УПРАВЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИМИ ГРАФАМИ МОБИЛЬНЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ ПРИ СЛУЧАЙНЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ

стр. 136 - 142

А.И. Миков, А.А. Миков

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет»: 350040, Краснодар, ул. Ставропольская, 149

Контактные данные: *Миков А.И., e-mail: alexander_mikov@mail.ru*

Резюме: *Рассматриваются мобильные компьютерные сети, стационарные движения которых в некоторые моменты времени вынужденно изменяются внешними управляющими воздействиями или случайными возмущениями. Внешнее воздействие может быть нацелено на переход сети к иному стационарному движению, но в течение переходного периода возникает опасность уменьшения надежности сети, качества ее функционирования, и даже угроза работоспособности. Одной из причин этого является быстрое изменение топологических (графовых) характеристик сети – потеря связности динамического графа сети, изменение множества доступных маршрутов передачи данных между узлами. В работе описываются результаты статистического моделирования характеристик динамических графов для возмущенного движения, а также представлены алгоритмы управления динамическими графами в течение переходного процесса, уменьшающие негативные последствия для сети от внешних воздействий. Методами предсказательного моделирования производится оценка качества алгоритмов управления.*

Ключевые слова: *мобильная сеть, ad hoc сеть, SON, динамический геометрический граф, случайный граф, предсказательное моделирование*

MANAGING DYNAMIC GRAPHS OF MOBILE COMPUTER NETWORKS WITH RANDOM DISTURBANCES

pages 136 - 142

A.I. Mikov, A.A. Mikov

Kuban State University: 350040, Krasnodar, Stavropolskaya str., 149

Summary: *We consider mobile computer networks whose stationary movements are forced to change at some points in time by external control actions or random disturbances. External influence can be aimed at the transition of the network to another stationary movement, but during the transition period there is a danger of decreasing the reliability of the network, the quality of its functioning, and even the threat of operability. One of the reasons for this is the rapid change in the topological (graph) characteristics of the network — the loss of connectivity of the dynamic graph of the network, the change in the set of available data transmission routes between nodes. The paper describes the results of statistical modeling of the characteristics of dynamic graphs for perturbed motion, and also presents algorithms for managing dynamic graphs during the transition process, which reduce the negative effects on the network from external influences. Using methods of predictive modeling, the quality of control algorithms is evaluated.*

Keywords: *mobile network, ad hoc network, SON, dynamic geometric graph, random graph, predictive modeling*

doi 10.34219/2078-8320-2020-11-2-136-142

Введение

В настоящее время все большее значение приобретают компьютерные сети, топология которых быстро изменяется в процессе функционирования [1, 2]. Это известные подклассы ad hoc сетей, мобильные сети MANET, сети VANET, образующиеся транспортными средствами, перемещающимися в определенных зонах шоссейных дорог, сети, устойчивые к задержкам передачи данных, оппортунистические мобильные сети и др. Все они характеризуются тем, что узлы сети изменяют со временем свое положение в пространстве.

Изменяется также и взаимное расположение узлов, расстояние между ними. Возможность изменения положения узлов позволяет адаптировать сеть к обслуживаемому объекту – увеличить территорию, на которой поддерживаются коммуникации благодаря работе сети или, для сенсорной сети, увеличить зону наблюдения за подвижными объектами; также изменение положения мобильных узлов может происходить с учетом рельефа местности, наличия препятствий.

Однако, наряду с несомненными достоинствами, мобильные сети обладают рядом свойств, осложняющих их функционирование. Затухание радиосигнала при удалении от узла приводит к тому, что устойчивый прием данных от него другими узлами становится затрудненным из-за реальных ограничений на отношение «сигнал/шум» приемников. Поэтому вокруг каждого узла имеется зона уверенного приема данных, и выход других подвижных узлов из этой зоны означает потерю непосредственной связи. Одним из решений проблемы является multi-hop передача, когда при отсутствии непосредственной связи между двумя узлами отыскивается маршрут передачи пакетов через промежуточные узлы. Но проблема становится более серьезной, если ни одного маршрута не существует, граф сети становится несвязным.

