



УДК 621.396.49

© В. В. Юдин, Л. М. Перерва, В. Г. Золотых, М. С. Пащенко, П. Л. Титов,
2010

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭКСПЛУАТАЦИИ ЧАСТОТНОГО РЕСУРСА СИСТЕМЫ С ПСЕВДОСЛУЧАЙНОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ

Юдин В. В. – д-р физ.-мат. наук, проф. кафедры «Физические основы технологий информационных сред», тел.: 8 (4232) 31-42-37, e-mail: yudinvv@mail.ru (ДВГУ); *Перерва Л. М.* – канд. физ.-мат. наук, доц. кафедры «Физические основы технологий информационных сред», тел.: 8 (4232) 43-65-08, e-mail: lpererwa@offs.dvgu.ru (ДВГУ); *Золотых В. Г.* – асп. кафедры «Боевое применение средств связи», тел.: 8-964-430-78-47, e-mail: slzol@mail.ru (ТОВМИ); *Пащенко М. С.* – асп. кафедры «Боевое применение средств связи», тел.: 8-914-700-74-43, e-mail: nik1316@yandex.ru (ТОВМИ); *Титов П. Л.* – вед. инж.-прогр. кафедры «Физические основы технологий информационных сред», тел.: 8-902-489-66-75, e-mail: t-p-l@inbox.ru (ДВГУ)

В работе произведена оценка неоднородности эксплуатации частотного ресурса в системе с ППРЧ. Проведены три квазистохастических численных эксперимента с различным числом квазидатчиков. В моделях применялась временная манипуляция: равномерная и по распределению Ципфа-Парето-Мандельброта. Для сравнительной идентификации структуры неоднородности рассмотрена хаотическая модель – отображение Энона.

This article demonstrates the estimation of irregularity of frequency resource exploitation by the frequency hopping system. Three quasistochastic numerical experiments with different number of pseudorandom number generators were made. Uniform and Zipf-Pareto-Mandelbrot distribution time manipulation were used in these experiments. For comparative irregularity structure identification the chaotic model - Henon map was considered.

Ключевые слова: псевдослучайная перестройка рабочей частоты (ППРЧ), частотно-временная матрица (ЧВМ), стохастика, хаос, квазидатчик.

Основная концепция разработки систем с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ) предполагает наряду с соответствующим кодированием, криптозащитой, функционирование квазидатчиков с соответствующими параметрами, которые отражаются в вероятностной структуре частотно-временной матрицы (ЧВМ). Основным принципом предполагается, что в среднем все множество рабочих частот (РЧ) будет использоваться равновероятно. Нами рассматривалась одна из систем с применением ППРЧ. Этой системе от-

ведена всего 51 РЧ, а число пользователей виртуально может достигать десятков тысяч. Отсюда следует, что РЧ – ресурс весьма ценный и дефицитный. Именно ограниченность ресурса и огромное число пользователей, которое на 2–3 порядка превосходит сам частотный ресурс, и потребовала сверхбыстрой ППРЧ. В системе предложено большое число математических методов, технических приемов, обеспечивающих многомерную ортогонализацию ЧВМ. Временной внутренней масштаб стандартного временного интервала (СВИ) микросекундного уровня, что и обеспечивает чрезвычайно малое пребывание корреспондента на фиксированной РЧ. Как правило, считается, что если надо вскрыть стратегию функционирования ППРЧ, то при этом необходимо установить параметризацию квазидатчиков. Схема временных масштабов системы с ППРЧ нашла свое отражение в литературе [1, 2].

