



УДК 681.3: 658.56.

Ю.Г. Даник¹, **Ю.А. Кулаков**², доктора техн. наук,
В.В. Воротников¹, канд. техн. наук

¹ Житомирский военный институт им. С.П. Королева
Национального авиационного университета
(Украина, 10004, Житомир, пр. Победы, 22),

² Национальный технический ун-т Украины
«Киевский политехнический ин-т»
(Украина, 03056, г. Киев, ул. Политехническая, 16, корпус 18,
тел. (044) 4549292, e-mail: ya.kulakov@gmail.com)

Фрактальные свойства маршрутов передачи данных в перколяционном кластере масштабно-инвариантной сети

Исследованы перколяционные топологические структуры сложных сетей и выполнена их трансформация во фрактальные макроструктуры. Приведен пример расчета фрактальной размерности маршрута передачи данных в масштабно-инвариантной сети в интервале граничных значений фазового перехода между состояниями «максимальный кластер» и «сеть состоит из нескольких кластеров». Исследована зависимость фрактальной размерности перколяционного кластера от величины стороны квадрата δ -покрытия и значения проводимости сложной сети для определения числа факторов, влияющих на систему.

Досліджено перколяційні топологічні структури складних мереж і виконано їх трансформацію у фрактальні макроструктури. Наведено приклад розрахунку фрактальної розмірності маршруту передачі даних у масштабно-інваріантній мережі в інтервалі граничних значень фазового переходу між станами «максимальний кластер» і «мережа складається з декількох кластерів». Досліджено залежність фрактальної розмірності перколяційного кластера від величини сторони квадрата δ -покриття і значення провідності складної мережі для визначення кількості чинників, що впливають на систему.

К л ю ч е в ы е с л о в а: сложная сеть, масштабно-инвариантная сеть, теория перколяции, перколяционный кластер, фазовый переход, фрактальная размерность.

Одним из перспективных направлений моделирования сложных сетей является использование метода мультифрактальной динамики. В настоящее время разработаны фрактальные модели для решения многих задач [1—3]. Модели таких систем основаны на описании динамики процессов, представленных мультифрактальными кривыми. При этом весь промежуток времени наблюдения разбивается на интервалы с определенными зна-

© Ю.Г. Даник, Ю.А. Кулаков, В.В. Воротников, 2013

чениями линейного тренда, характеризующего тенденцию изменения исследуемой величины. На каждом интервале для значений временного ряда определяется фрактальная размерность d и устанавливается зависимость тангенса угла наклона линейного тренда и фрактальной размерности исследуемых кривых. В таких моделях учитываются параметры, характеризующие устойчивость систем и протекающих в них процессов.

В построении фракталов обычно участвуют несколько структур, состоящих из различного числа элементов. Размеры элементов структур также различны. Если представить сложную сеть в виде фракталов с циклически повторяющимися структурами, то задача моделирования их структуры сводится к определению момента фазового перехода диссипативных топологических структур сети с последующим созданием модельных объектов с фрактальной структурой и изучением их геометрических характеристик.

Обзор последних публикаций. Анализ современной научной литературы по данной тематике свидетельствует о том, что для описания процессов, протекающих в телекоммуникационных сетях (ТКС), используются обнаруженные на практике свойства самоподобия или масштабной инвариантности статистических характеристик. Эти свойства связывают с особым классом физических процессов — фрактальными процессами. В связи с этим особое внимание привлекают конструктивные методы исследования фрактальности применительно к современным компьютерным приложениям с учетом влияния на характер формирования управляющих воздействий при функционировании сложной ТКС.

В работе [4] рассмотрено решение задачи дистанционного зондирования Земли кластерами простых наноспутников, объединенных в сеть. Анализируются свойства больших случайных кластеров объектов, образующих «сложную сеть». Введено понятие управляемой перколяции зоны обслуживания, реализуемой в две фазы: на первой — создается стохастическая основа с относительно небольшой концентрацией наноспутников, которая не обеспечивает стохастической перколяции, а на второй — в межкластерные интервалы оптимально вводятся дополнительные наноспутники для получения кратчайшего перколяционного пути через стохастически образованные кластеры.

