

УДК629.78+519.876.5

УПРАВЛЯЕМАЯ ПЕРКОЛЯЦИЯ И ОПТИМАЛЬНЫЕ ДВУХФАЗНЫЕ ОПЕРАЦИИ В БОЛЬШИХ СЕТЯХ НАНОСПУТНИКОВ

© 2014 Я. А. Мостовой

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Рассматривается решение прикладных задач кластерами простых наноспутников (НС), объединённых в сеть, не обладающих автономным управлением движения центра масс и случайным образом распределённых в заданной зоне обслуживания межвиткового интервала трассы орбиты. При данной постановке получения информации от совокупности НС требуется не только изучение свойств каждого НС, но и рассмотрение свойств больших случайных кластеров объектов, образующих «сложную сеть». Вводится понятие управляемой перколяции зоны обслуживания, которая реализуется в две фазы: на первой создаётся стохастическая основа с относительно небольшой концентрацией НС, не обеспечивающей стохастическую перколяцию, а на второй в межкластерные интервалы вводятся оптимальным образом дополнительные наноспутники с целью получения кратчайшего перколяционного пути через стохастически образованные кластеры НС при сравнительно низком общем количестве НС и минимизации общих затрат.

Статистическое моделирование, большие сети, кластеры наноспутников, порог перколяции, модальный закон распределения вероятностей, робастность.

Введение

В процессе эволюционного развития методы решения задачи глобального наблюдения со спутников дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) достигли высокого совершенства. Для увеличения полосы наблюдения до значительной доли межвиткового интервала на этих аппаратах предусмотрены сложные системы навигации и угловой ориентации, позволяющие при соответствующем управлении угловым движением проводить наблюдение заданных целей, лежащих в стороне от трассы полёта. Такие спутники могут управлять параметрами своей орбиты и положением на ней за счёт бортовой двигательной установки автономно либо по командам с Земли. В рамках концепции ДЗЗ единичными или несколькими подобными сложными спутниками, образующими систему, развиваются классы тяжёлых спутников и так называемых малых спутников ДЗЗ.

Рассматривается другая концепция получения информации ДЗЗ, предусматривающая существование на орбите одновременно большого количества весьма

простых сверхмалых спутников – наноспутников (НС), которые в совокупности и будут решать задачу глобального ДЗЗ распределённым образом.

Учитывая, что простейшие НС из-за малой массы не могут иметь собственной двигательной установки и системы управления движением центра масс и организованное размещение отдельных НС в кластере в процессе полёта НС не может быть поддержано, задачу определения необходимого количества случайным образом распределённых в пространстве спутников в таких кластерах предлагается решить путём статистического моделирования процессов, приводящих к образованию случайных кластеров объектов.

Задачи исследования больших сетей не исчерпываются исследованиями их топологии и свойств каждого узла. Прежде всего в больших сетях исследуются совокупные свойства и их статистические феномены, в частности:

- статистические характеристики случайных операционных сред, образованных сетью,

- пути, проложенные в сетях по выбранным критериям качества,

- кластеры узлов (объектов), связанных по определённым условиям.

Один из развиваемых подходов исследования больших сетей связан с моделью «протекания» по рёбрам их графов, информационного трафика, транспортно-го трафика, потоков обслуживания и т. п.

Теория перколяции решает задачи анализа больших сетей в рамках этой модели. Постановка задачи теории перколяции следующая. Имеется решётка из связей или матрица, случайная часть ячеек которых «чёрная», проводящая поток, а остальная часть «белая», не проводящая поток. Необходимо найти минимальную концентрацию «чёрных» ячеек, при которой образуется сквозной путь по чёрным связям или ячейкам через всю матрицу в заданном направлении, т.е. такую концентрацию K_p , при которой вся матрица в целом начинает проводить.

При этом концентрация K – относительная доля чёрных узлов при случайном однородном заполнении решётки или матрицы – является вероятностью наличия чёрного объекта в ячейке матрицы [1, 2]. Поэтому далее вместе с выражением «вероятность наличия объекта в ячейке матрицы» употребляется более краткое выражение «концентрация» (в основном в подрисуночных подписях). Разработанный алгоритм моделирования позволяет использовать не только равномерный, но также и модальные законы распределения объектов по ячейкам матрицы [3, 4, 5].

Таким образом, квадратная матрица со случайным заполнением – модель случайной операционной среды большой сети: либо информационно-вычислительной, либо обслуживания, либо социальной.

Статистическое моделирование на таких квадратных матрицах позволяет обнаружить и исследовать два статистических феномена. Первый статистический феномен – наличие порога стохастической перколяции как «пробоя» матрицы проводящим перколяционным кластером [1]. Второй статистический феномен, рассмотренный в [3, 4, 5], – наличие значения

концентрации, при котором среднее число образовавшихся кластеров имеет максимум.

Применительно к рассматриваемой задаче создания сетей наноспутников использование порога стохастической перколяции для определения потребного числа спутников в сети приводит к их избыточному количеству [3].

В [4, 5] рассмотрены двухфазные операции в больших сетях. На первой фазе создаётся стохастическая основа при концентрации объектов гораздо ниже порога перколяции, а на второй фазе обеспечивается «управляемая» перколяция за счёт внедрения оптимальным образом дополнительных объектов в межкластерные «дыры».

В результате суммарная концентрация объектов при управляемой перколяции становится более чем в два раза меньше порога стохастической перколяции и находится в окрестности концентрации второго статистического феномена.

В настоящей статье более подробно рассматривается извилистость пути управляемой перколяции, участвующая в определении суммарных затрат на проведение двухфазной операции [4, 5].