Во всех этих случаях требуются алгоритмические средства для поддержания работоспособности сети. Такие алгоритмы являются объектами многочисленных исследований [1]. Это специальные алгоритмы маршрутизации, алгоритмы буферизации данных в узлах сети, алгоритмы межсетевого взаимодействия в оппортунистических сетях. Отдельную группу составляют алгоритмы автоматического управления движением узлов, т.е. направлением и скоростью перемещения, поддерживающие удовлетворительные значения характеристик связности компьютерной сети. Стремление увеличить зону покрытия мобильной сети противоречит целям поддержания связности сети. Это противоречие является источником оптимизационных задач.

Разработка и исследование таких алгоритмов является сложной задачей, для решения которой используются графовые математические модели и предсказательное имитационное моделирование. Во многих исследованиях в качестве математических моделях беспроводных сетей используются геометрические графы, случайные геометрические графы [3], а для мобильных сетей – графы, зависящие от времени. В математическом плане основные задачи беспроводных мобильных сетей концентрируются вокруг топологических проблем: связности геометрических графов, наличия и количества вершин – точек сочленения, мостов, количества и длин маршрутов.

Тестирование алгоритмов управления мобильными сетями производится с использованием моделей мобильности сетей, из которых одной из наиболее популярных является Random Waypoint Mobility Model [4], использующая равномерное распределение вероятностей для начального расположения узлов в квадратной или круглой области и кусочно-линейные перемещения узлов в дальнейшем, со случайными направлениями, скоростями и длительностями отрезков времени. В некоторых работах используются и другие распределения вероятностей, например, Beta [5], а также многосвязные области расположения, включающие препятствия, например, область «городские кварталы», Manhattan [6]. Но модель Random Waypoint Mobility и подобные ей не могут непосредственно применяться для сравнения алгоритмов управления перемещением узлов сети, поскольку предполагают независимое перемещение каждого из узлов. Необходим более широкий класс моделей с управлением и ограничениями.

В настоящей работе рассматривается новая модель мобильности геометрических графов, отображение множества геометрических графов в множество обыкновенных графов, отображение геометрических графов совместно с моделями мобильности в динамические графы. Представлен алгоритм управления динамическими графами, поддерживающий их связность, приведены результаты моделирования процессов управления.

1. Математическая модель

Математическая модель мобильной компьютерной сети состоит из динамического графа и математической модели области пространства, в которой происходит перемещение узлов сети. Динамический граф, в свою очередь, определяется начальным геометрическим графом (или многомерным распределением вероятностей геометрических конфигураций – расположений узлов в пространстве) и моделью мобильности.

В отличие от моделей случайного блуждания, в которых узлы движутся независимо, мы рассматриваем модели движения узлов, объединенных одной целью. Цель полностью или частично может предопределять траектории движения узлов, но эти траектории претерпевают изменения из-за случайных возмущений, противодействий объектов (поиска, преследования) или препятствий на путях перемещения узлов. Кроме того, перемещение узлов подчиняется ограничениям. Например, узлы, находящиеся на летательных аппаратах планерного типа, имеют ограничения по скорости, $0 \le v_{\min} \le v \le v_{\max}$, по ускорению, $a_{\min} \le a \le a_{\max}$, по углам поворота, тангажу, вектору перемещения (исключаются вертикальные перемещения) и т.д. Имеются совместные ограничения: минимальное расстояние между узлами. В настоящей работе рассматривается модель «Патрулирование области».