В работе [5] рассмотрена задача самоорганизации в беспроводных сенсорных сетях и предложены алгоритмы ее решения. Определено время самоорганизации сети при использовании узкополосных и сверхширокополосных сигналов в рамках стандарта IEEE 802.15.4.

Работа [6] посвящена изучению сложных систем, рассматриваемых как сетевые структуры. Узлы в таких сетях представляют собой элементы сложных систем, а связи между узлами — взаимодействия между элемен-

тами. Приведены основные понятия теории сложных сетей и кратко описаны основные направления изучения реальных сетевых структур.

В работе [7] рассмотрен новый класс случайных графов для моделирования функционирования сети во времени. Предполагается, что наблюдения за сетью ведутся с помощью «оконного» метода. С целью выявления аномалий исследовано нормальное поведение степеней, которые можно наблюдать в «окнах» рассматриваемой модели. Исследована асимптотика максимальной степени вершин в графе, который порожден «окном» данного размера.

В работе [8] предложена концептуальная модель диагностической инфраструктуры с интеллектуальными свойствами, которая является ядром административной службы ТКС, обеспечивающим тестовое, функциональное диагностирование модулей и восстановление работоспособности системы обработки данных посредством реконфигурации структуры ТКС.

В работе [9] рассмотрен вопрос сокращения расходов на лавинную рассылку данных в динамических сетях с помощью механизма «перколяционной лавины». Установлено соотношение между порогом перколяции в классическом (статическом) и динамическом случаях через интегральную статистическую характеристику — среднюю вероятность активности связей.

Таким образом, сложность экспериментальных исследований перколяционных и фрактальных структур связана не только с трудностями при их формировании. Существуют проблемы с локализацией и определением таких структур, так как они не обладают выраженными резонансными свойствами. В приведенной литературе определение фрактальных свойств процессов проводилось лишь для анализа одной системы. Результаты проверки свойства самоподобия одних подсистем (подпроцессов) в рамках других фрактальных систем (процессов) в литературе не приведены.

В связи с этим представляется актуальной формализация задачи и разработка математического аппарата разделения сложной сети, обладающей масштабно-инвариантными свойствами, на перколяционные кластеры с последующим построением маршрута передачи данных между узлами ТКС и его проверкой на свойство самоподобия для предсказания поведения сложной сети в целом.

Понятие сложной сети. Под сложными сетями подразумеваются системы, состоящие из реальных объектов и связей между ними [2]. Сложная сеть моделируется графом, однако этот граф, как правило, имеет определенную структуру и обладает характерными признаками. Такие сети принято называть безмасштабными или масштабно-инвариантными (scale-

free), поскольку средняя степень вершины в них не является характерной, т.е. отсутствует характерный масштаб. Например, для масштабно-инвариантной топологии телекоммуникационной сети характерно наличие малого числа хабов — вершин наибольшей степени — и большого числа вершин малой степени. Сложные сети имеют хорошо выраженную структуру естественных сообществ: вершины сети разделены на группы, которые слабо связаны между собой, но имеют большую плотность ребер внутри. При этом сложные сети глобально являются разреженными с числом ребер m , пропорциональным числу вершин n : $m = O(n)$.

Сложные сети характеризуются не просто большим числом узлов и путей между ними, а задачи исследования больших сетей не исчерпываются исследованиями их топологии и свойств каждого узла. Прежде всего, в сложных сетях исследуются совокупные свойства и их статистические феномены, в частности:

- статистические характеристики случайных структур;
- пути, проложенные по выбранным критериям качества;
- кластеры узлов (объектов), связанных по определенным условиям;
- статистические распределения узлов, связей, кластеров и трафиков.

Перколяционный фазовый переход в диссипативных структурах.

Один из развиваемых подходов исследования сложных сетей связан с моделью «протекания» по их ребрам (связям) информационных потоков. Теория перколяции позволяет решать задачи анализа сложных сетей в рамках этой модели. В целом, задача протекания информации через сложную сеть легко решается с использованием формулировок теории перколяции [1].