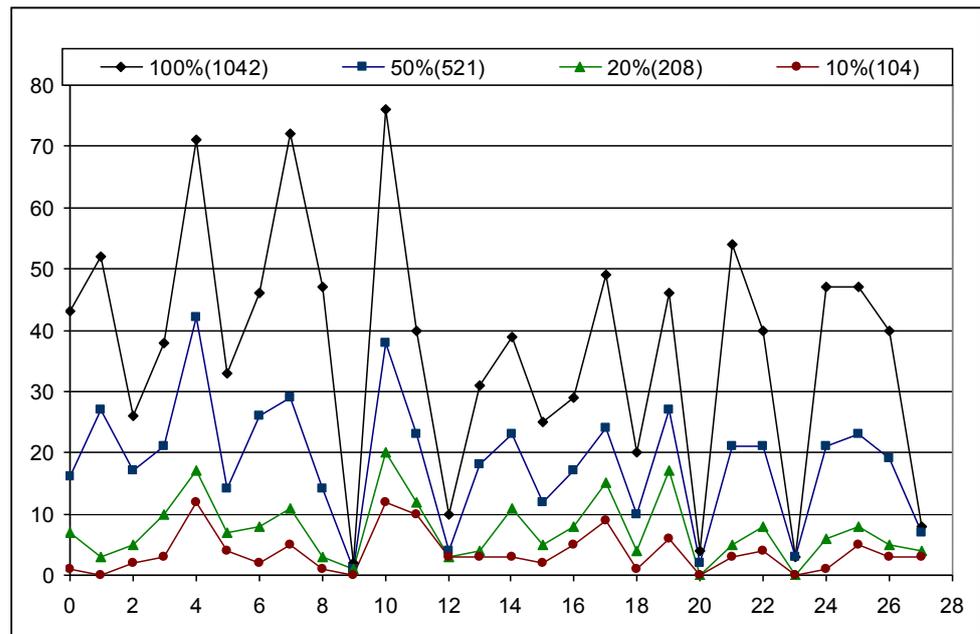


Рис. 1. Функция распределения эксплуатации частот для сеансов 1-8

Данная система имеет фактически шесть уровней различных шкал времен. На уровне микросекунд (13 мкс) собственно и работает система ППРЧ [3, 4]. В задачах радиоэлектронной борьбы (РЭБ) имеется в виду как раз поражение пятого и шестого уровней. Однако, с точки зрения самой конструкции систем ППРЧ, если неизвестна параметризация квазидатчика, то попытки отследить сверхбыстрые переключения будут лимитироваться не только техническими возможностями самой системы РЭБ, но и принципиальной невозможностью подавить систему ППРЧ, если не рассматривать прямые заградительные помехи. Последние чрезвычайно энергетически невыгодны.



Обычно бытует точка зрения, что без определения стратегии функционирования квазидатчиков нет возможности борьбы с системами ППРЧ. В наших предыдущих исследованиях было обнаружено, что трафик эксплуатации РЧ ресурса, который звучит в эфире, имеет четкую модальную структуру. Ее не удастся аппроксимировать в среднем равномерным распределением. В частности, на рис. 1 приведено модальное распределение эксплуатации РЧ в системе с ППРЧ, состоящей из восьми сеансов.

Уже на качественном уровне видна сильная вариабельность мод. Как правило, выделяются две группировки сильных и более слабых мод. Их общее число не более десяти. Такой эффект мы назвали «звонящими» частотами. Но что более важно, есть почти «молчащие» частоты. Это обстоятельство еще более усугубляет существенную неравномерность эксплуатационного трафика. Следует подчеркнуть, что эффект «звонящих» частот [5] обнаружен в апостериорном интегральном трафике присвоения РЧ пользователями. Нами были найдены очень ценные свойства такой модальной структуры. Например, модальная структура формируется даже на малых апертурах и даже более того, эффект модальной структуры наблюдается на разных подсетях при передаче различных видов информации. Для того чтобы найти конструктивный сценарий, объясняющий модальную структуру функционирования системы с ППРЧ, был предложен ряд экспериментов.