Над круглой областью S радиуса R_S перемещаются n БПЛА планерного типа (дронов). Каждый из них обеспечивает зону Z_i покрытия, $Z_i \subset S$. Зона, полностью лежащая в области S, имеет форму круга радиуса R_Z. На дроне находится узел компьютерной сети, ведущей распределенную обработку информации об области S. Связь обеспечивается приемопередающими устройствами с удовлетворительным отношением сигнал /шум в круге радиуса r. Скорости v_i перемещения узлов подчиняются ограничениям $0 \le v_{\min} \le v_i \le v_{\max}$. Цель компьютерной сети – обеспечение в любой момент времени полного покрытия области, $\cup Z_i = S$, и связи между всеми узлами.

Таблица 1

Вершина	1	2	3	4	5	6	7
Угол, град	30	150	270	30 – γ	30 + γ	90	150 – γ
Радиус/δ	2/√3	2/√3	2/√3	2√(7/3)	2√(7/3)	4/√3	2√(7/3)
Вершина	8	9	10	11	12	13	14
Угол	150 + γ	210	270 – γ	270 + γ	330	30	150
Радиус/δ	2√(7/3)	4/√3	2√(7/3)	2√(7/3)	4/√3	4	4
Вершина	15	16	17	18	19	20	21
Угол	270	90 – α	90 + α	210 – α	210 + α	330 – α	330 + α
Радиус/δ	4	4	4	4	4	4	4

Примечание. Угол $\gamma = 30° - \mathrm{arctg}(1/(3\sqrt{3}))*360°/(2\pi) \approx 19.11°$. Угол $\alpha = \arcsin 0.25 \approx 14.48°$.

2. Характеристики неуправляемого движения

Одним из решений задачи для модели является начальное расположение минимального количества узлов сети в соответствии с предложенными в [7] «критическими» с точки зрения связности размещениями на основе упаковок Z^2 и L_2 и добавление дополнительных узлов в определенные позиции для повышения надежности. Скорость и направление дальнейшего движения каждого из узлов выбираются при условии не выхода вертикальных проекций дронов из области S (для невозмущенного движения), и с учетом неравенств $0 \le v_{\min} \le v_i \le v_{\max}$. При определенных сочетаниях параметров n, r, R_Z, $v_{\min}$, $v_{\max}$, v_i, R_S движение узлов сети может быть вращением начальной конфигурации относительно центра области S. Такое вращение в идеальных условиях обеспечивает патрулирование области в течение неограниченного времени. В табл. 1 приведены возможные координаты системы БПЛА в радиальной (полярной) системе координат с центром, находящимся над центром области S. Направление 0° параллельно вектору, направленному из узла 1 в узел 4.

Часть области S для покрытия узлами 20 и 21 делится на две равные части лучом из центра, проходящим через вершину 12 (угол 330°). Таким образом дуга границы области S, которая должна быть покрыта зоной узла 21 находится между направлениями 330° и 0°, а длина l соответствующей хорды равна $l = 2R_S \times \sin 15° = R_S\sqrt{(2-\sqrt{3})} \approx 0.51764\, R_S$. Если $R_S \le 4.04145\delta$, т.е. $l \le 2.092\delta$, то $l \le 2.309\delta$, т.е. длина хорды не превышает диаметра расширенной зоны покрытия узла, и узел 21 (а, соответственно, и узел 20) можно разместить так, что они будут закрывать необходимую часть области S. Положим значение угла для вершины 21 равным 330° + α, а для вершины 20 равным 330° – α. Подобным образом найдем углы для симметричных случаев – пар вершин 16, 17 и 18, 19. Расстояния до центра всех этих вершин одинаковы, их можно положить равными RS (чтобы они находились в пределах области S).

Положим $R_Z = (2/\sqrt{3})\delta$, где δ – радиус окружностей гексагональной упаковки. От величины δ, как показано в таблице, зависит расположение центров узлов. При описанных выше условиях 21 круг радиуса R_Z будет покрывать область S.

На рис. 1 приведена одна из возможных начальных конфигураций.

