество их обработки [1]. Для решения этой проблемы необходимо скомпенсировать возникающие флуктуации амплитуды и фазы хаотического сигнала. Компенсацию флуктуаций можно реализовать путем привлечения технологии формирования суррогатных сигналов. Эта технология дает возможность получить множество клонов (псевдовыборок) принятого сигнала, сохраняя при этом его свойства. На основе полученных клонов возможно усреднение случайных флуктуаций параметров хаотических сигналов.

Понятие «суррогатные данные», введенное Theiler и др. [3], в 1992 году использовалось в контексте статистического тестирования временного ряда на нелинейность. В настоящее время имеется уже достаточный набор методов формирования суррогатных данных, например, бутстреп-процедуры [4], которые позволяют сохранить линейные свойства процесса. Также выделяют: алгоритмы формирования суррогатов временного изменения (temporal shift surrogate – TSS), которые применяются для проверки нали-

чия нелинейных зависимостей в сигнале; алгоритмы формирования суррогатных данных путем небольшой перетасовки (small-shuffle surrogate – SSS), для проверки не стационарности временного ряда и др [5]. Следует отметить, что применение этих способов не может сохранить линейные либо не линейные свойства сложных процессов одновременно.

В работе [2] предложено при обнаружении хаотических сигналов применять алгоритм формирования суррогатов траектории аттрактора (attractor trajectory surrogate – ATS) [6], который используется для эмпирической оценки отношения правдоподобия. Алгоритм ATS позволяет формировать суррогатные сигналы, сохраняющие нелинейные свойства хаотических сигналов, т. е. их траектории в псевдофазовом пространстве, а также их спектральные и корреляционные свойства. Поэтому для повышения качества обнаружения хаотического сигнала при корреляционной обработке целесообразно применить алгоритм ATS.

**Целью данной работы** является синтез обнаружителя радиолокационного хаотического сигнала с флуктуирующими параметрами, применяя технологию формирования суррогатных сигналов.

### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Рассмотрим случай обнаружения радиолокационного хаотического сигнала на фоне белого гауссового шума при нормальных флуктуациях параметров сигнала. Пусть принимаемая реализация

$$y_t = \dot{x}_t + \xi_t \quad (1)$$

является аддитивной смесью полезного хаотического сигнала  $x_t$ , сформированного, например, при помощи полинома Чебышева 1-го рода 3-го порядка, и белого шума  $\xi_t$ . С целью компенсации флуктуаций амплитуды и фазы сигнала при их нормальном законе распределения из приня-

той реализации получим множество суррогатов (псевдовыборок), которые далее подвергнем статистическому усреднению.

Для получения суррогатного сигнала из (1) можно воспользоваться алгоритмом ATS, приведенном в работе [6]. Порядок расчетов при этом следующий.

1. Определим векторный временной ряд  $\{z_t\}_{t=1}^{N-d_w}$  с элементами  $z_t = (y_t, y_{t+\tau}, y_{t+2\tau}, \dots, y_{t+d_e\tau})$  вложением скалярного временного ряда  $\{y_t\}_{t=1}^N$  в псевдофазовое пространство с временной задержкой  $\tau$ . Для простоты выбираем окно вложения  $d_w = d_e\tau - 1$ , где  $d_e$  – размерность вложения.

2. Выберем начальное состояние

$$s_1 \in \{z_t | t=1, \dots, N-d_w\}.$$

3. Положим  $i=1$ .

4. Выберем наугад для  $s_i$  одного соседа из множества  $\{z_t | t=1, \dots, N-d_w\}$ , например,  $z_j$ .

5. Установим  $s_{i+1} = z_{j+1}$  и увеличим  $i$ .

6. Повторим эту процедуру от шага 4, пока  $i = N$ .

7. Возьмем  $\{(s_i)_1 : i=1, 2, \dots, N\}$  как суррогатный временной ряд, в котором  $(\cdot)_1$  обозначает скалярную первую координату вектора.