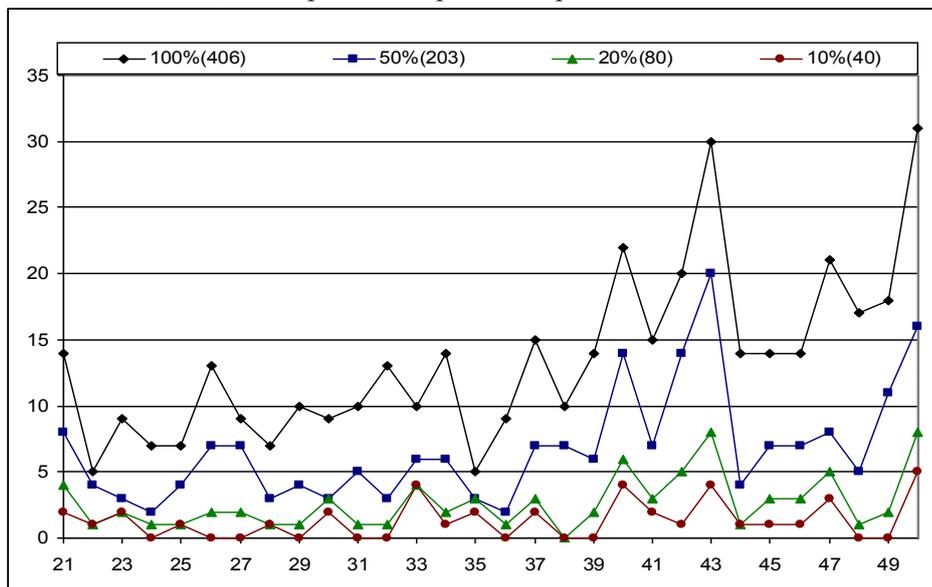


Рис. 2. Функция распределения эксплуатации частот для модели Энона

В одном из них была взята хаотическая модель – отображение Энона, которая хорошо изучена в литературе [6, 7]. Это классический объект динамического хаоса с минимальной квадратичной нелинейностью. Главное, в таких системах нет никакой стохастичности. Нами выдвигается гипотеза, что модальная

структура Энона будет в некотором смысле близка таковой для выбранной системы с ППРЧ. Систему Энона привели к краевым и граничным условиям наших сеансов системы с ППРЧ, ее соответствующая структура показана на рис. 2.

Сравнивая рис. 1 и 2, можно фактически отметить те же самые особенности. Также видна устойчивость по отношению к длине апертуры сеанса. Однако для системы ППРЧ высокоинтенсивные моды присутствуют на начальных частотах (рис. 1), а в системе Энона они приходятся на верхнюю часть спектра (рис. 2). Обе функции распределения вероятностей эксплуатации РЧ ресурса в качественном смысле совершенно идентичны, поэтому можно высказать гипотезу, что элемент хаотичности, а не стохастичности присутствует в трафике системы с ППРЧ.

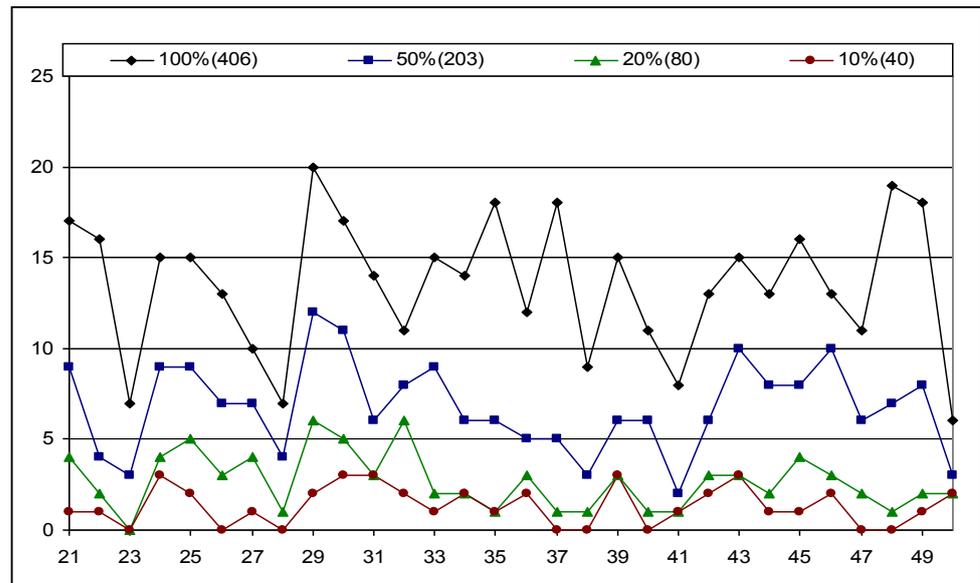


Рис. 3. Функция распределения эксплуатации частот для эксперимента № 1

Были взяты следующие три модели, которые имеют существенную квазистохастическую компоненту: эксперименты № 1–3. Они также были приведены к параметрам реального трафика. Модальная структура экспериментов № 1–3 показана на рис. 3–5.