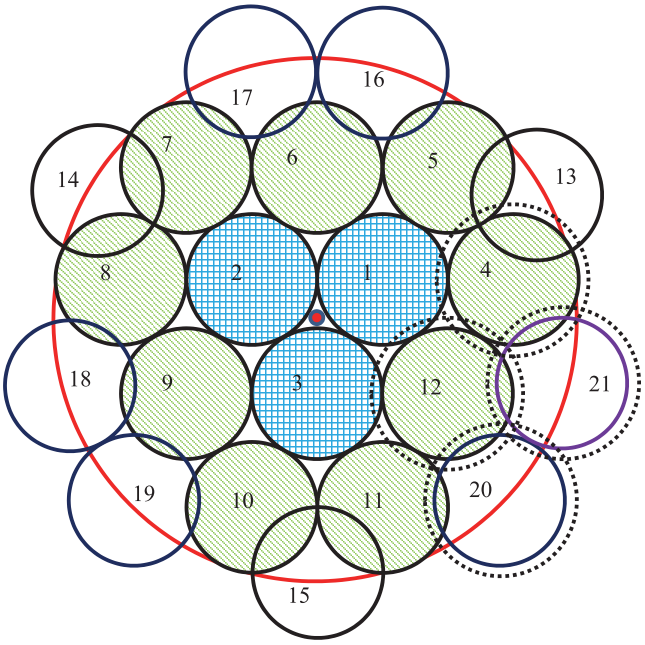


Рис. 1. Начальная конфигурация на основе гексагональной упаковки

Рассмотрим вопрос связности беспроводной компьютерной сети. Каждый узел, кроме радиуса покрытия R_Z, характеризуется еще радиусом r зоны уверенного приема / передачи сигнала. При увеличении радиуса от 0 до $r \approx 1.5\delta$ все узлы сети изолированы друг от друга. В интервале от $r \approx 1.5\delta$ до $r \approx 1.9\delta$ граф сети имеет 6 ребер между парами наиболее близко расположенных узлов. Со значения $r \approx 1.9\delta$ количество ребер увеличивается до 18, они образуют цикл из периферийных узлов, но центральные узлы остаются изолированными. При сохранении положения узлов для обеспечения соединения между соседними узлами в данной конфигурации (для связности графа) требуется выполнение неравенства $r > 2\delta$, т.е. $r > R_Z$. В табл. 2 приведена полная зависимость количества q ребер в графе сети от величины радиуса.

Таблица 2

r /δ	1,496	1,856	**2,0**	2,846	3,096	3,296	3,384	3,465	3,478
q	6	18	**45**	48	54	60	66	81	87
r /δ	3,856	4,0	4,686	4,842	5,127	5,183	5,292	5,473	5,705
q	99	111	117	123	135	141	153	159	162
r /δ	5,855	6,0	6,310	6,615	6,760	6,929	7,050	7,709	**7,936**
q	168	171	174	180	186	195	201	204	**210**

При $0 < r/\delta \le 1{,}496$ количество ребер равно 0. При $1{,}496 < r/\delta \le 1{,}856$ количество ребер равно 6. При $r/\delta > 7{,}936$ граф сети становится полным. Можно заметить, что значения количества ребер возрастают на значения, кратные 3 (3, 6, 9, 12, 15). Этот факт связан с наличием симметрий в конфигурации: она зеркально симметрична относительно вертикальной оси (y) и двух прямых, образующих с ней углы в 120°, а также симметрична относительно поворотов на 120°. Поэтому при достижении радиусом определенных значений возникает сразу несколько дополнительных ребер. Минимальный связный граф данной конфигурации содержит 45 ребер.

Поскольку отношение между максимальным и минимальным радиусами траекторий дронов (табл. 1) равно $4/(2/\sqrt{3}) = 2\sqrt{3} \approx 3{,}46$, то при соотношении $v_{\max}/v_{\min} > 3{,}46$ может быть обеспечено вращательное движение данной конфигурации с сохранением формы и, следовательно, может быть обеспечено постоянное наблюдение за территорией круга радиуса 4δ с помощью 21 БПЛА, имеющего аппаратуру для наблюдения нижележащей поверхности внутри окружности радиуса $(2/\sqrt{3})\delta$ и аппаратуру для передачи информации между БПЛА на расстояние не менее 2δ.