В такой постановке при определенной концентрации информации появляется вероятность нахождения транзитного узла в заданной области пространства стохастического перколяционного кластера, что позволяет решить в первом приближении поставленную задачу, т.е. определить число узлов в кластере.

Методы определения фрактальной размерности. В современной литературе используется несколько основных определений фрактальной размерности: усредненная поточечная размерность, корреляционная размерность и ляпуновская (информационная) размерность. В большинстве работ, где реально вычисляется фрактальная размерность, используется от 2000 до 20000 точек. Прямые алгоритмы, используемые для вычисления фрактальной размерности по N_0 точкам, обычно содержат N_0^2 операций и обладают большой вычислительной сложностью. Однако число операций можно уменьшить до $N_0 \ln(N_0)$ [2].

Описано несколько методов определения фрактальной размерности для временного ряда [1—3].

Первый — это классический клеточный способ, когда график накрывают серией сеток и определяют фрактальную размерность так же, как и для геометрических фракталов.

Второй способ предложен Б. Мандельбротом, исследован Г. Херстом и носит название *R/S*-метода [1, 3]. Он построен на анализе размаха параметра (наибольшего и наименьшего значений на изучаемом отрезке) и среднеквадратичного отклонения.

Третий способ основан на изменении длины кривой в зависимости от масштаба. Если кривая близка к фрактальной, то при уменьшении масштаба длина кривой будет возрастать по показательному закону.

Фрактальная размерность, в общем случае, является показателем сложности кривой. Анализируя чередование участков с различной фрактальной размерностью и воздействие на систему внешних и внутренних факторов, можно прогнозировать поведение системы, диагностировать и предсказывать нестабильное состояние. Существенным является наличие критического значения фрактальной размерности временной кривой, при приближении к которому система теряет устойчивость и переходит в нестабильное состояние. При этом параметры быстро возрастают либо убывают, в зависимости от тенденции, наблюдаемой в данное время [3].

Таким образом, фрактальная размерность определенной величины может быть использована как индикатор кризиса или «флаг» катастрофы. Кроме того, величина фрактальной размерности может являться индикатором числа факторов, влияющих на систему.

Постановка задачи. Задачу определения фрактальных свойств сложной ТКС необходимо разбить на два этапа.

На этапе I посредством увеличения (насыщения) узлов в кластере определяются граничные значения фазового перехода из состояния «сеть представляет максимальный кластер» в состояние «сеть состоит из нескольких кластеров» [2]. Основное свойство данного этапа — возможность передачи данных в сложной сети между любыми двумя узлами.

На этапе II для построенного маршрута передачи данных между узлами сложной сети определяется фрактальная размерность пути передачи данных для граничных значений фазового перехода. Этот этап позволяет оценить качество передачи данных в сложной сети.

Постановка задачи I этапа совпадает с постановкой задачи теории перколяции [1, 9]. Имеется решетка из связей или матрица, случайная относительная часть ячеек которой K — «черная», проводящая поток, а остальная часть — «белая», не проводящая поток. Необходимо найти минимальную концентрацию черных ячеек, при которой образуется сквозной путь по черным связям, или ячейкам через всю матрицу в заданном направлении.

Иными словами, требуется найти такую концентрацию Kn , при которой вся матрица будет проводящей. При достижении проводимости свойства такой сети качественно и скачком меняются: образуется безопасный путь (или разрушается), возникает (или затухает) эпидемия, воссоздается разрушенная социальная сеть, возникает пробка в дорожном движении и так далее. При этом концентрация K — доля черных узлов при случайном однородном заполнении решетки, или матрицы, — является вероятностью наличия черного объекта в ячейке матрицы [1, 3, 6].

Вычисление фрактальной размерности перколяционного кластера на практике осуществляется на основании корреляционной размерности:

$$d_c = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln C(\delta)}{\ln \delta}. \quad (1)$$

Здесь $C(\delta)$ — корреляционная функция, вычисляемая как отношение числа точек n , попарно расстояния между которыми меньше δ , к квадрату общего числа точек N ,

$$C(\delta) = n/N^2, \quad (2)$$

где δ — размер геометрической структуры, которой покрывается множество точек.