1. Сеть наноспутников, её задачи и характеристики

По сложившейся классификации, к наноспутникам относятся аппараты массой до 10 кг. Каждый рабочий НС кластера с целью уменьшения массы должен иметь простую систему ориентации, не должен иметь двигательной установки, может не иметь прямой связи с Землёй. Наноспутники в составе кластеров могут решать задачи распределённого сбора данных, мониторинга миграции объектов на поверхности Земли, задачи связи и ДЗЗ. Этот «рой» наноспутников может решать, например, задачу ДЗЗ в надире во всей заданной зоне обслуживания вплоть до всего межвиткового интервала за счёт количества спутников в кластерах.

Другая важная задача для подобных НС – возможность сетевой связи с себе подобными.

Важно отметить, что цель рассматриваемой концепции ДЗЗ состоит не в том, что вместо тяжёлого и дорогого спутника запускается простой и лёгкий и малой ракетой, а в том, что повышается оперативность работ по ДЗЗ за счёт использования большого числа наноспутников, покрывающих одновременно заданную зону обслуживания. При этом сложный уникальный спутник ДЗЗ заменяется большим количеством простых НС, производимых серийно.

Это должно сделать решение задачи ДЗЗ более экономически выгодным, несмотря на то, что суммарная масса выводимых на орбиту наноспутников ДЗЗ вряд ли уменьшится значительно по сравнению с традиционными тяжёлыми или малыми спутниками.

При этом в кластерах НС должно иметься несколько спутников-серверов, возможно, не решающих целевую задачу, а поддерживающих связь с рабочими НС кластера, с одной стороны, и с Землёй, с другой стороны. Наличие спутниковой навигационной системы на каждом НС позволит решать как задачу ДЗЗ, так и задачу сетевой связи.

Одна из основных задач создания сети наноспутников рассматриваемого типа – определение такого их количества (концентрации в пространстве, говоря языком теории перколяции), которое позволило бы надёжно решить поставленные задачи. При этом количество НС должно быть по возможности минимальным.

В настоящее время возможно создание НС, решающих задачу ДЗЗ в «надире», массой менее 10 кг [6]. Выведение нескольких сотен и даже тысяч таких НС, что определяется характеристиками целевой аппаратуры, возможно специальным пуском одной ракеты (не исключено и попутное выведение других полезных нагрузок).

Очевидно, что управление «строим» подобных наноспутников для покрытия

зоны обслуживания невозможно и не должно требоваться. Эти вопросы должны решаться количеством рабочих спутников в кластере и упомянутой структурой кластера (наличием спутников-серверов).

Конструкция НС, устройство его системы управления, энергоснабжения, целевой аппаратуры и других подсистем, проблемы разработки НС в настоящей статье не рассматриваются. В статье рассматривается ключевой вопрос распределённой постановки задачи ДЗЗ: потребное количество НС.

Процесс разведения НС по межвитковому интервалу – отдельный вопрос и в настоящей статье не рассматривается.

Если была бы возможность «построить» кластер НС таким образом, чтобы его фронт покрывал полосами наблюдения межвитковый интервал L_{mv} на экваторе, то целевой критерий глобального наблюдения был бы выполнен при количестве НС, равном N . Здесь N – число НС, определяемое из выражения

$$L_{mv} = \sum_1^n l_i = N \cdot l_i, \quad (1)$$

где l_i – полоса наблюдения i -го НС или зона обслуживания для каждого НС, которую примем постоянной для каждого НС.

Однако отсутствие двигательной установки и других средств управления орбитой после отделения от ракеты-носителя, наличие случайных возмущений орбиты каждого из НС делает невозможным построение генерального кластера подобным детерминированным «строим» и приходится констатировать случайное с течением времени положение НС относительно друг друга в рамках совокупности НС, которая выше названа генеральным кластером.

Ясно, что количество случайным образом размещённых НС для сплошного покрытия межвиткового интервала должно быть при прочих равных условиях больше, чем определённое по выражению (1).

2. Результаты моделирования больших сетей на квадратных матрицах

Задача протекания информации ДЗЗ через сеть случайно размещённых спутников (случайную среду) хорошо ложится на формулировки теории перколяции. В этом случае появление при определённой концентрации вероятности нахождения объекта в заданной области пространства стохастического перколяционного кластера, который перекрывает межвитковый интервал, позволяет определить число НС в кластере.

Геометрически распределённую совокупность НС в границах межвиткового интервала трассы представим размещённой случайным образом на квадратной решётке в дальнейшем квадратной матрицы с количеством узлов или ячеек, определяемым L – числом строк матрицы (1). При этом будем полагать, что геометрически межвитковый интервал отображается на высоту матрицы.

Пусть в каждой ячейке матрицы (или узле решётки) находится НС с вероятностью K или ячейка пуста с вероятностью $1 - K$. Для начала примем, что вероятность нахождения НС в ячейке матрицы является величиной постоянной по всей матрице.

Ответ на вопрос, какова должна быть вероятность нахождения НС в ячейке K , чтобы возник перколяционный кластер, соединяющий верхнюю и нижнюю часть матрицы, даёт теория перколяции.

Теория перколяции позволяет определить порог перколяции, уровень вероятности или концентрации K_p , при которой наступает перколяция, и имеет много точных аналитических результатов, но основной используемый ею метод – численное статистическое моделирование на решётках, матрицах или деревьях [1, 2, 3, 7].

Рассматривались матрицы размером 30×30 , 50×50 , 100×100 , 1000×1000 , ячейки которых заполнялись случайным образом сначала с учётом равновероятностного распределения объектов по ячейкам. В [3,

4, 5] рассмотрены и модальные законы распределения объектов по ячейкам матрицы. Математические эксперименты заключались в построении серии из нескольких сотен случайных матриц для каждого значения K – вероятности наличия НС в ячейке матрицы – с дальнейшим определением численных характеристик полученного распределения случайных кластеров по выбранным параметрам с вычислением их средних значений.