На рис. 2 приведен граф компьютерной сети, соответствующий конфигурации узлов в области, представленной на рисунке 1.

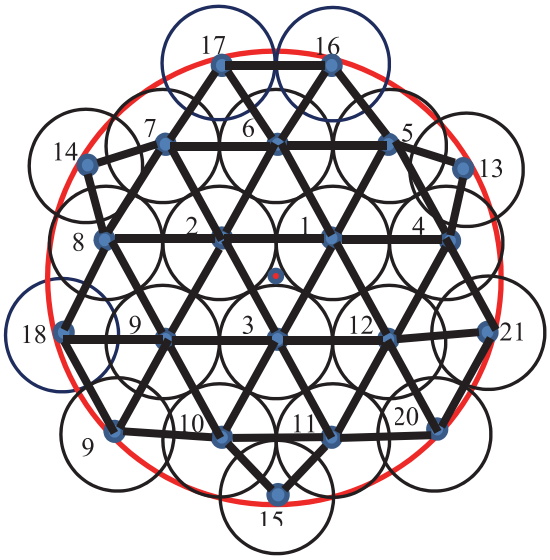


Рис. 2. Граф сети при $r = (2 + \varepsilon)\delta$

В табл. 2 приведены примеры экстремальных наборов параметров n, r, R_Z, v_{min}, v_{max}, R_S : для каждого из наборов граф сети сохраняет связность, но изменение значения одного из параметров (выделено полужирным шрифтом) приводит к несвязному графу.

Искажение конфигурации

Рассмотрим искажение конфигурации системы за счет изменения траектории по отношению к расчетной какого-либо одного узла. Покрытие области S в этом случае в большинстве случаев будет нарушено (при $R_Z = (2/\sqrt{3})\delta$), кроме отдельных периферийных узлов. Связность компьютерной сети оказывается более устойчивой: основная часть графа сети представляет собой триангуляцию области, и смещение вершины удаляет ее от одних вершин, но приближает к другим. Таким образом, при исчезновении одних ребер, может быть, возникают новые ребра. На рис. 3 показана конфигурация и соответствующий связный граф, получающийся при значительном смещении узла №1 в направлении 180°.

связный граф, получающийся при значите

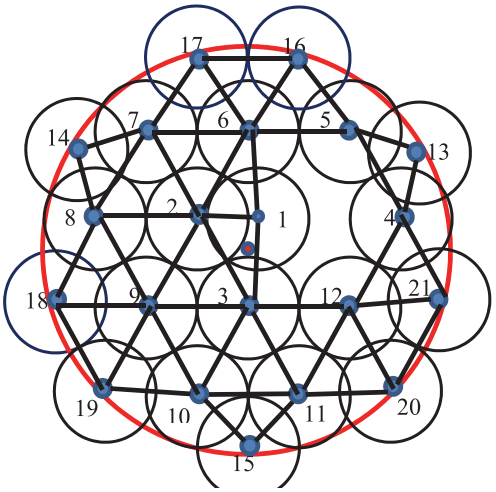


Рис.3. Сохранение связности графа при смещении узла.

Рассмотрим случайные возмущения (например, ветер переменной силы и направления), приводящие к отклонениям траекторий дронов от теоретических. Тогда процесс изменения переменной «связность графа» (связен / не связен = 1 /0) является кусочно-постоянным случайным процессом $\sigma(t)$. Не очевидно, что этот процесс стационарен: постоянные отклонения могут привести к развалу начальной конфигурации. Действительно, моделирование показало, что с течением времени в динамическом графе постепенно уменьшается количество ребер и, наконец, граф становится несвязным в некоторый момент λ.