Следует вкратце описать эксперименты № 1–3, в которых присутствует квазистохастика, но в явном виде не содержится нелинейности и хаотичности. Эксперимент № 1 сформирован одним квазидатчиком. Эксперимент № 2 представляет собой результат sign-манипуляции, работу 11 квазидатчиков при одинаковом времени их функционирования. В эксперименте № 3 применяется временная манипуляция распределением во времени зависимостью Ципфа-Парето-Мандельброта (ЦПМ). Все три квазистохастических экспери-



мента моделируют возможную динамику эксплуатации РЧ ресурса некоторыми системами. Эксперименты № 1–3 отличаются также высокой вариабельностью, но она в целом одинакова для всех групп мод, и в принципе допускает среднее равномерное распределение.

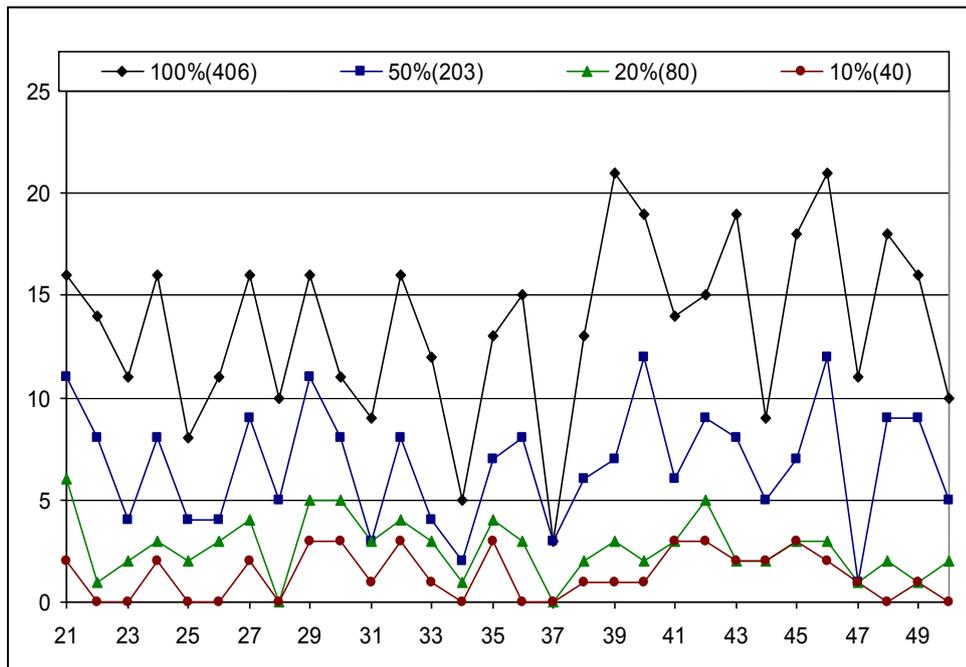


Рис. 4. Функция распределения эксплуатации частот для эксперимента № 2

Однако чтобы провести количественное сравнительное исследование всех четырех предложенных систем, необходимо выдвинуть соответствующую количественную методику оценки степени неравномерности апостериорной интегральной ЧВМ. Для этого мы решили предложить некоторую так называемую Лебеговскую процедуру [7], которая базируется на квантовании Y -оси.

Вкратце суть ее следующая: рассматриваются тела мод и подсчитывается число попаданий в соответствующие полосы или окончания выделенных мод. В табл. 1, 2 собраны результаты этой процедуры и проведены статистические операции. Оказалось, что степень неравномерности квазистохастических экспериментов № 1–3 равна нулю, т. е. эти функции распределения допускают равномерную интерпретацию. Для эксперимента Энона степень отклонения от равномерности достигает 53 %.