В теории перколяции стремятся рассматривать бесконечную (очень большую) матрицу, однако в рассматриваемом случае в соответствии с постановкой задачи необходимо рассматривать матрицы конечных размеров. При этом возникает задача оценки влияния размеров матрицы на точность полученных результатов. Отметим, что при числе НС, случайно размещённых в межвитковом интервале, больше, чем N , определённом по выражению (1), сплошное покрытие полосами наблюдения межвиткового интервала на экваторе может наступить раньше возникновения перколяционного кластера.

По полученным случайным матрицам были распознаны алгоритмом Хошена–Коппельмана [1, 2, 3] все кластеры, определены их статистические характеристики и построены графики. Зависимость среднего количества образовавшихся кластеров на матрице от вероятности наличия объекта в ячейке – концентрации (K) – отражена на рис. 1. По мере увеличения этой вероятности в диапазоне $0,1-0,3$ матрица заполняется объектами и количество кластеров растёт. Максимальное значение количества кластеров достигается при вероятности наличия объекта в ячейке, равной $\sim 0,25$.

При этом в матрице присутствует большое число кластеров небольших размеров. После этой точки при добавлении новых объектов с увеличением концентрации они начинают более активно присоединяться к уже образованным кластерам, происходит слияние кластеров и рост их размеров со снижением общего количества кластеров.

На рис. 1 видна также зависимость числа кластеров от размеров матрицы, однако нормирование этих результатов по

площади матрицы (L^2) избавляет от этой зависимости.

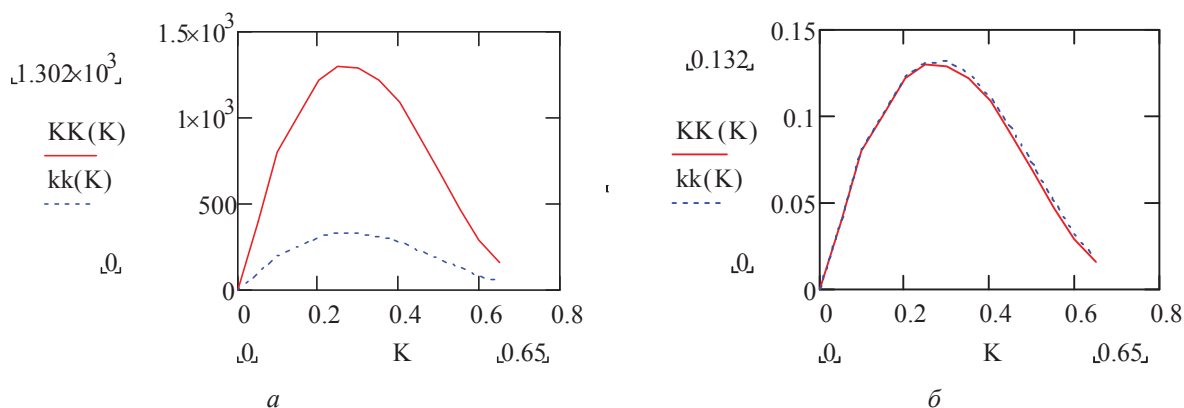


Рис. 1. Зависимость среднего количества кластеров от вероятности наличия объекта в ячейке для матрицы 50×50 (обозначена пунктиром) и 100×100 (а) и нормированное по площади матрицы среднее число кластеров (б)

Физические соображения подсказывают, что начиная с определённой величины матрицы от её размера не должны зависеть размеры кластеров, измеряемые числом образующих ячеек, и расстояния между кластерами. В то же время количество кластеров, образовавшихся на матрице при определённой концентрации, зависит от площади матрицы L^2 , где L – размер квадратной матрицы, измеряемый числом ячеек строки. Длины путей на матрице, например, длина пути перколяции, зависят от размера матрицы L .

От влияния размеров матрицы на результаты статистического моделирования можно избавиться, если пронормировать путём деления соответственно на L и L^2 . Статистические исследования на матрицах различных размеров показали статистическую устойчивость нормированных подобным образом характеристик распределения кластеров и их независимость от размера матрицы при $L > 20$.

Рассмотренные результаты позволяют гарантированно оценивать порог перколяции значением 0,65, что даёт число наноспутников в перколяционном кластере $N_{\text{пк}}$, равное $0,65 \cdot L^2$, где L^2 – число ячеек в матрице. В свою очередь, число ячеек матрицы зависит от площади зоны обслуживания сети и от площади зоны

обслуживания целевой аппаратуры одного НС.

Однако такое количество НС будет явно избыточным, так как структура перколяционного кластера достаточно ветвиста и рыхла [1, 2], и в этом случае в любой строке матрицы находится (при вертикальном направлении перколяции, принятом в статье) несколько ячеек, занятых НС. Поэтому по условиям задачи возможно иметь не один сплошной перколяционный кластер, а множество небольших кластеров, проекции размеров которых на вертикальную ось, интерпретируемую, как межвитковый интервал, перекрывают друг друга и покрывают всю высоту матрицы. Иными словами, в матрице отсутствуют нулевые строки. Статистические исследования на множестве случайных матриц показали наличие нулевых строк при концентрации $K = 0,1$ и меньше. Поэтому с учётом перекрытия полос наблюдения нерезервированных НС целесообразно использовать $K > 0,1$.