Была изучена зависимость случайной величины λ от относительного радиуса r/δ при небольших возмущениях. Все возмущения представляли собой случайные векторы силы $\mathbf{F}_j(t)$, независимые для разных узлов, не превышающие по модулю величины b. В зависимости от направлений движения узлов (а они все различны), эта сила производила различные эффекты: ускорение, торможение, сдвиг влево, сдвиг вправо или сочетание этих действий. На рис. 4 приведены графики $\mathsf{E}\lambda(r/\delta)$ при $n = 21$, $2.1 \le r \le 3.0$, $b = 0.005$; 0.01; 0.02. При расчетах $\mathsf{E}\lambda$ случайные процессы $\mathbf{F}_i(t)$ представлялись псевдослучайными последовательностями, получаемыми из рекуррентных соотношений $u_i = a_1u_{i-1} + a_2u_{i-2} + a_3u_{i-3} + \varphi_i$ (для угла) и $v_i = b_1v_{i-1} + b_2v_{i-2} + b_3v_{i-3} + \psi_i$ (для модуля скорости) с независимыми (псевдо) случайными величинами φ_i, ψ_i и нулевыми начальными значениями. Наборы коэффициентов $\{a_1, a_2, a_3\}$, $\{b_1, b_2, b_3\}$, определяющие автокорреляционную функцию случайного процесса, устанавливались одинаковыми для всех узлов моделируемой

компьютерной сети. Значения u_i и v_i менялись через интервал времени τ.

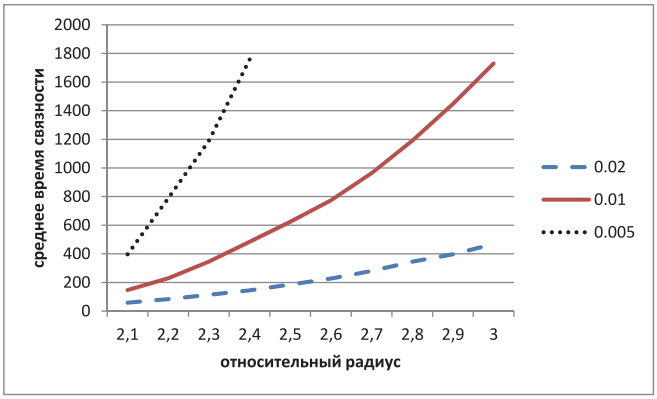


Рис. 4. Зависимость $E\lambda$ от относительного радиуса r/δ

Эта зависимость показывает, что значение среднего времени первого периода связности графа (в некоторых случаях связность восстанавливается) демонстрирует увеличение с ростом радиуса быстрее, чем линейная функция. На рис. 5 показана зависимость среднего времени связности динамического графа от величины $100b$, где b – максимально возможное значение случайного возмущения.

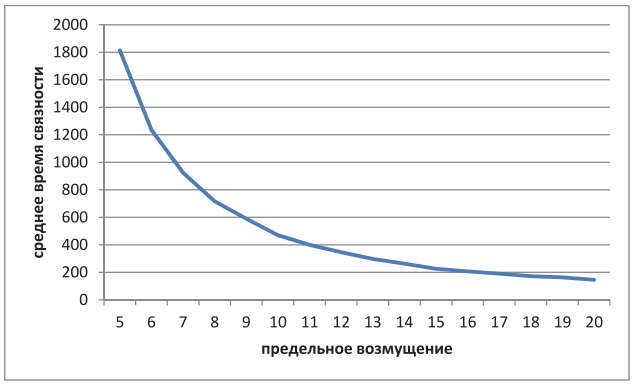


Рис. 5. Зависимость среднего времени связности от возмущений

График демонстрирует почти четырехкратное уменьшение математического ожидания длительности первого периода связности при двукратном увеличении возмущения. Это подчеркивает сложность задачи управления топологией динамического графа: рассогласование исходной конфигурации узлов сети происходит очень быстро при внесении возмущений в движение.

