Раздел I. Радиотехника, радио- и гидролокация, связь

УДК 621.396.49

В.В. Юдин, Л.М. Перерва, М.С. Пащенко, П.Л. Титов, В.Н. Гряник

КРИТИЧЕСКИЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ИНДЕКСЫ В ОЦЕНКЕ ФРАКТАЛЬНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ ППРЧ

Приводятся результаты сопоставления сеансов функционирования системы связи с ППРЧ и соответствующих численных моделей. Рассмотрены модель с динамическим хаосом (отображение Энона) и три квазистохастические модели. Сравнительный анализ ведется в рамках корреляционного подхода. Указывается промежуточное положение рассматриваемой системы между стохастическими и хаотическими системами, делается вывод о фрактальном характере ее функционирования.

ППРЧ; корреляционный анализ; фрактальность; стохастика; хаос.

V.V. Yudin, L.M. Pererva, M.S. Paschenko, P.L. Titov, V.N. Gryanik

CRITICAL CORRELATIONAL INDICES IN ESTIMATION OF FREQUENCY HOPPING SYSTEMS FRACTALITY OF OPERATION

The results of comparison of frequency-hopping system work sessions and corresponding numerical models are given. Dynamic chaos model (Henon map) and three quasistochastic models are considered. Comparative analysis is taken from the aspect of correlational approach. Intermediate position of this system between stochastic and chaotic systems is stated, fractal nature of its operation is assumed.

Frequency hopping; correlation analysis; fractality; stochastics; chaos.

В настоящее время общепринятой точкой зрения на борьбу с системами ППРЧ является подавление таких систем с помощью постановки прицельных по частоте помех на рабочих частотах (РЧ), предсказанных путем определения параметров генератора псевдослучайных чисел (ГПСЧ) атакуемой системы. Считается, что если не удается определить параметры ГПСЧ, то эффективная борьба, особенно со сверхбыстрой ППРЧ, становится маловероятной.

Следует атаковать эфир разрешенных рабочих частот с определенной стратегией атаки. Такая стратегия должна базироваться на специфике функционирования системы в эфире, если таковая существует апостериори. Традиционные принципы построения систем ППРЧ не подразумевают какую-либо апостериорную специфику. Эксплуатация ресурса РЧ системой ППРЧ должна иметь равномерную вероятностную структуру.

В случае обнаружения какой-либо нетривиальной апостериорной структуры нарушается главный принцип проектирования систем ППРЧ. Если этот принцип в апостериорной версии не работает, то тогда учет специфики функционирования системы ППРЧ может существенно упростить задачу борьбы. В таком случае нет никакой необходимости решать задачу жесткого взлома ГПСЧ и др. Факт наличия характерных особенностей автокорреляционных функций и фрактальности облегчил бы определение стратегии атак на подобные системы.