Для получения ансамбля из  $M$  суррогатных сигналов  $s_i^m$  необходимо повторить выше приведенный алгоритм  $M$  раз. Компенсация флуктуаций реализуется путем статистического усреднения ансамбля из  $M$  суррогатных сигналов.

Имитационное моделирование показало, что алгоритм ATS позволяет получить с высокой скоростью формирование множество суррогатных сигналов  $s_i^m$  и при этом сохранить все свойства исходного наблюдения. При этом статистическое усреднение приводит к компенсации шума наблюдения. На рис. 1 иллюстрируются фазовые портреты реализации  $y_t$  и полученного усредненного суррогатного сигнала:

$$ss_t = \frac{\sum_{m=1}^M s_t^m}{M}, \quad (2)$$

где  $M$  – количество суррогатных сигналов. Из рисунка видно, что фазовый портрет принятой реализации более зашумлен, а усредненного суррогата более структурирован.

Таким образом, применение технологии формирования суррогатных сигналов позволяет значительно скомпенсировать шум наблюдения. Следовательно, можно ожидать, что такая компенсация шума наблюдения в принятой реализации позволит понизить порог обнаружения хаотического сигнала и тем самым повысить качество его обнаружения.

Далее рассмотрим более сложный случай, когда хаотический сигнал наблюдается при флуктуациях параметров, которые обусловлены его распространением в неоднородной тропосфере и отражением от сложной цели. Тогда выражение (1) перепишем в следующем виде:

$$Y_t = b_t \dot{x}_t e^{j2\pi(F_{\text{дсп}} t + \beta_t)} e^{j\phi_t} + \xi_t, \quad (3)$$

где  $b_t$  и  $\beta_t$  – случайные компоненты амплитуды и фазы отраженного сигнала, обусловленные амплитудными и фазовыми шумами цели;  $x_t$  – ожидаемый сигнал;  $F_{\text{дсп}}$  – средняя частота Доплера, а  $\phi_t$  – случайная величина изменения фазы с нормальным распределением [1, 7].

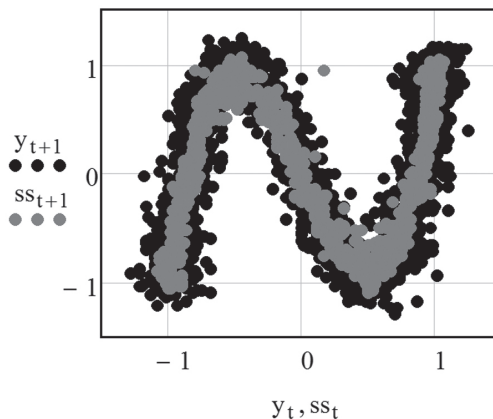


Рис. 1. Фазовые портреты: принятой реализации  $y_t$  и усредненного суррогатного сигнала  $ss_t$

Численное моделирование показало, что усреднение суррогатного сигнала из наблюдения (3) приводит к частичной компенсации не только шума, но и флуктуаций амплитуды и фазы отраженного сигнала при их нормальном распределении. Это наглядно видно из анализа фазовых портретов принятой реализации  $Y_t$  (3) и полученного суррогатного сигнала  $ss_t$ , которые приведены на рис. 2.

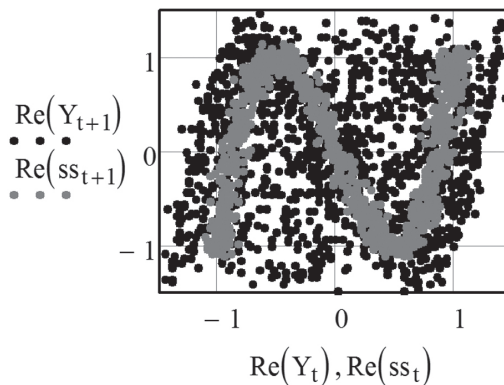


Рис. 2. Фазовые портреты: принятой реализации  $Y_t$  (черным цветом) и усредненного суррогатного сигнала  $ss_t$  (серым цветом)