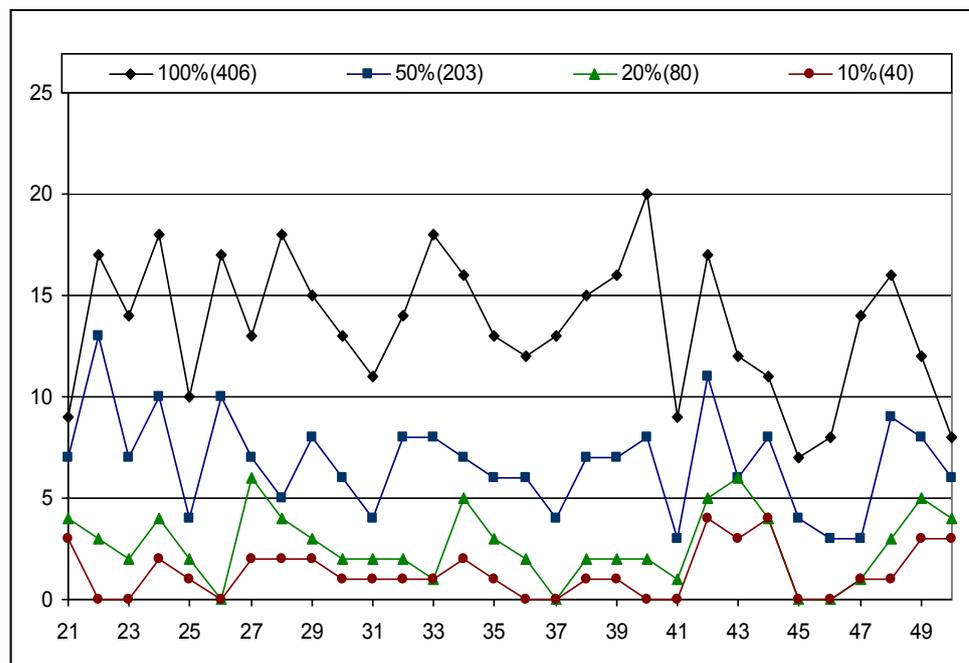


Рис. 5. Функция распределения эксплуатации частот для эксперимента № 3

Для сеансов № 1–8 системы с ППРЧ – 35 %, а для сеансов 1–11 – 40 %. Все это говорит о том, что квазистохастические эксперименты, как бы они ни были правдоподобны в плане моделирования работы систем с ППРЧ, модальной структурой не обладают, поскольку наследуют статистическую структуру квазидатчиков. Но с другой стороны, если придерживаться априорных принципов проектирования систем ППРЧ, то это как раз указывает, что если в них используются квазистохастические датчики, то распределение частотной загрузки будет действительно равномерным в среднем (см. рис. 3–5).

Но наши эксперименты по оценке распределения загрузки апостериорной интегральной ЧВМ существенно модальны и сильно отличаются от равномерного распределения эксплуатации РЧ.

Проведенное исследование показывает, что одни квазистохастические принципы, сколь бы явно они ни были объявлены разработчиками систем ППРЧ, не являются единственными в эффекте «звонящих» частот. Видимо, эти системы в принципе обладают еще какой-то другой стратегией функционирования, которая приводит к сильной модальной структуре эксплуатационного спектра. Из перечисленного класса моделей можно сделать вывод, что эта компонента сценария функционирования ППРЧ, видимо, не квазистохастического, а хаотического характера.



Таблица 1

Результаты применения Лебеговской процедуры для экспериментов № 1–3

| № полосы | Эксперимент № 1 | | Эксперимент № 2 | | Эксперимент № 3 | |
|------------------------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| | n_i | $ n_i - \bar{n} $ | n_i | $ n_i - \bar{n} $ | n_i | $ n_i - \bar{n} $ |
| 20-15 | 10 | 0 | 10 | 0 | 8 | 0 |
| 15-10 | 10 | 0 | 10 | 0 | 8 | 0 |
| 10-5 | 10 | 0 | 10 | 0 | 8 | 0 |
| 5-0 | 10 | 0 | 10 | 0 | 8 | 0 |
| Результаты вычислений | | | | | | |
| $\sum n_i$ | 40 | | 40 | | 32 | |
| \bar{n} | 10 | | 10 | | 8 | |
| $\sum n_i - \bar{n} $ | 0 | | 0 | | 0 | |
| $\eta\%$ | 0 | | 0 | | 0 | |