В настоящей работе проводится сопоставление восьми сеансов функционирования системы связи с ППРЧ JTIDS (Joint Tactical Information Distribution System – объединенная система распределения тактической информации) [1, 2, 3] и четырех численных моделей. Основная задача состоит в проведении корреляционного анализа реальных и модельных частотно-временных матриц (ЧВМ), причем ЧВМ-модельных систем согласованы с соответствующими характеристиками реального трафика. В качестве такового рассматривается не сам пакетный трафик, а трафик занятости рабочих частот все равно какими пользователями, неважно из каких подсетей. Мы называем такие ЧВМ апостериорными интегральными ЧВМ. Это те самые ЧВМ функционирующих систем, которые звучат в эфире. Главная задача – определить, как загружен РЧ-эфир системы ППРЧ в апостериорном представлении. Как мы уже отмечали, разработчики JTIDS априори предполагают, что РЧ-эфир будет загружен равномерно. В нашей предыдущей работе [4] показано, что само собой разумеющееся правило апостериори не выполняется. Существует четко выделенная модальная структура, состоящая из 7–9 мод из 51 РЧ, которые никак не могут быть интерпретированы равномерным распределением. В настоящей работе мы делаем следующий шаг по исследованию апостериорной специфики функционирования JTIDS с другой стороны. Будем отталкиваться от реальной ЧВМ и модельных ЧВМ. Качественный анализ восьми сеансов JTIDS показал, что существует следующая структура сеансов: 3+3+2. Она характеризует, видимо, три типа пользователей из некоторых подсетей. Модельные эксперименты, которые мы избрали, призваны сделать некоторые акценты на принципах генерации модельных ЧВМ. Мы надеемся, что эти модельные эксперименты позволят понять характер реального эксплуатационного трафика JTIDS. Эффект «звенящих частот» [5] полностью противоречит концепции конструирования ППРЧ [6] и достоин внимания в другом подходе. В качестве него мы используем корреляционный анализ ЧВМ. Сам по себе корреляционный анализ вполне традиционен [8]. Фактически задача данной статьи относится к проверке гипотез, но не на уровне функций распределения, а на уровне корреляционных функций. Испытывается некоторая конструктивная гипотеза против хорошо известной экспоненциальной функции. Физический смысл последней отождествляется с шумами Найквиста–Джонсона, которые в пределе могут дать типичное белое распределение спектральной оценки. Модельные эксперименты № 1-3 носят существенные квазистохастические составляющие. В эксперименте № 1 работает единственный стандартный квазидатчик. В эксперименте № 2 11 квазидатчиков равномерно распределены по времени (сигнум-манипуляция). В эксперименте № 3 употребляется манипуляция типа Ципфа–Парето–Мандельброта (ЦПМ-манипуляция), с существенным ближнедействующим распределением загрузки во временной шкале эксплуатации РЧ-ресурса. Все эксперименты имеют квазистохастическую компоненту, и какие-либо другие не содержатся. Эти эксперименты моделируют динамику загрузки РЧ-трафика. При этом его не надо путать с пакетным трафиком. В качестве четвертой модели было взято отображение Энона [9]. По своему смыслу это совсем иной класс моделей – в них не содержится никакой стохастики, но есть квадратичная нелинейность. Однако главным с нашей точки зрения в модели Энона является перекрестное антифазное вхождение двух степеней свободы. При некоторых значениях управляющих параметров система Энона переходит к хаотическому режиму [9]. Таким образом, выбор наших экспериментов, мы надеемся, дает два крайних представления динамики загрузки РЧ-эфира в системе JTIDS. Мы полагаем, что функционирование данной системы будет лежать между этими крайностями. Некоторые основания такой гипотезы показаны на рис. 1 и 3. На них показаны ЧВМ всех восьми сеансов системы JTIDS, с одной стороны, а с другой стороны – аналогичная ЧВМ Энона.

На визуальном уровне, сопоставляя рис. 1 и 3, видна некоторая общность типов ЧВМ. Так, налицо в обоих случаях некоторые НЧ-осцилляции. На рис. 3 эти осцилляции систематически нарушаются некоторыми всплесками хаотичности. Правда, сказать такое про ЧВМ JTIDS рис. 1 строго нельзя, но квазистохастическое чередование групп всплесков налицо.

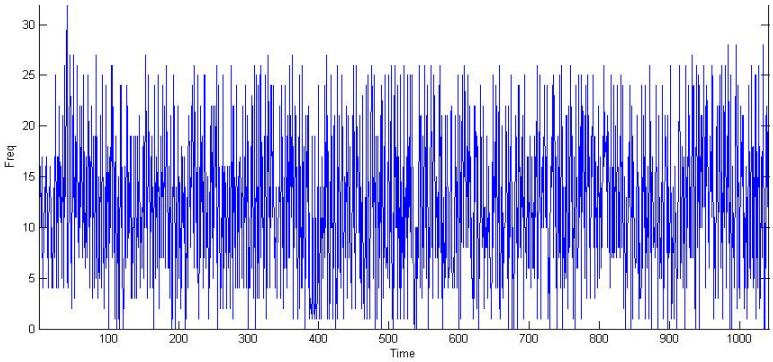

Рис. 1. ЧВМ функционирования системы ППРЧ (8 сеансов, 1042 пакета): ось Y – номера частот; ось X – временная развертка

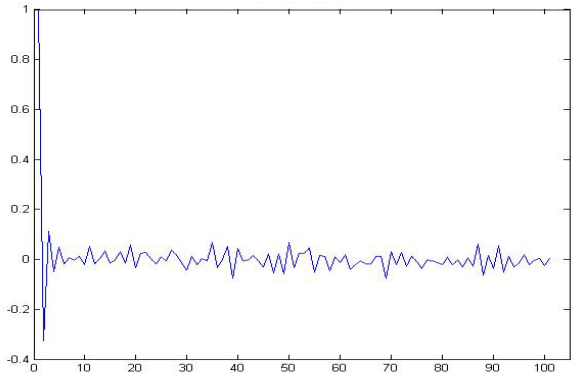

Рис. 2. АКФ ЧВМ системы ППРЧ

Все это отражается в ВЧ-составляющей. И, конечно, если говорить в строгом смысле, можно найти некоторую нетривиальную фильтрацию, позволяющую разделить ВЧ- и НЧ-компоненты. Но большинство фильтраций предполагает, может быть в скрытой форме, аддитивный закон композиции. Выбор фильтров в мультипликативных случаях составляет самостоятельную задачу. Из рис. 1 сразу видно, что все 8 сеансов работают на ограниченном диапазоне РЧ от 0 до 27. Видимо, проблема квазидатчиков в системе JTIDS не решается на одном уровне. Возможно выбор поддиапазона связан с типом подсетей. Модель Энона (рис. 3) близка к осцилляторной модели с хаотическим режимом манипуляции. Как известно, она приводит к хаотическим режимам без всякой стохастичности [9].