Для выделения полезного сигнала из усредненного суррогатного сигнала применима традиционная корреляционная обработка [7, 8], которая описывается в следующем виде

$$Z_{ij}(t_{3i}, F_{Dj}) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} ss(t) U^*(t - t_{3i}) e^{j2\pi F_{Dj} t} dt, \quad (4)$$

где  $U^*(t - t_{3i}) e^{j2\pi F_{Dj} t}$  – комплексная амплитуда ожидаемого сигнала с учетом времени запаздывания  $t_3$  и доплеровского смещения частоты  $F_{Dj}$ .

Исходя из этого, для повышения вероятности правильного обнаружения хаотического сигнала, отраженного от цели, можно воспользоваться следующей цепочкой преобразований над принятой реализацией  $Y_i$ : получение множества суррогатов  $s_i^M \rightarrow$  компенсация шума и флуктуаций, путем получения усредненного суррогатного сигнала  $ss_i \rightarrow$  вычисление модуля корреляционного интеграла  $Z_{ij}$  и сравнение его с порогом. Синтезированная функциональная схема обнаружителя с применением суррогатных сигналов приведена на рис. 3.

Принятая реализация  $y_i$  поступает на блок формирования суррогатных сигналов (ФСС), который реализует алгоритм ATS для формирования множества суррогатов  $s_i^m$ . Далее сформированные сигналы подаются на блок компенсации шума и флуктуаций (КШ и Ф) путем усреднения ансамбля суррогатов. Полученная усредненная суррогатная реализация  $ss_i$  поступает далее на корреляционную схему обработки сигналов (СОС), с помощью которой накапливается полезный сигнал. В пороговом устройстве (ПУ) принимается решение о наличии сигнала.

На рис. 4 иллюстрируется зависимость значения  $Z(t)$  на выходе корреляционной СОС для случаев: отсутствия флуктуаций; наличия флуктуаций, но без их статистического усреднения с помощью суррогатных сигналов; при компенсации флуктуаций с помощью блока КШ и Ф путем усреднения полученных суррогатов в блоке ФСС. Анализ зависимостей (рис. 3) свидетельствует о том, что применение синтезированного алгоритма позволяет повысить отношение сигнал-шум на выходе интегратора корреляци-

онной СОС, а значит и качество обработки такого сигнала.

При имитационном моделировании компенсации флуктуаций формировалось 1000 суррогатных реализаций для различной интенсивности флуктуаций, как и в работе [1]. При больших отношениях сигнал-шум и слабых флуктуациях достаточно сформировать не более 100 суррогатных сигналов. В то же время, численное моделирование показало, что для компенсации флуктуаций при уменьшении отношения сигнал-шум и увеличении интенсивности флуктуаций от слабых к сильным необходимо увеличивать и количество сформированных суррогатов до 1000. Дальнейшее увеличение количества суррогатных сигналов не дает заметного повышения качества обработки сигнала и приводит к увеличению времени обработки.

Оценка выигрыша в качестве обнаружения хаотического сигнала при применении полученного алгоритма (рис. 3) иллюстрируется кривыми обнаружения, приведенными на рис. 5.

Кривые  $D(q)$  получены при фиксированной вероятности ложной тревоги  $F=10^{-6}$  с учетом применения корреляционной обработки [1, 8] (отображены серым цветом) и с применением алгоритма формирования суррогатных сигналов (отображены черным цветом) и рассчитаны для следующих случаев: 1) при отсутствии флуктуаций, 2) при слабых флуктуациях, 3) при средних флуктуациях, 4) при сильных флуктуациях. При моделировании каждого случая был сформирован ансамбль из 1000 суррогатных реализаций (3), состоящих из 1100 отсчетов и содержащих по 3 полезных сигнала.