Расстояние между точками $P_1(x_1, y_1)$ и $P_2(x_2, y_2)$ определяется так:

$$r = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}. \quad (3)$$

Следовательно, сначала нужно подсчитать число точек n , расстояние между которыми не превышает $r \leq \delta$, где δ — задано, например, $\delta = 1, 2, 3, \dots$.

Постановка задачи II этапа в соответствии с результатами этапа I следующая.

Пусть есть множество G в евклидовом пространстве размерности d . Это множество покрывается кубиками размерности d , при этом длина ребра любого кубика не превышает некоторого значения δ , т.е. $\delta_i < \delta$. Введем зависящую от параметров d и δ сумму по всем элементам покрытия:

$$l_d(\delta) = \sum_i \delta_i^d.$$

Определим нижнюю границу этой суммы:

$$L_d(\delta) = \inf \sum_{i, \delta_i < \delta} \delta_i^d.$$

При уменьшении максимальной длины δ , если параметр d достаточно велик, будет выполняться условие $\lim_{\delta \rightarrow 0} L_d(\delta) \rightarrow 0$. При некотором

достаточно малом значении параметра d будет выполняться условие $\lim_{\delta \rightarrow 0} L_d(\delta) \rightarrow \infty$.

Промежуточное критическое значение d_x , для которого

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} L_d(\delta) = \begin{cases} 0, & d > d_x, \\ \infty, & d < d_x, \end{cases}$$

называют размерностью Хаусдорфа—Безиковича (или фрактальной размерностью) [1]. Для простых геометрических объектов размерность Хаусдорфа—Безиковича совпадает с топологической (для отрезка $d_x = 1$, для квадрата $d_x = 2$, для куба $d_x = 3$ и так далее.)

Несмотря на то что размерность Хаусдорфа—Безиковича с теоретической точки зрения определена безупречно, для реальных фрактальных объектов расчет этой размерности является весьма затруднительным. Поэтому введем несколько упрощенный показатель — емкостную размерность d_c . При определении этой размерности используются квадраты с гранями одинакового размера. В этом случае справедливо равенство $L_d(\delta) = N(\delta)\delta^{d_c}$, где $N(\delta)$ — число кубиков, покрывающих область G . Путем логарифмирования и перехода к пределу при уменьшении грани кубика $\delta \rightarrow 0$ получаем

$$d_c = -\lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log N(\delta)}{\log \delta},$$

если этот предел существует. Следует заметить, что в большинстве численных методов определения фрактальной размерности используется именно величина d_c . При этом необходимо учитывать, что всегда справедливо условие $d_x \leq d_c$. Для регулярных самоподобных фрактальных структур емкостная размерность и размерность Хаусдорфа—Безиковича совпадают. Поэтому их называют фрактальной размерностью объекта [4, 6].

Пример расчета фрактальной размерности перколяционного кластера сложной сети и проверка свойств самоподобия маршрута передачи данных. Пусть задана ячеистая топология сложной сети. Имитация формы и размеров ячейки топологии реальной сети не требуется. Модель имитирует связность узлов — объектов сети: объекты сети связаны, если соприкасаются сторонами квадрата — ячейки матрицы, в которой они находятся. При выполнении этих условий по мере возрастания концентрации черных ячеек образуются и растут кластеры связанных черных объектов — узлов.

Для определения фазового перехода в масштабно-инвариантной сети моделируем расчет фрактальной размерности совокупности множества узлов с помощью следующего алгоритма [1].

А л г о р и т м.

1. Генерируем последовательности равномерно распределенных величин.

2. Находим центр масс кластера. В случае двумерного измерения данных координаты центра масс определяем по формулам

$$x_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad y_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i,$$

где n — число узлов в кластере; (x_i, y_i) — координаты i -го узла.

3. Определяем число узлов кластера $m(L)$, находящихся внутри квадрата со стороной L и центром в центре масс кластера (x_c, y_c) .

4. Увеличиваем значение L в два раза и повторяем шаги 3, $4s$ раз, пока квадрат не покроет кластер полностью.

5. Строим зависимость $\ln m(L)$ от $\ln L$.