Дальнейший наш анализ уже будет относиться к корреляционному уровню рассмотрения. На рис. 2 и 4 даны, соответственно, АКФ ЧВМ JTIDS и АКФ Энона. Из этих данных была получена аппроксимационная зависимость средних тенденций в АКФ. Как и положено, в основном аппроксимируется асимптотика, которая

имеет ближнюю доверительную границу на отметках 5 единиц квантования. Все эти зависимости имеют один класс, степенной, точнее обобщенно-гиперболический. Причем критические показатели АКФ существенно ниже 1, тем самым эти корреляции являются еще и дальнодействующими. Уже этот факт указывает, что за этим свойством может стоять концепция фрактальности [7]. Таким образом, экспоненциальную зависимость надо отвергнуть на высоком уровне доверия. Главное, что АКФ системы JTIDS подчиняется обобщенной гиперболической зависимости в целом. Если говорить о первом нуле, то его значение приходится на 1-2 ед. квантования. Если бы можно было ввести понятие дисперсии АКФ, то в нуле АКФ рис. 2 и 4 имеет малую дисперсию. В этом плане это как бы шумовой признак, если бы была экспоненциальная зависимость. Но в данном случае, это хаотический режим динамики трафика эфира системы JTIDS.

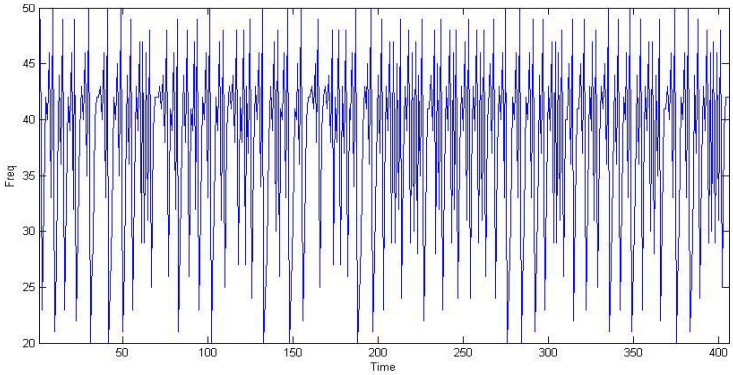

Рис. 3. ЧВМ системы Энона (406 пакетов): ось Y – номера частот, ось X – временная развертка

Если гипотеза гиперболичности АКФ эмпирически доказана, то появляется еще одно свойство – масштабная инвариантность. Сами АКФ обладают устойчивой осцилляторной нерегулярной структурой скорее хаотического типа, чем стохастического. Рис. 4 получен для системы Энона, для которой характерны сценарии динамического хаоса. Любопытно взглянуть на АКФ модельных систем квазистохастической природы. Они показаны на рис. 5-7.