Точка максимума на кривой рис. 1 со значением вероятности нахождения в ячейке матрицы НС, равным $\sim 0,25$, даёт среднее максимальное количество кластеров. Это значение мало изменяется при изменении законов распределения по матрице вероятности нахождения НС в ячей-

ке (при сохранении средней по матрице вероятности наличия НС в ячейке – концентрации).

3. Управляемая перколяция в двухфазных операциях и средняя длина пути управляемой перколяции

Дальнейшего снижения потребной концентрации НС и, следовательно, необходимого их количества для реализации перекрытия (перколяции) зоны обслуживания можно достичь, если сначала создать опорную систему распределённых случайным образом наноспутников при сравнительно малой их концентрации, а затем на втором этапе операции в межкластерные интервалы «стохастической опоры» ввести управляемым образом минимальное количество дополнительных наноспутников таким образом, чтобы они совместно с имеющимися стохастическими кластерами образовали бы сплошной перколяционный путь минимальной длины в заданном направлении.

В этом случае можно говорить о программируемой, или управляемой, перколяции в отличие от классической стохастической перколяции.

Таким образом, увеличивая концентрацию объектов в стохастической основе большой сети, можно уменьшить необходимое для создания кратчайшего перколяционного пути количество дополнительных управляемых наноспутников и наоборот.

Учитывая различную стоимость наноспутников первого рода, распределённых статистически, и наноспутников второго рода, внедряемых в определенные места зоны обслуживания для достижения искусственной управляемой перколяции с минимальной длиной пути, можно найти концентрацию наноспутников, при которой общие расходы на создание пути управляемой перколяции будут иметь минимум.

Этот минимум расходов должен быть меньше расходов на создание чисто стохастического перколяционного кластера ($K = K_{п}$) или расходов на создание полностью управляемой перколяции заданной зоны обслуживания без стохастической основы ($K = 0$).

Точно так же в других приложениях данной теории к большим сетям: каждый из стохастически распределённых объектов дешевле внедряемых в определенное место матрицы объектов за счёт двух причин: наличия у последнего средств, позволяющих установить его в требуемый межкластерный интервал, и за счёт стоимости самой операции внедрения.

Что касается управляемых НС второго рода, то очевидно, что усложнение их конструкции нежелательно и для их внедрения в определённую точку сети понадобится что-то вроде «автобуса» для НС, который при помощи бортовой двигательной установки либо при помощи тросовых космических систем расставлял бы дополнительные НС в межкластерных интервалах стохастической основы. Для подтверждения высказанных соображений было проведено статистическое моделирование подобной двухфазной операции.

На рис. 2, а приведены средние числа добавленных объектов для получения программируемой управляемой перколяции в заданном направлении для матриц различных размеров. На рис. 2, б данные зависимости нормированы по размеру матрицы. После нормировки графики совпали.

Из рис. 2 видно, что с увеличением концентрации число добавленных объектов для образования минимального пути управляемой перколяции падает.

С другой стороны, «извилистость» этого пути и его длина растут за счёт использования всё большего числа попутных кластеров вплоть до значения порога перколяции. Это отражено на рис. 3.

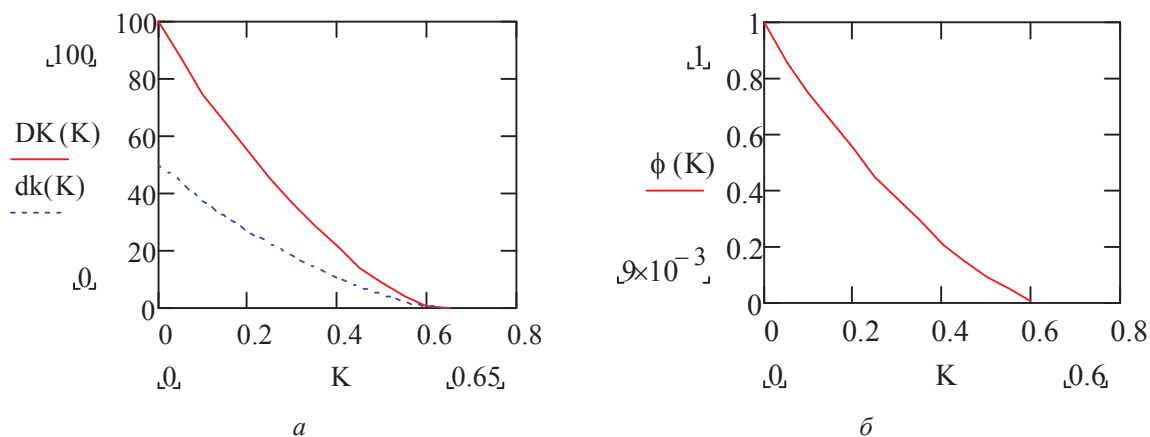


Рис. 2. Зависимость среднего числа добавленных объектов для обеспечения управляемой перколяции от вероятности наличия объекта в ячейке для матриц размером 50×50 (обозначена пунктиром) и 100×100 (а). Эта же зависимость, нормированная по размеру матрицы (б)

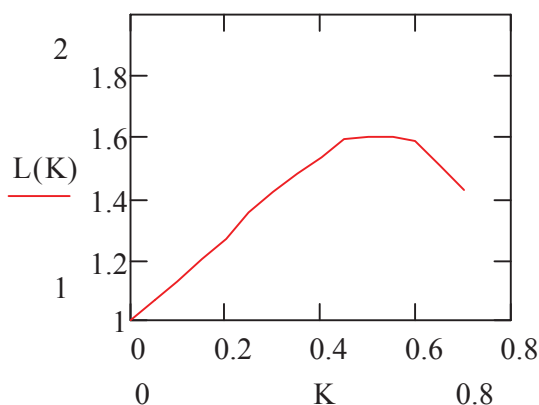


Рис.3. Зависимость средней нормированной по размеру матрицы длины пути управляемой перколяции от вероятности наличия объекта в ячейке

На рис. 4 приведена визуализация нескольких случайных матриц различного размера для различных значений вероятности наличия объекта в ячейке. Там же справа отмечены кратчайшие пути управляемой перколяции, проходящие через статистически образовавшиеся кластеры и реализованные путём добавления минимального количества объектов в межкластерные «дыры». На рисунках виден рост извилистости пути управляемой перколяции с ростом вероятности нахождения объекта в ячейке матрицы. Все возникшие кластеры окрашивались на левых матрицах разными цветами, что в чёрно-белой интерпретации отображается разной интенсивностью серого и чёрного цвета.

