

УДК 621.391

К.С. Васюта, Ф.Ф. Зоц

Харьковский университет Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба, Харьков

ОБНАРУЖЕНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ХАОТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ПРИ ФЛЮКТУАЦИЯХ ЕГО ПАРАМЕТРОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ СУРРОГАТНЫХ СИГНАЛОВ

В реальных условиях распространения радиоволн и при отражении от движущейся сложной цели форма хаотических радиолокационных сигналов сильно искажается. При этом значительно ухудшается качество их обработки. В работе для повышения качества обнаружения хаотического радиолокационного сигнала с флюктуирующими 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 флюктуации 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, флюктуации параметров, суррогатный сигнал, качество обнаружения.

Введение

В настоящее время для скрытия факта функционирования радиолокационных систем применяются 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 флюктуации амплитуды и фазы хаотического сигнала. Компенсацию флюктуаций 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 флюктуаций параметров хаотических сигналов.

Понятие “суррогатных данных”, 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 наличия 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 флюктуирующими параметрами применяя технологию формирования суррогатных сигналов.

Изложение основного материала

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

$$y_t = x_t + \xi_t \quad (1)$$

является аддитивной смесью полезного хаотического сигнала x_t , сформированного, например, при помощи полинома Чебышева 1-го рода 3-го порядка, и белого шума ξ_t .

С целью компенсации флюктуаций амплитуды и фазы сигнала при их нормальном законе распределения из принятой 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 τ .

Для простоты выбираем окно вложения $d_w = d_e\tau - 1$, где d_e – размерность вложения.

2. Выберем начальное состояние

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

3. Положим $i = 1$.

4. Выберем наугад для s_i одного соседа из множества $\{z_t \mid t = 1, \dots, N - d_w\}$, 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 $\{(s_t)_i \mid t = 1, 2, \dots, N\}$ как суррогатный временной ряд, в котором $(\cdot)_i$ обозначает скалярную первую координату вектора.

Для получения ансамбля из M суррогатных сигналов s_t^m необходимо повторить выше приведенный алгоритм M раз.

Компенсация флюктуаций 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_t^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:

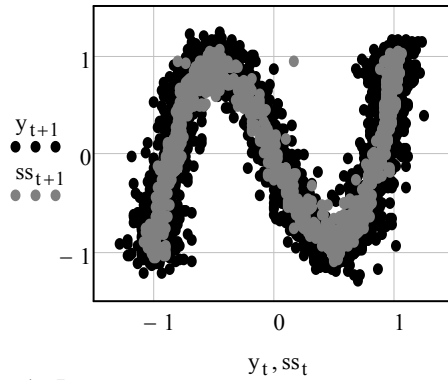


Рис. 1. Фазовые портреты: принятой реализации y_t и усредненного суррогатного сигнала ss_t

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

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 флюктуациях параметров, которые обусловлены его распространением в неоднородной тропосфере и отражением от сложной цели.

Тогда выражение (1) перепишем в следующем виде:

$$y_t = b_t x_t e^{j2\pi(F_{дсп}t + \beta_t)} e^{j\varphi_t} + \xi_t, \quad (3)$$

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

Численное моделирование показало, что усреднение суррогатного сигнала из наблюдения (3) приводит к частичной компенсации не только шума, но и флюктуаций амплитуды и фазы отраженного сигнала при их нормальном распределении. Для выделения полезного сигнала из усредненного суррогатного сигнала применима традиционная корреляционная обработка [7, 8].

Синтезированная функциональная схема обнаружителя с применением суррогатных сигналов приведена на рис. 2.

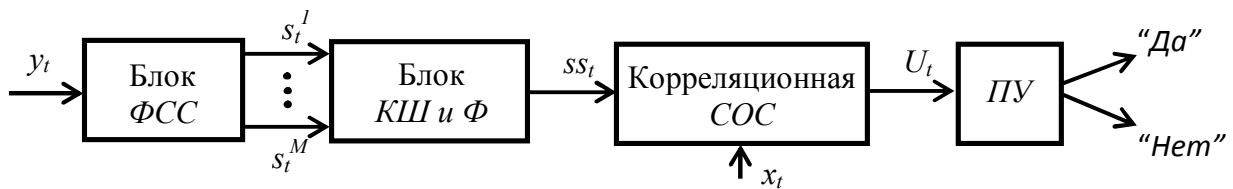


Рис. 2. Функциональная схема обнаружителя с применением суррогатных сигналов

Принятая реализация y_t поступает на блок формирования суррогатных сигналов (ФСС), который реализует алгоритм ATS для формирования множества суррогатов s_t^m . Далее сформированные сигналы подаются на блок компенсации шума и флюктуаций (КШ и Ф) путем усреднения ансамбля суррогатов. Полученная усредненная суррогатная реализация ss_t 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. 3 иллюстрируется зависимость напряжения U_t на выходе корреляционной СОС для случаев: отсутствия флюктуаций; наличия флюктуаций, но без их компенсации с помощью суррогатных сигналов; при компенсации флюктуаций 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 корреляционной СОС, а значит и качество обработки такого сигнала.

При имитационном моделировании компенсации флюктуаций формировалось 1000 суррогатных реализаций для различной интенсивности флюктуаций, как и в работе [1]. При больших отношениях сигнал-шум и слабых флюктуациях достаточно

сформировать не более 100 суррогатных сигналов. В то же время, численное моделирование показало, что для компенсации флюктуаций при уменьшении отношения сигнал-шум и увеличении интенсивности флюктуаций 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. 2) иллюстрируется кривыми обнаружения, приведенными на рис. 4.