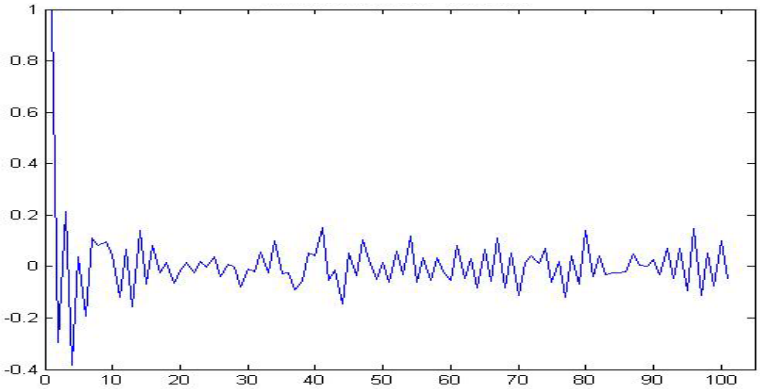

Рис. 4. АКФ ЧВМ системы Энона

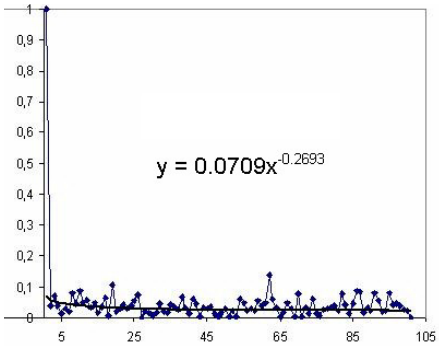

Рис. 5. Аппроксимация АКФ эксперимента 1

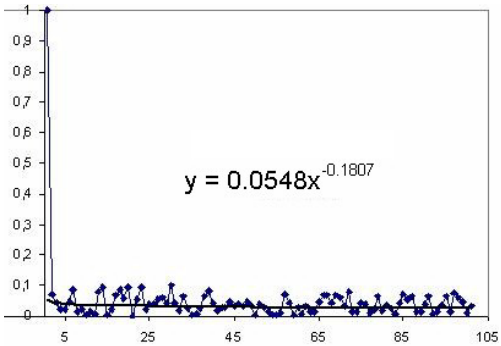

Рис. 6. Аппроксимация АКФ эксперимента 2

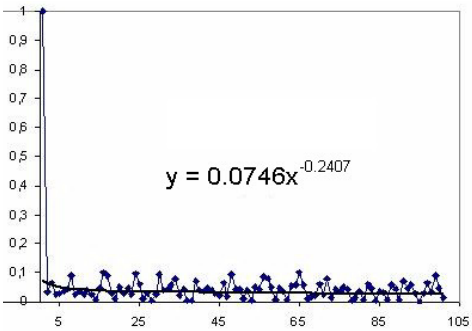

Рис. 7. Аппроксимация АКФ эксперимента 3

Стоит подчеркнуть, что аппроксимации получены для модулей АКФ. И для квазистохастических моделей АКФ имеет очень малую «дисперсию», неустранимые осцилляции, видимо, шумовой природы. И для этих случаев также выполняется степенная зависимость усредненной АКФ. Следовательно, и для этих систем мы имеем дело с гиперболической АКФ. Это тоже дальнодействующие АКФ, согласно показателям рис. 5-7. Тонким моментом на этом классе численных экспериментов является минимальный критический показатель для 2-го эксперимента (сигнум-манипуляция). И еще одно существенное отличие – в том, что критические показатели РЧ-трафика JTIDS и Энона довольно высоки по сравнению с квазистохастическими моделями. Любопытным обстоятельством является тот момент, что два совершенно разных класса эфирной апростериорной динамики – нелинейная хаотическая система и квазистохастические модели – принадлежат одному классу АКФ. Все пять систем подчиняются гиперболической АКФ с дальнодействующими корреляциями. Тогда следует признать, что все системы фрактальны, хотя характер фрактальности может быть различен. Видимо, эксперименты 1-3 можно отнести к так называемым квазистохастическим фракталам, а модель Энона – к хаотическим фракталам.

Сосредоточимся на оценках фрактальных характеристик. В нашем случае действует следующая формула:

$$\tilde{K}(\tau) = \frac{1}{\tau^{\gamma}} = \frac{1}{\tau^{Д - d_{fr}}},$$

где Д – топологическая размерность ЧВМ, равная 2.

Неизвестной характеристикой является фрактальная размерность d_{fr}, которая определяется через критический индекс γ АКФ ЧВМ. Есть смысл собрать эти данные в таблицу. По γ нам удается дать *оценки* d_{fr}. Именно оценки, а не конкретные виды в смысле Хаусдорфа–Безиковича, информационной, корреляционной размерностей [9].

В нашей предыдущей работе [4] для 11 сеансов JTIDS была получена оценка, близкая к нашему критическому индексу. Но она была получена совершенно иным способом. Из табл. 1 видно, что d_{fr} Энона – 1,38, что сравнительно близко к литературным данным [9].

Таблица 1

Критические индексы и фрактальные размерности АКФ ЧВМ

	γ	d_{fr}
Трафик JTIDS	0,466	1,54
Эксперимент 1	0,27	1,73
Эксперимент 2	0,181	1,82
Эксперимент 3	0,241	1,759
Система Энона	0,617	1,383