Разработанный алгоритм, определяющий минимальное число добавленных объектов к существующим на матрице случайным кластерам для получения кратчайшего пути перколяции в заданном направлении и визуализирующий полученный путь на матрице, получил название «Молния».

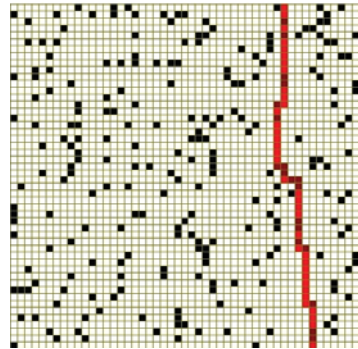
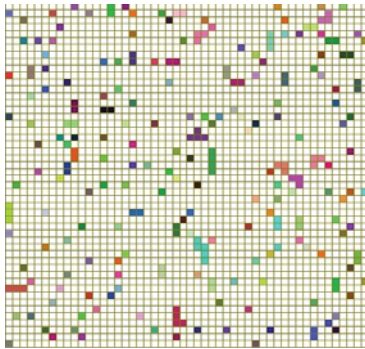
Абсолютно минимальной длине пути управляемой перколяции соответствует значение концентрации стохастической основы, равное 0, при этом само значение пути перколяции равно L . В этом случае число добавленных объектов также соответствует L . Максимальное значение среднего пути управляемой перколяции примерно соответствует концентрации

порога стохастической перколяции в стохастической основе. При этом стохастический перколяционный кластер в этот момент обладает максимальной извилистостью, а число добавленных объектов равно нулю. При дальнейшем увеличении концентрации кратчайший путь управляемой перколяции проходит уже по стохастическому перколяционному кластеру,

который растёт, кратчайший путь управляемой перколяции при этом спрямляется и сокращается. В результате при $K = 1$ этот путь становится минимально возможным и равным L , как и при $K = 0$. Таким образом, длина среднего пути управляемой перколяции характеризует его извилистость.

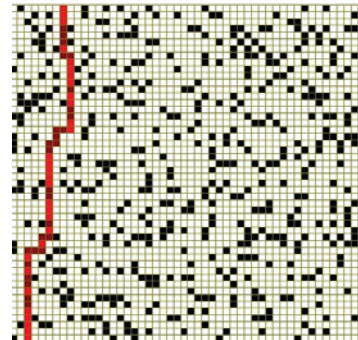
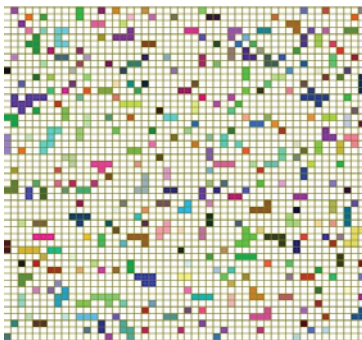
Для матриц размером 50×50 :

$K = 0,1$



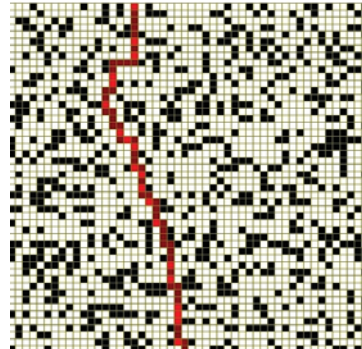
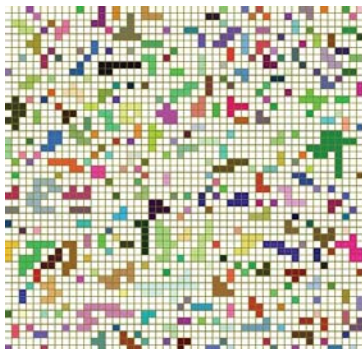
$$L = 1,12; S = 0,078; S+ = 0,74$$

$K = 0,2$



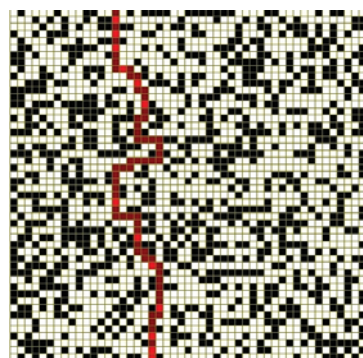
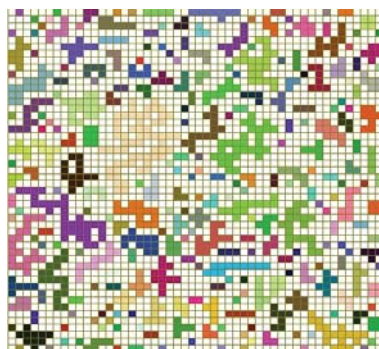
$$L = 1,14; S = 0,127; S+ = 0,6$$