Таблица 2

Результаты применения Лебеговской процедуры для реального трафика
системы с ППРЧ и модели Энона

| № полосы | Сеанс 1–8 | | Сеанс 1–11 | | Энон | |
|------------------------|-----------|-------------------|------------|-------------------|-------|-------------------|
| | n_i | $ n_i - \bar{n} $ | n_i | $ n_i - \bar{n} $ | n_i | $ n_i - \bar{n} $ |
| 80-70 | 3 | 3.875 | - | - | - | - |
| 70-60 | 3 | 3.875 | - | - | - | - |
| 60-50 | 5 | 1.875 | - | - | - | - |
| 50-40 | 8 | 1.125 | 2 | 3 | - | - |
| 40-30 | 9 | 2.125 | 4 | 1 | 2 | 4 |
| 30-20 | 9 | 2.125 | 4 | 1 | 4 | 2 |
| 20-10 | 9 | 2.125 | 7 | 2 | 9 | 3 |
| 10-0 | 9 | 2.125 | 8 | 3 | 11 | 5 |
| Результаты вычислений | | | | | | |
| $\sum n_i$ | 55 | | 25 | | 26 | |
| \bar{n} | 6.875 | | 5 | | 6 | |
| $\sum n_i - \bar{n} $ | 19.25 | | 10 | | 14 | |
| $\eta\%$ | 35 | | 40 | | 53 | |



Выводы

Выявленная структура «звонящих» частот обладает рядом фундаментальных свойств. Одно из этих свойств состоит в апертурной устойчивости модальной структуры, что может способствовать более эффективной организации РЭБ.

Если система противодействия обладает адаптивным характером, то выявленная структурная устойчивость поможет установить на ранних этапах усеченное множество РЧ, подлежащих атаке на больших апертурах сеансов.

Кроме того, еще одним направлением РЭБ являлось бы блокирование «молчащих» частот.

Другим важным свойством является инвариантность модальной структуры к характеру радиообмена. Тем самым эффект звонящих частот является эманентным свойством любой ППРЧ, апостериорно проявляющаяся в эфире.

Результаты вычислительного эксперимента показали, что по своему характеру распределение мод функционирования систем ППРЧ занимает промежуточное положение между системами Энона, Икеда, с одной стороны, и чисто стохастическими системами, с другой.

Модальная структура систем ППРЧ скорее всего обладает хаотическими чертами функционирования, а не квазистохастическими.

Все вышеуказанные свойства обнаруженного эффекта приводят к снижению помехозащищенности радиолиний с ППРЧ, несмотря на сверхбыструю смену РЧ.

Знание спектра «звонящих» частот позволяет не решать задачу параметризации квазидатчиков системы ППРЧ.

Библиографические ссылки

1. *Introduction to Tactical Digital Information Link J and quick reference guide.* – www.adtdl.army.mil/tadilj.pdf
2. *Simulation Interoperability Standards Organization (SISO) Standard for: LINK 16 SIMULATIONS SISO-STD-002-2006,* – http://www.sisostds.org/index.php?tg=fileman&idx=get&id=36&gr=Y&path=&file=siso_std_002_June_2006.pdf
3. *Владимиров В. И., Лихачев В. П., Шляхин В. М.* Антагонистический конфликт радиоэлектронных систем. Методы и математические модели. М., 2004.
4. *Никитин В. С., Моисеев Н. И.* Перспективные корабельные системы прямой радиосвязи. СПб., 2004.
5. *Перерва Л. М., Юдин В. В.* Методы фрактальной геометрии в исследовании нанотехнологий. Владивосток, 2009.
6. *Юдин В. В., Любченко Е. А., Писаренко Т. А.* Информодинамика сетевых структур. Вероятность. Древесные графы. Фракталы. Владивосток, 2003.