6. Вычисляем фрактальную размерность по методу наименьших квадратов [1]:

$$d_f = B = \frac{s \sum_{i=1}^s X_i Y_i - \sum_{i=1}^s X_i \sum_{i=1}^s Y_i}{\Delta}, \quad \delta d_f = \delta B = \frac{\sigma_B}{\sqrt{s}},$$

где $X_i = \ln L_i, Y_i = \ln m(L_i)$,

$$A = \frac{\sum_{i=1}^s X_i^2 \sum_{i=1}^s Y_i - \sum_{i=1}^s X_i \sum_{i=1}^s X_i Y_i}{\Delta}, \quad \sigma_B^2 = \frac{s \sigma_y^2}{\Delta},$$

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s (Y_i - A - B X_i)^2, \quad \Delta = s \sum_{i=1}^s X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^s X_i \right)^2.$$

7. Повторяем шаги 1—7 n раз с различными последовательностями случайных чисел.

8. Находим среднее значение фрактальной размерности.

На рис. 1 показаны варианты насыщения кластера узлами сети. Общее число узлов сложной сети разбито на кластеры. На рис. 1, а, сеть разбита на 400 кластеров, при этом наблюдаются пустые ячейки (кластеры не содержат узлов). На рис. 1, б, в, размер кластера увеличен. На рис. 1, г, сеть разбита на четыре кластера, которые заполнены узлами равномерно.

Моделирование процесса насыщения кластера узлами, по аналогии с понятием «протекаемости» в теории перколяции, соответствует процессу изменения состояния сети, в которой узлы в пределе ячейки становятся

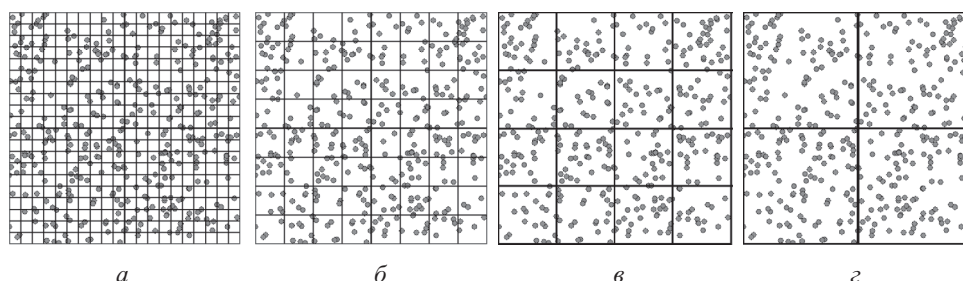


Рис. 1. Сложная сеть, состоящая из 400 кластеров (а), 64 кластеров (б), 16 кластеров (в) и четырех кластеров (г)

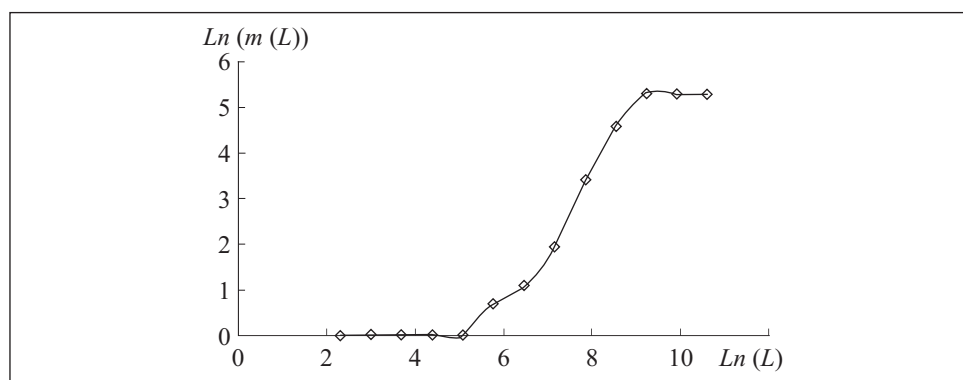


Рис. 2. Кривая фазового перехода

достигаемыми (сеть становится связной). И наоборот, при увеличении числа непроводящих ячеек в сложной системе происходит фазовый переход из состояния проводимости, когда сеть состоит из одного глобального связного кластера, в состояние непроводимости, когда сеть распадается на несколько кластеров.