$K = 0,3$



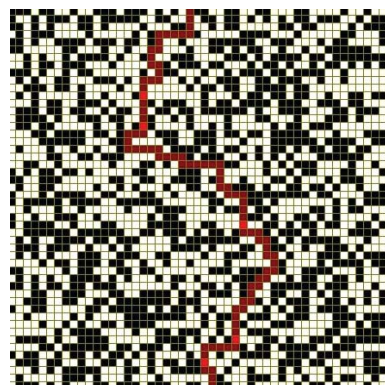
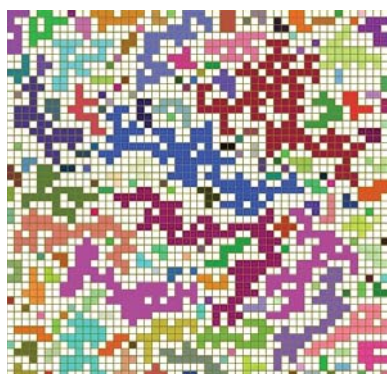
$$L = 1,3; S = 0,127; S+ = 0,4$$

$K = 0,4$



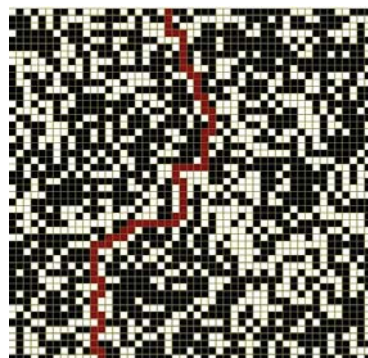
$L = 1,42; S = 0,087; S+ = 0,26$

$K = 0,5$



$L = 1,74; S = 0,07; S+ = 0,1$

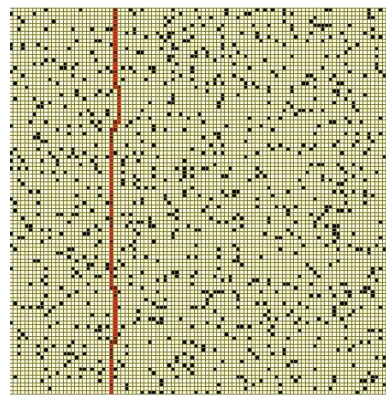
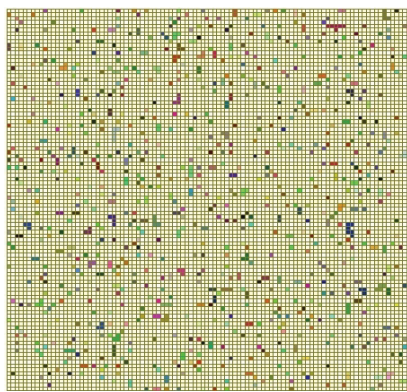
$K = 0,6$



$L = 1,58; S = 0,033; S+ = 0; \text{есть стохастическая перколяция}$

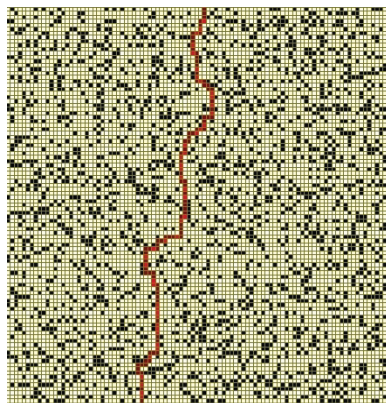
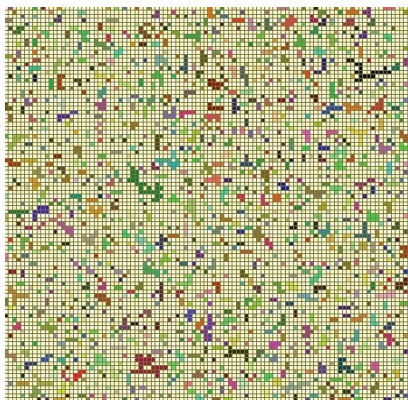
Для матриц размером 100×100 :

$K = 0,1$



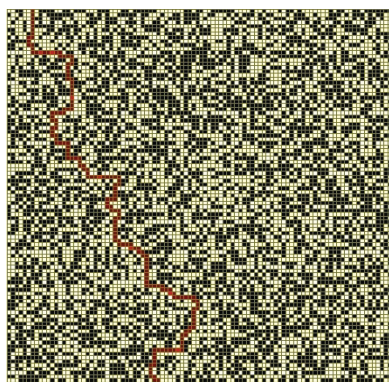
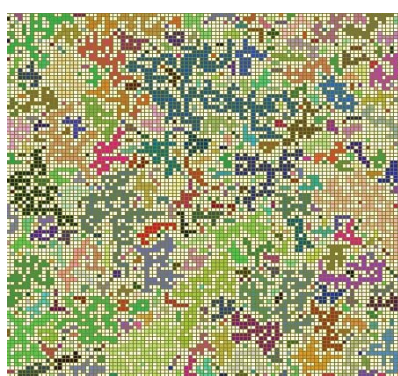
$L = 1,05; S = 0,081; S+ = 0,72$

$K = 0,25$



$L = 1,36; S = 0,1273; S+ = 0,46$

$K = 0,5$



$L = 1,80; S = 0,0623; S+ = 0,07$

Рис. 4. Визуализация кластеров при указанных концентрациях и различных размерах матрицы. Число добавленных объектов $S+$ относится к отмеченному на правых рисунках кратчайшему пути управляемой перколяции через стохастически образованные кластеры. На рисунках: K – концентрация, L – нормированная по размеру матрицы длина пути «молнии», S – нормированное по площади матрицы количество кластеров, $S+$ – нормированное по размеру матрицы количество добавленных объектов для образования минимального пути

4. Оптимальные двухфазные операции в больших сетях

Обозначим стоимость каждого из распределённых случайным образом объектов α , а стоимость одного объекта, устанавливаемого в определённое место большой сети (НС второго рода), – $\theta(K)$. Тогда суммарная стоимость двухфазной операции P будет:

$$P = \alpha \times K \times L^2 + \theta(K) \times \varphi(K) \times L.$$

Первое слагаемое – стоимость стохастической основы большой сети, $K \times L^2$ – количество НС первого рода в стохастической основе.