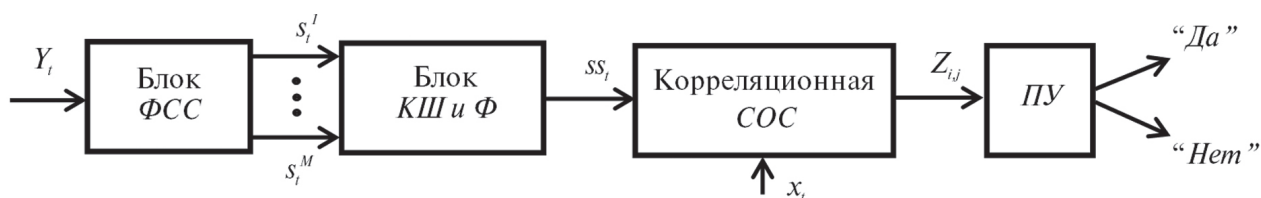


Рис. 3. Функциональная схема обнаружителя с применением суррогатных сигналов

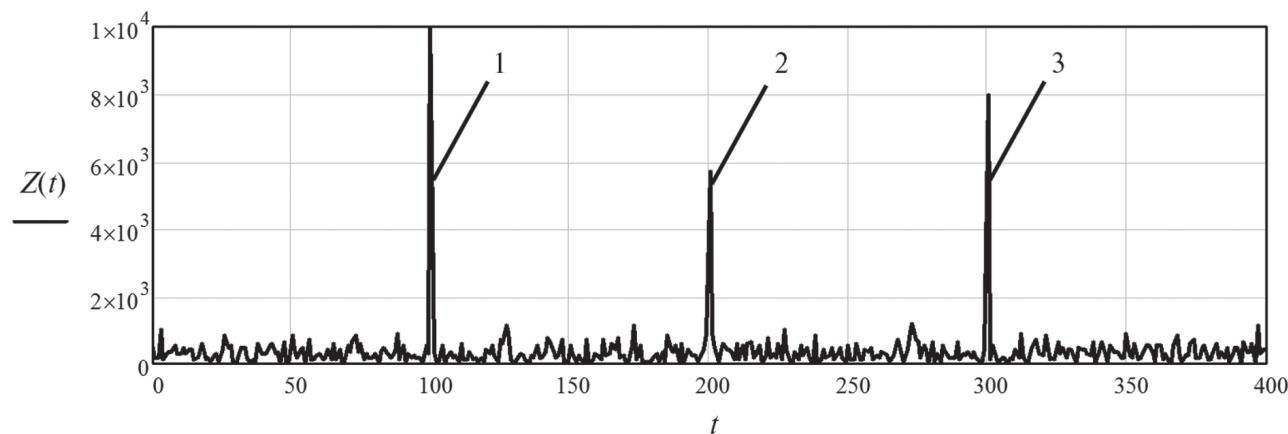


Рис. 4. Напряжение на выходе корреляционной СОС для случаев: 1 – при отсутствии флуктуаций; 2 – при наличии флуктуаций (без применения суррогатов); 3 – при наличии флуктуаций (с применением суррогатов)