В какой-то мере модель Энона разумно считать тестовой, так как она досконально изучена во многих работах. Хуже положение с квазистохастическими моделями, но есть ряд работ, в которых модель Энона изучается со стохастическими добавлениями. Главный вывод данной работы состоит в том, что характер динамики эксплуатации РЧ-эфира в системе JTIDS фрактален. При этом не стоит путать такой вывод с имеющимися работами о фрактальности пакетного трафика в сетях [10]. Видимо придется признать, что эффект «звенящих частот» [5] невозможно будет понять без привлечения фрактальной теории. Апостериорная динамика РЧ-эфира в системе JTIDS существенно фрактальна, но указать ее место в машинных экспериментах, используемых нами, пока затруднительно. Дальнейшие исследования должны вестись непосредственно во фрактальном русле функционирования JTIDS, именно на этом пути должно быть получено как минимум три вида фрактальных характеристик по известным методикам [9]. Имеется в виду расчет фрактальных размерностей в смысле Хаусдорфа–Безиковича, информационной, корреляционной и др.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Kopp C.* Network Centric Warfare Fundamentals.// Defense Today, pp. 34-38, June 2005. – http: // www.ausairpower.net/DT-NCW-2-0705.pdf, http://www.ausairpower.net/NCW-101-3.pdf.
2. Introduction to Tactical Digital Information Link J and quick reference guide. – www.adtdl.army.mil/tadilj.pdf.
3. *Chi-Han Kao.* Performance Analysis of a JTIDS/LINK-16-Type Waveform Transmitted Over Slow, Flat Nakagami Fading Channels In the Presence of Narrowband Interference. – http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA494084&Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf.
4. *Пащенко М.С., Гряник В.Н., Перерва Л.М., Юдин В.В.* Корреляционно-спектральная структура эксплуатации частотного ресурса в объединенной системе распределения тактической информации ВМС США // Проблемы и методы разработки и эксплуатации ВиВТ ВМФ: Сборник научных трудов ТОВМИ им. С.О. Макарова. – Владивосток, 2009. Вып. 69. – С. 225-233.
5. *Гряник В.Н.* Теоретические основы обеспечения связи на морских декаметровых радиолиниях: автореферат дисс. на соиск. уч. степени д-ра техн. наук. – Владивосток: ВГУЭС, 2007. – 36 с.
6. *Борисов В.И.* Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты. – М.: Радио и связь, 2000. – 384 с.

7. *Юдин В.В., Любченко Е.А., Писаренко Т.А.* Информодинамика сетевых структур. Вероятность. Древесные графы. Фракталы: Учеб. пособие. – Владивосток: Изд-во Дальневосточного университета, 2003. – 244 с.
8. *Дженкинс Г., Ваттс Д.* Спектральный анализ и его приложения. Вып. 1. – М.: Мир, 1971. – 320 с.
9. *Перерва Л.М., Юдин В.В.* Методы фрактальной геометрии в исследовании нанотехнологий. Учеб. пособие. – Владивосток: Изд-во Дальневосточного университета, 2009. – 288 с.
10. *Городецкий А.Я., Заборовский В.С.* Информатика. Фрактальные процессы в компьютерных сетях: Учеб. пособие. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000. – 102 с.

Юдин Виталий Витальевич
Дальневосточный государственный университет.
E-mail: yudinvv@mail.ru.
690950, г. Владивосток, ул. Суханова, 8.
Тел.: 84232314237.

Перерва Лариса Михайловна
E-mail: lpererva@offs.dvgu.ru.
Тел.: 84232436508.

Титов Павел Леонидович
E-mail: t-p-l@inbox.ru.
Тел.: 89024896675.

Пащенко Михаил Сергеевич
Тихоокеанский военно-морской институт имени С.О. Макарова.
690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6.
E-mail: nik1316@yandex.ru.
Тел.: 89147007443.

Гряник Владимир Николаевич
Владивостокский государственный университет экономики и сервиса.
690990, г. Владивосток, ул. Гоголя, 41.
E-mail: vladimir.gryanikvg@vvsu.ru.
Тел.: 84232256993.

Yudin Vitaliy Vitalyevich
Far Eastern National University.
E-mail: yudinvv@mail.ru.
8, Sukhanova st., Vladivostok, 690950, Russia.
Phone: 84232314237.

Pererva Larisa Mikhailovna
E-mail: lpererva@offs.dvgu.ru.
Phone: 84232436508.

Titov Pavel Leonidovich
E-mail: t-p-l@inbox.ru.
Phone: 89024896675.

Paschenko Mikhail Sergeevich
S.O. Makarov Pacific Navy Institute.
6, Kamskiy lane, Vladivostok, 690062, Russia.
E-mail: nik1316@yandex.ru.
Phone: 89147007443.

Gryanik Vladimir Nikolaevich
Vladivostok State University of Economics and Service.
41, Gogolya st., Vladivostok, 690990, Russia.
E-mail: vladimir.gryanikvg@vvsu.ru.
Phone: 84232256993.