Второе слагаемое – стоимость добавленных для формирования кратчайшего управляемого перколяционного пути через стохастически образованные кластеры объектов второго рода, $\varphi(K) \times L$ – количество этих добавленных объектов, определённых по результатам статистического моделирования и приведённых в нормированной зависимости на рис. 2, б.

Функция $\theta(K)$ отражает зависимость стоимости создания и установки каждого внедряемого в сеть объекта от концентрации стохастической основы.

В [4, 5] получены выражения для функции стоимости $\theta(K)$ дополнительного к стохастической основе НС с учётом его установки. С учётом этого уравнение суммарных затрат примет вид

$$P = \alpha \times K \times L^2 + \theta_0 \times \varphi(K)^2 \times L^2 / \beta(K).$$

Значения α и θ_0 зависят от множества факторов, характерных для конкретной конструкции наноспутников. Поэтому целесообразно затраты на проведение двухфазной операции оценивать как функцию отношения стоимостей дополнительных объектов и их установки к стоимости объектов стохастической основы.

Рассмотрим относительную стоимость двухфазной операции, нормированной по стоимости чисто стохастической перколяции. Разделим левую и правую часть полученного уравнения на $P_n = \alpha \cdot K_n \cdot L^2$, учитывая, что для концентрации порога перколяции $K_n \approx 0,6$, значение $\varphi(K_n) \approx 0$. Тогда

$$P_{\text{отн}} = P/P_n = 1,7K + 1,7 \cdot (\theta_0 \cdot \varphi(K)^2) / (\alpha \cdot \beta(K)) = 1,7(K + R \cdot \varphi(K)^2 / \beta(K)),$$

где $R = \theta_0 / \alpha$ – отношение стоимости дополнительного объекта к стоимости объекта стохастической основы, $\beta(K)$ – зависимость среднего нормированного пути управляемой перколяции от концентрации [4].

Зависимости относительной стоимости двухфазной операции от концентрации НС приведены на рис. 5, а и 5, б для различных значений R отношения стоимости добавляемого НС к стоимости НС стохастической основы.

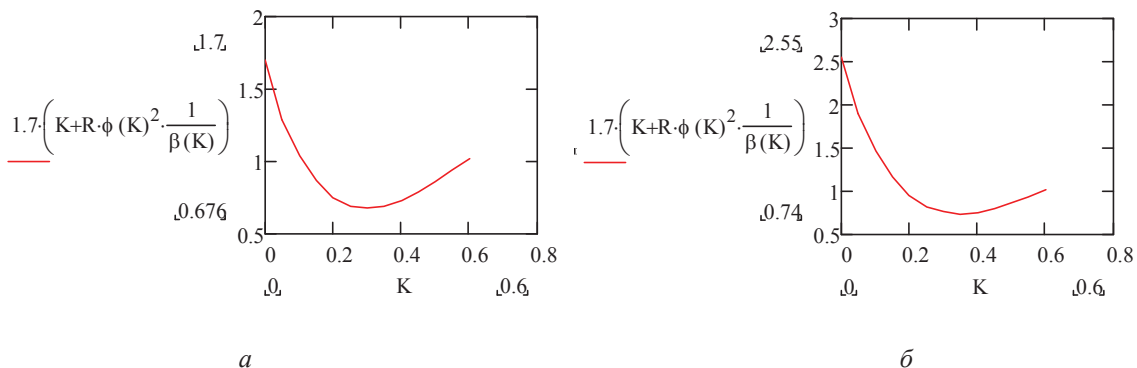


Рис.5. Зависимости относительных затрат на проведение двухфазной операции от концентрации НС стохастической основы при различных отношениях стоимости дополнительных НС и стоимости НС стохастической основы ($R=1 - а$, $R=1,5 - б$)

Анализ полученных зависимостей показывает, что при двухфазных операциях в больших сетях при незначительном увеличении стоимости дополнительных объектов, используемых для создания кратчайшего пути управляемой перколяции, относительно стоимости объектов стохастической основы оптимальное значение концентрации – вероятности наличия объекта в ячейке составляет $\sim 0,25$. Это значение концентрации соответствует максимальному числу кластеров стохастической основы и в два с половиной раза меньше порога стохастической перколяции.

При этом, принимая размер зоны обслуживания каждого НС 50 км, для покрытия межвиткового интервала полосами наблюдения необходимо ~ 600 НС стохастической основы, а среднее число добавленных НС для образования кратчайшего пути управляемой перколяции через кластеры стохастической основы не превышает 4% от числа НС стохастической основы.

Заключение и выводы

Рассмотрены статистические феномены образования случайных кластеров при статистическом моделировании больших сетей на матрицах со случайным заполнением.