На рис. 2 показана зависимость числа узлов (ячеек), включенных в кластер, от масштаба L . Как видно из этой зависимости, интерес представляет поведение сложной сети при критическом значении $\ln(L) \cong 5 \dots 9$. Именно в этот момент в сети скачкообразно изменяется свойство проводимости. На этом этапе определения перколяционного кластера заканчивается. Его результатом является определение граничных значений размеров кластеров, при которых сложная сеть сохраняет свою проводимость.

На следующем этапе анализируется геометрическая форма маршрута передачи данных между двумя случайными узлами A и B . Из рис. 3 видно, что по мере увеличения числа недоступных узлов в сети геометрически

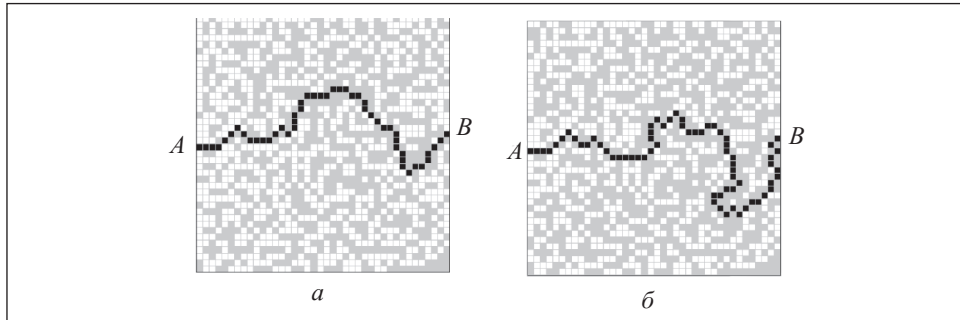


Рис. 3. Изменение проходимости сложной сети в зависимости от числа доступных узлов кластера: *a* — доступно 50 % узлов в сети, длина маршрута — 48 транзитов; *б* — доступно 40 % узлов в сети, длина маршрута — 66 транзитов

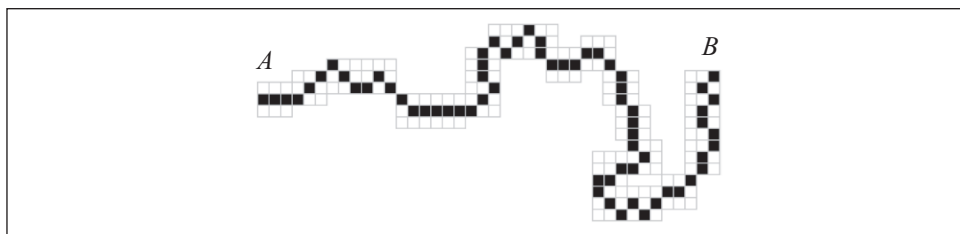


Рис. 4. Фрактальный характер пути распространения информации в перколяционном кластере сложной сети при граничном значении фазового перехода (см. рис. 3, б)

форма маршрута передачи данных между узлами *A* и *B* изменяется от линейного вида к нелинейному. Чем больше недоступных узлов в сети, тем «запутаннее» становится путь передачи данных между узлами, а при граничном значении фазового перехода маршрут имеет извилистый и изрезанный характер.

Маршрут протекания информации в сложной сети между источником *A* и адресатом *B* (рис. 4) имеет форму «береговой линии» [3, 4]. Для проверки свойств такого маршрута распространения информации в сети целесообразно определить его емкостную фрактальную размерность. Для этого используют следующий методический прием [2]. Пусть на некотором этапе покрытия фрактала пришлось использовать $N(\delta)$ квадратов с гранями размера δ , а на другом — $N(\delta')$ элементов с гранями размера δ' . Ввиду предполагаемой степенной зависимости справедливо следующее: $N(\delta) \cong 1/\delta^{d_c}$, $N(\delta') \cong 1/\delta'^{d_c}$, где значение $d_c(\delta/\delta')$ можно определить так:

$$d_c = -\frac{\log(N(\delta)/N(\delta'))}{\log(\delta/\delta')} \quad (4)$$

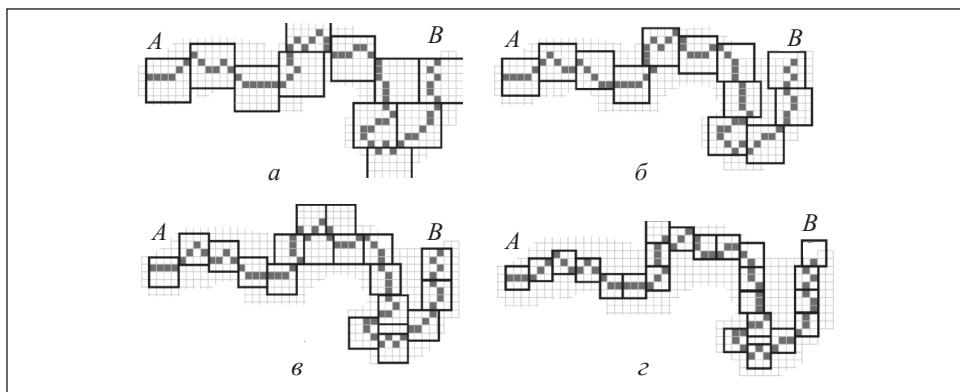


Рис. 5. Покрытие маршрута передачи данных квадратами со сторонами: $a - \delta=6$; $б - \delta=5$; $в - \delta=4$; $г - \delta=3$

В соответствии с (1)–(3), маршрут покрыт δ -покрытием со стороной квадрата $\delta = 3, 4, 5, 6$ (рис. 5) и рассчитано значение фрактальной размерности d_c . Для рассмотренного примера зависимость числа элементов покрытия от стороны квадрата следующая:

δ	8	7	6	5	4	3	2
$N(\delta)$	7	9	11	12	18	23	33

Изменение отношения δ/δ' из (4) для различных значений длины квадрата покрытия фрактала, $\delta' = \delta - i$, $i = 1, \dots, \delta$ приведено в таблице, где также приведены значения $N(\delta)/N(\delta')$ при различной длине квадрата покрытия фрактала $\delta' = \delta - i$, $i = 1, \dots, \delta$.

Полученные данные позволяют проследить динамику изменения фрактальной размерности маршрута передачи данных в зависимости от скорости изменения значения δ . Элементы покрытия могут быть интерпретированы как

δ	δ/δ'	$\log(\delta/\delta')$	$N(\delta)$	$N(\delta)/N(\delta')$	$\log(N(\delta)/N(\delta'))$
8	1	0	7	1	0
7	1,142857	-0,10914	9	0,777778	-0,10914
6	1,333333	-0,19629	11	0,636364	-0,19629
5	1,6	-0,23408	12	0,583333	-0,23408
4	2	-0,41017	18	0,388889	-0,41017
3	2,666667	-0,51663	23	0,304348	-0,51663
2	4	-0,67342	33	0,212121	-0,67342
1	8	-0,97445	66	0,106061	-0,97445

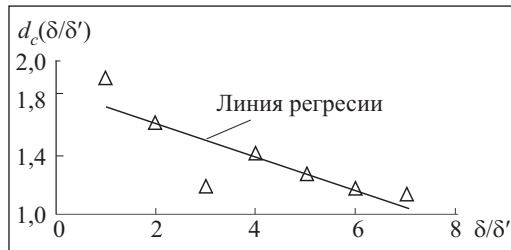


Рис. 6. Зависимость фрактальной размерности от значения δ/δ' , $\delta' = \delta - i$, $i = 1, \dots, \delta$

области кластеров в составе перколяционного кластера, в которые включаются транзитные узлы на момент передачи данных. Зависимость изменения значения фрактальной размерности маршрута от скорости изменения отношения δ/δ' приведена на рис. 6.