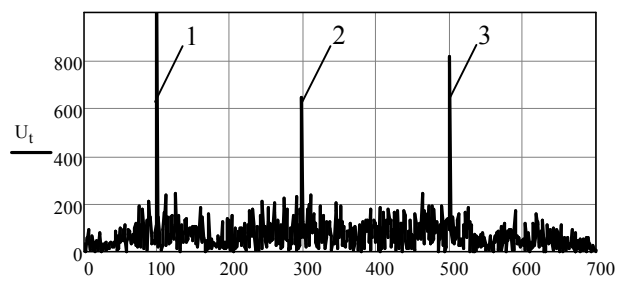


Рис. 3. Напряжение на выходе корреляционной СОС для случаев: 1 – при отсутствии флюктуаций; 2 – при наличии флюктуаций (без применения суррогатов); 3 – при наличии флюктуаций (с применением суррогатов)

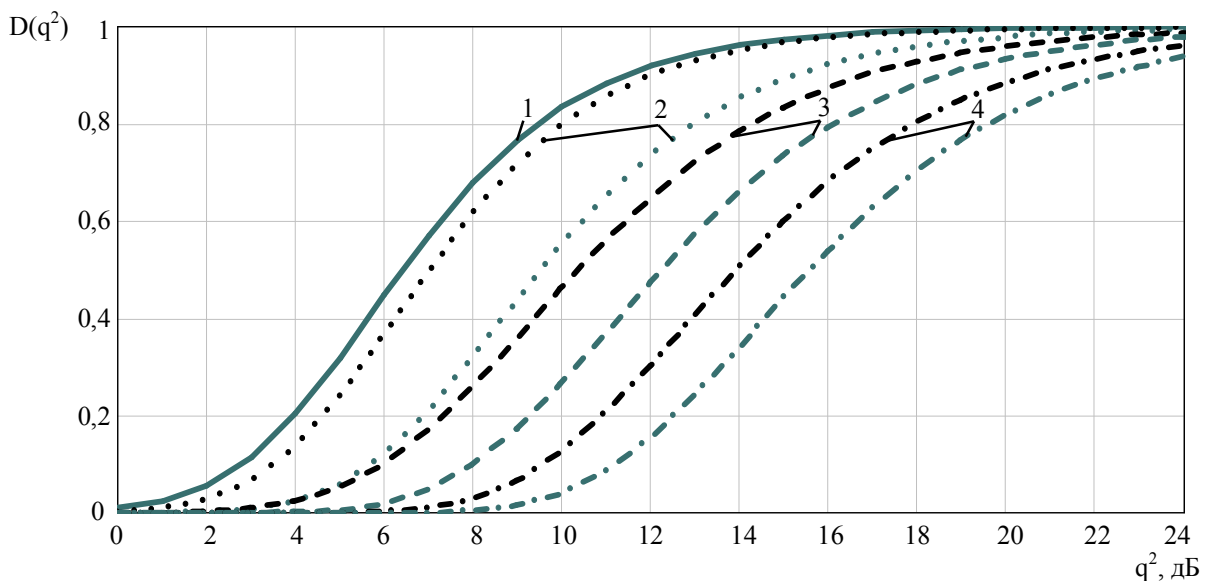


Рис. 4. Кривые обнаружения хаотического сигнала ($F=10^{-6}$): 1) без учета флюктуаций параметров сигнала; 2) при слабых флюктуациях; 3) при средних флюктуациях; 4) при сильных флюктуациях.

Кривые $D(q^2)$ 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) без учета флуктуаций, 2) при слабых флуктуациях, 3) при средних флуктуациях, 4) при сильных флуктуациях. При моделировании каждого случая был сформирован ансамбль из 1000 реализаций (3), состоящих из 1100 отсчетов, которые подвергались обработке по предложенному алгоритму.

Из сравнения кривых (рис. 4) видно: применение алгоритма формирования суррогатных сигналов ATS 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 обнаружения 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 %.

Список литературы

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. Леценко 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 редколлегию 26.07.2013

Рецензент: д-р техн. наук проф. Ю.М. Седышев, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ВИЯВЛЕННЯ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО ХАОТИЧНОГО СИГНАЛУ ПРИ ФЛУКТУАЦІЇ ЙОГО ПАРАМЕТРІВ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ СУРОГАТНИХ СИГНАЛІВ

К.С. Васюта, Ф.Ф. Зоц

У реальних умовах поширення радіохвиль і при відбитті від рухомої складної цілі форма хаотичних радіолокаційних сигналів сильно спотворюється. При цьому значно погіршується якість їх обробки. У роботі для підвищення якості виявлення хаотичного радіолокаційного сигналу з флуктуючими параметрами пропонується застосування технології формування суррогатних сигналів. Алгоритм формування суррогатних 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 суррогатних сигналів при обробці хаотичних сигналів дозволяє підвищити імовірність їх правильного виявлення на 10 – 20 %.

Ключові слова: хаотичний сигнал, флуктуацій параметрів, суррогатний сигнал, якість виявлення.

DETECTION OF RADAR CHAOTIC SIGNAL FLUCTUATIONS IN ITS PARAMETERS THROUGH THE USE OF SURROGATE SIGNALS

K.S. Vasuta, F.F. Zots

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

Keywords: chaotic signal, fluctuation parameters, surrogate signal, the quality of detection.