Показано, что, наряду со значением вероятности нахождения объекта в ячейке матрицы, описывающим порог стохастической перколяции, на оси вероятности нахождения объекта в ячейке имеется другая замечательная точка – точка максимальной кластеризации, в которой среднее число кластеров по матрице имеет максимум. Максимальное значение ко-

личества кластеров достигается при вероятности наличия в ячейке НС (объекта), равной $\sim 0,25$. Рассмотрено понятие управляемой перколяции, отличное от классической стохастической перколяции. Опираясь на это понятие, рассмотрены двухфазные операции на больших сетях. В течение первой фазы создаётся стохастическая основа с концентрацией объектов, значительно меньше порога стохастической перколяции. На второй фазе через имеющиеся кластеры стохастической основы проводится перколяционный путь добавлением в межкластерные интервалы дополнительных управляемых объектов. При этом алгоритм добавления управляемых объектов выбран таким образом, что обеспечивается минимум пути управляемой перколяции в заданном направлении.

Путём статистического моделирования получено значение среднего количества добавляемых объектов для различной концентрации объектов стохастической основы. Также оценены среднее, максимальное и минимальное значения пути управляемой перколяции. Получены выражения для оценки суммарной эффективности двухфазной операции на больших сетях и значение концентрации объектов, обеспечивающее минимум суммарных затрат.

В качестве примера рассмотрена концепция получения информации ДЗЗ путём запуска одновременно большого количества простых сверхмалых спутников – наноспутников, которые, будучи распределёнными по межвитковому интервалу трассы случайным образом, в совокупности могут оперативно решать задачу глобального ДЗЗ.

Библиографический список

1. Тарасевич Ю.Ю. Перколяция: теория, приложения, алгоритмы. М.: УРСС, 2002. 109 с.
2. Москалев П.В., Шитов В.В. Математическое моделирование пористых структур. М.: Физматлит, 2007. 120 с.

3. Мостовой Я.А. Статистические феномены больших распределённых кластеров наноспутников // Вестн. Самар. гос. аэрокосм. ун-та. 2011. № 2 (26). С. 80-90.

4. Мостовой Я.А. Двухфазные операции в больших сетях наноспутников // Компьютерная оптика. 2013. Т. 37. № 1. С. 120-130.

5. Мостовой Я.А. Управляемая перколяция в больших сетях // Инфокоммуникационные технологии. 2013. Т.11. № 1. С. 53-62.

6. http://ruslentarss.ru/nauka/news_2011-08-19-00-45-01-145.html.

7. Ландэ Д.В., Снарский А.А., Безсуднов И.В. Интернетика: Навигация в сложных сетях: модели и алгоритмы. М.: Книжный дом «Либерком», 2009. 264 с.

8. Додонов А.Г., Ландэ Д.В. Живучесть информационных систем. Киев: Наукова думка, 2011. 256 с.

Информация об авторе

Мостовой Яков Анатольевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры геоинформатики и информационной безопасности, Самарский государственный аэрокосмический университет (национальный исследовательский университет).

E-mail: jakob.mostovoi@yandex.ru. Область научных интересов: компьютерное управление сложными техническими системами (СТС), инженерия программного обеспечения для СТС, имитационное математическое моделирование СТС.

CONTROLLED PERCOLATION AND OPTIMAL TWO-PHASE OPERATIONS IN LARGE-SCALE NETWORKS OF NANOSATELLITES

© 2014 Ya. A. Mostovoi

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

The paper deals with the solution of applied problems with the help of clusters of simple nanosatellites (NS) united in a network, each of them incapable of onboard control of the center-of-mass motion and randomly distributed in a given area of coverage of a ground track interval.

If this method of receiving information is used the set of NSs is required not only to study the characteristics of each NS but also to consider the characteristics of large-scale random clusters of objects forming a "complex network". The notion of controlled percolation of the coverage region implemented in two phases is introduced. During the first phase the stochastic base with comparatively small concentration of NSs is formed which does not provide stochastic percolation, while during the second one additional nanosatellites are introduced in intercluster intervals in an optimal way to achieve the shortest percolation path through stochastically formed NS clusters with a relatively small total number of NSs and minimum of total costs.

Statistical modeling, large-scale networks, clusters of nanosatellites, threshold of percolation, modal law of probability distribution, robustness.

References

1. Tarasevich Y.Y. Perkolyatsiya: teoriya, prilozheniya, algoritmy [Perkolation: theory, applications, algorithms]. Moscow: URSS Publ., 2002. 109 p.

2. Moskalev P.V., Shitov V.V. Matematicheskoe modelirovanie poristykh struktur [Mathematical modeling of porous structures]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2007. 120 p.

3. Mostovoy Ya.A. Statistical phenomena of greater distributed clusters of nanosatellites // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta. 2011. No. 2(26). P. 80-91. (in Russ.).

4. Mostovoi J.A. The two-phase operations in large-scale networks of nanospuitniks // Computer optics. 2013. V. 37, no. 1. P.120-130. (in Russ.).

5. Mostovoi J.A. Controlled percolation in large-scale networks // Infokommunikatsionnye tekhnologii. 2013. V.11, no. 1. P. 53-62. (in Russ.).

6. http://ruslentarss.ru/nauka/news_2011-08-19-00-45-01-145.html.

7. Lande D.V., Snarskiy A.A., Bezsudnov I.V. Internetika: navigatsiya v slozhnykh

setyakh: modeli i algoritmy [Internetika: Navigation in complex networks: models and algorithms]. Moscow: Book house «Liberkom», 2009. 264 p.

8. Dodonov A.G., Lande D.V. Zhivuchest informatsionnykh system [Survivability of information systems]. Kiev: Naukova Dumka Publ., 2011. 256 p.

About the author

Mostovoi Yakov Anatolievich, Doctor of Science (Engineering), Professor, Professor of the Department of Geoinformatics and Information Security, Samara State Aerospace University. E-mail: jakob.mostovoi@yandex.ru. Area of re-

search: computer controlling of complex technical system (CTS), software engineering for CTS, simulation mathematical modeling for debugging, designing and controlling CTS.