Анализ полученных результатов позволяет определить диапазон изменения отношения длин квадратов покрытия фрактала, при которых сохраняются свойства самоподобия, а это, по известным данным загруженности сети, позволяет определять участки маршрута, на которых наблюдаются перегрузки, и прогнозировать их длительность. Одним из возможных направлений практического применения полученных результатов может быть использование этой информации при разбиении узлов, включенных в маршрут, на кластеры.

Выводы

1. Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что у перколяционного кластера сложной сети проявляются свойства геометрического фрактала при уменьшении радиуса покрытия.

2. Анализируя чередование участков с различной фрактальной размерностью и то, как на систему воздействуют внешние и внутренние факторы, можно прогнозировать поведение системы, диагностировать и предсказывать ее нестабильное состояние.

3. При фрактальной размерности менее 1,4 на систему влияет одна или несколько сил,двигающих систему в одном направлении. Если размерность приблизительно 1,5, то силы, действующие на систему, разнонаправлены, но отчасти компенсируют одна другую, если фрактальная размерность значительно превышает 1,6, то система становится неустойчивой и готова перейти в новое состояние.

The topological percolation structures of complex networks have been studied, and their transformation into fractal macrostructures has been executed. The example of calculation of fractal dimension of the data transfer route is presented in a scale-invariant network in the interval of boundary values of phase transition between the states «a maximal cluster» and «network consists of a few clusters». The dependence of fractal dimension of percolation cluster on the size of δ -coverage square side and the values of conductivity of the complex network has been investigated for determining the number of factors, influencing the system.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарасевич Ю.Ю. Перколяция: теория, приложения, алгоритмы. — М.: УРСС, 2002. — 109 с.
2. Ландэ Д.В., Снарский А.А., Безсуднов И.В. Интернетика. Навигация в сложных сетях: модели и алгоритмы. — М.: Книжный дом «Либерком», 2009. — 264 с.
3. Додонов А.Г., Ландэ Д.В. Живучесть информационных систем. — Киев: Наук. думка, 2011. — 256 с.
4. Мостовой Я.А. Двухфазные операции в больших сетях наноспутников // Компьютерная оптика. — 2013. — 37, № 1. — С. 129—139.
5. Юркин В.Ю., Мохсени Т.И. Иерархические подходы к самоорганизации в беспроводных сверхширокополосных сенсорных сетях на основе хаотических радиоимпульсов // Труды МФТИ. — 2012. — 4, № 3. — С. 151—161.
6. Евин И.А. Введение в теорию сложных сетей//Компьютерные исследования и моделирование. — 2010. — 2, № 2. — С. 121—141.
7. Грушо А.А., Тимонина Е.Е. Модель случайных графов для описания взаимодействий в сети//Информатика и ее применения. — 2012. — 6, вып. 4. — С. 57—60
8. Карпенко С.Г., Коваленко М.А., Мирошник М.А., Панченко С.В. Подход к проектированию компьютерных сетей с интеллектуальной диагностической инфраструктурой // ИТКС. — 2011. — № 6.— С. 51—59.
9. Голубев А.С., Звягин М.Ю., Милованов Д.С. Эффект перколяции в информационных сетях с неустойчивыми связями. Информационные технологии // Вестн. Нижегородского ун-та им. Н.И. Лобачевского. — 2011. — № 3 (2). — С. 260—263.

Поступила 02.07.13

ДАНИК Юрий Григорьевич, Заслуженный деятель науки и техники Украины, Лауреат государственной премии в сфере науки и техники, д-р техн. наук, профессор, начальник Житомирского военного ин-та им. С.П. Королева Национального авиационного университета. В 1987 г. окончил Житомирское военное училище радиоэлектроники. Область научных исследований — кибернетические системы.

КУЛАКОВ Юрий Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры вычислительной техники факультета информатики и вычислительной техники Национального технического университета Украины «КПИ». В 1971 г. окончил Киевский политехнический ин-т. Область научных исследований — сверхпроизводительные вычислительные сети и системы.

ВОРОТНИКОВ Владимир Владимирович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автоматизированных систем управления факультета геоинформационных и космических систем Житомирского военного ин-та им. С.П. Королева Национального авиационного университета. В 1994 г. окончил Житомирское военное училище радиоэлектроники. Область научных исследований — моделирование сложных информационных систем.