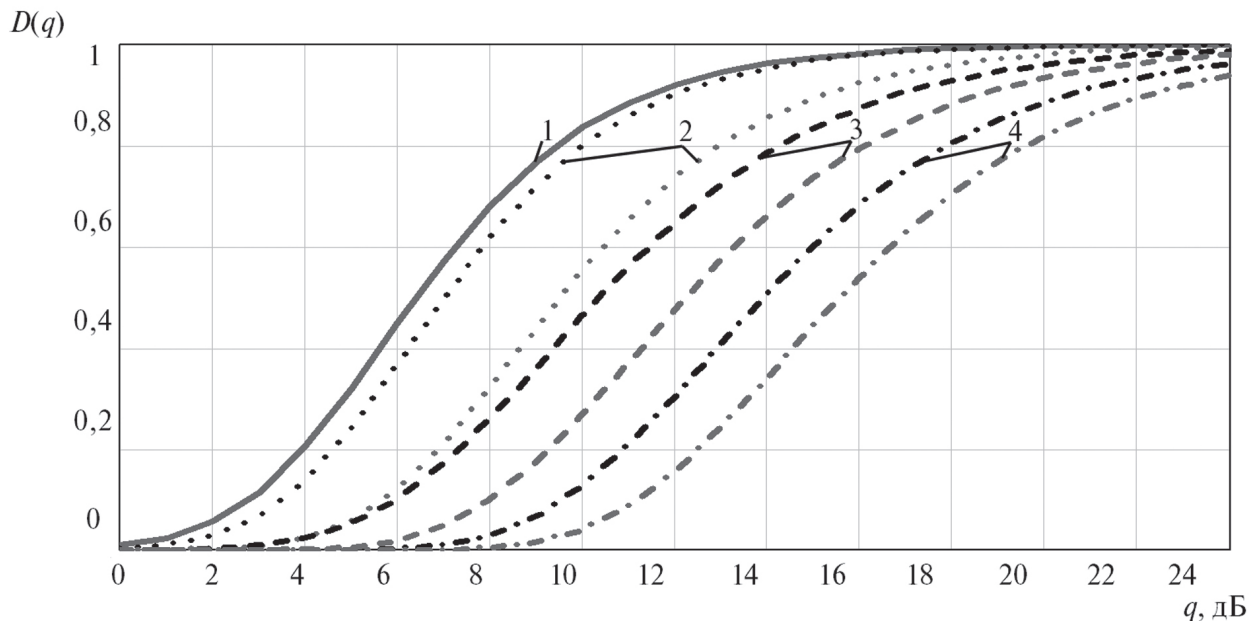


Рис. 5. Кривые обнаружения хаотического сигнала для  $F=10^{-6}$  (серым цветом — без усреднения, черным цветом — с усреднением на основе суррогатов): 1) при отсутствии флуктуаций параметров сигнала; 2) при слабых флуктуациях; 3) при средних флуктуациях; 4) при сильных флуктуациях

Из сравнения кривых (рис. 4) видно: применение алгоритма формирования суррогатных сигналов АТС для повышения качества обнаружения позволяет снизить порог обнаружения на 3 дБ — при малых флуктуациях параметров сигнала; на 2 дБ — при средних флуктуациях; и на 1,5 дБ — при сильных флуктуациях. Это объясняется тем, что при сильных флуктуациях закон изменения амплитуд сигнала видоизменяется от нормального закона распределения вероятностей к распределению Релея и качество статистического усреднения снижается.

### ВЫВОДЫ

Таким образом, применение алгоритма формирования суррогатных сигналов при обнаружении хаотического сигнала, отраженного от радиолокационной цели, обеспечивает компенсацию флуктуаций параметров сигнала, которые имеют нормальное распределение. Предложенная функциональная схема обнаружителя позволяет повысить вероятность правильного обнаружения при фиксированном значении отношения сигнал-шум и вероятности ложной тревоги на 10 – 20 %.

### Литература

[1] *Васюта К. С.* Анализ влияния флуктуаций параметров хаотического сигнала на качество его корреляционной обработки в измерительных радиотехнических системах / К. С. Васюта, Ф. Ф. Зоц, С. В. Озеров // Системи обробки інформації. — Х.:ХУПС, 2012. — Вип. 7(105). — С. 60–63.

[2] *Костенко П. Ю.* Новый подход к непараметрическому обнаружению хаотических сигналов на фоне белого шума с использованием “нелинейной динамической статистики” / П. Ю. Костенко, К. С. Васюта, А. Н. Барсуков [и др.] // Збірник наукових праць ХУПС. — 2010. — № 3(25). — С. 108–116.

[3] *Theiler J.* Testing for nonlinearity in time series: The method of surrogate data / J. Theiler, S. Eubank, A. Longtin, B. Galdrikian, and J. D. Farmer. // *Physica D.* — 1992. — 58. P. 77–94.

[4] *Kantz H.* Nonlinear time series analysis / Holger Kantz and Thomas Schreiber // Second edition. United Kingdom University Press, Cambridge. — 2004. — 369 P.

[5] *Small M.* Applied Nonlinear Time Series Analysis Applications in Physics, Physiology and Finance / M. Small // World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. — 2005. — 245 P.

[6] *Small M.* Attractor trajectory surrogates: hypothesis testing and prediction / Michael Small // International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications. Fukuoka, Japan, Nov. 29 – Dec. 3. — 2004. — P. 123–126.

[7] *Ширман Я.Д.* Радиоэлектронные системы: основы построения и теория / Я.Д. Ширман, А.С. Маляренко, С.П. Лещенко и др. — М.: Радиотехника, 2007. — 512 с.

[8] *Васюта К. С.* Корреляционная обработка хаотических сигналов / К. С. Васюта, А. А. Грызо, Ф. Ф. Зоц // Збірник наукових праць ХУПС. — Х.: ХУПС, 2012. — Вип. 2(31). — С. 62–64.

Поступила в редколлегию 10.12.2013

**Васюта Константин Станиславович**, фото и сведения об авторе см. на с. 486.



**Зоц Федор Федорович**, адъюнкт кафедры боевого применения радиотехнического вооружения Харьковского университета Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба. Научные интересы: обработка хаотических сигналов в радиолокационных системах.



УДК 621.391

**Застосування технології формування сурогатних сигналів для статистичного усереднення флуктуацій параметрів хаотичних сигналів під час їхньої обробки / К.С. Васюта, Ф.Ф. Зоц // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. – 2013. – Том 12. – № 4. – С. 559–563.**

У реальних умовах поширення радіохвиль і при відбитті від рухомої складної цілі форма хаотичних радіолокаційних сигналів спотворюється. При цьому значно погіршується якість їх обробки. У роботі для підвищення якості виявлення хаотичного радіолокаційного сигналу з флуктуючими параметрами пропонується застосування технології формування сурогатних сигналів. Алгоритм формування сурогатних сигналів дозволяє зберігати спектральні, кореляційні та нелінійні властивості сигналів. На основі формування таких клонів сигналу в роботі запропоновано статистичне усереднення шуму спостереження та флуктуацій параметрів сигналу при їх нормальному законі розподілу. Застосування сурогатних сигналів під час обробки хаотичних сигналів дозволяє підвищити імовірність їх правильного виявлення на 10 – 20 %.

*Ключові слова:* хаотичний сигнал, флуктуації параметрів, сурогатний сигнал, якість виявлення.

Л.: 05. Бібліогр.: 08 найм.

UDC 621.391

**Application of technology of forming surrogate signals for statistical averaging of parameter fluctuations of chaotic signals at their processing / K.S. Vasyuta, F.F. Zots // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. – 2013. – Vol. 12. – № 4. – P. 559–563.**

In real conditions of radio wave propagation and reflection from a moving complex target the form of chaotic radar signals is distorted. At that the quality of their processing considerably deteriorates. The paper suggests using the technology of forming surrogate signals with fluctuating parameters to improve the quality of chaotic radar signal detection. The algorithm for generating surrogate signals allows to save spectral, correlation and non-linear properties of signals. On the basis of the formation of these signal clones the paper proposes statistical averaging of observation noise and fluctuations of signal parameters at their normal distribution. The use of surrogate signals for processing chaotic signals enables to increase probability of their correct detection by 10–20%.

*Keywords:* chaotic signal, parameters fluctuations, surrogate signal, quality of detection.

Fig.: 05. Ref.: 08 items.