3. Алгоритм управления динамическим графом

Вызванные возмущениями изменения траекторий отдельных БПЛА не влияют на достижение целей всей системы БПЛА до тех пор, пока отдельный дрон не «выпадает» из системы. Например, можно значительно (но на одну и ту же величину) изменить угловые скорости всех аппаратов с сохранением геометрической конфигурации, или даже радиусы окружностей – траекторий невозмущенного перемещения дронов. Поэтому система автоматического управления (САУ) БПЛА необязательно должна поддерживать стабильность траекторий. Достаточно поддерживать стабильность графа компьютерной сети, более того, только поддерживать связность графа. Таким образом, задача синтеза САУ из непрерывной области переходит не только в дискретную, но в топологическую.

Задачей САУ является оценка «расстояния» данного связного графа сети до «ближайшего» несвязного графа, локализация тех вершин динамического графа, в районе которых может произойти распад графа на компоненты, и – переход к геометрии – корректировка положений соответствующих БПЛА в пространстве. В качестве расстояния можно использовать такой графовый инвариант, как реберная связность $\kappa(G)$. Однако частые вычисления реберной связности дают значительную нагрузку на вычислительные мощности БПЛА, а малая периодичность вычислений приводит к чистому запаздыванию в контуре управления, снижающему характеристики качества САУ, или даже к неустойчивости системы управления. Анализ случайных процессов изменения связности сети для рассматриваемых в работе условий (геометрическая конфигурация, возмущения) показывает, что после момента $t = 0$ происходит постепенное уменьшение количества q ребер динамического графа. Потеря связности наступает при $q \approx 10r/\delta$ (анализ проводился для $2{,}1\delta \le 10r \le 3{,}0\delta$ и $0{,}005 \le b \le 0{,}02$). Поэтому в качестве индикатора приближения динамического графа к состоянию несвязности в алгоритме управления выбрано количество ребер.

В настоящей работе мы полагаем, что величина R_Z достаточна для сохранения покрытия области S при любых рассматриваемых возмущениях движения, и сосредоточим внимание на изучении условий связности компьютерной сети, размещенной на системе БПЛА.

Предлагается следующий алгоритм управления

Инициализация:

Установка периодичности $\omega\ \Delta t_q$ тестирования количества ребер, $\Delta t_q = h$.

Установка таймера моментов управления $t = 0$.

В цикле (до конца периода патрулирования):

$t = t + \Delta t_q$.

Вычисление q.

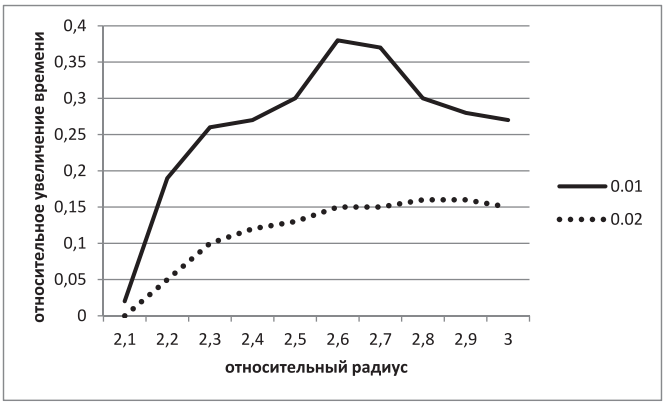
if ($q \ge 20r/\delta$) { $\Delta t_q = h$; return }
  else if ($q < 20r/\delta$) {if (Δt_q == h) {$\Delta t_q = \Delta t_q /2$;} return }
    else if ($q < 17r/\delta$) {искать мост, если не найден ранее}
if (найден мост [m_i ; m_j]){ вычислить длину l моста (m_i , m_j);
                оценка динамики длины (+/ –);
              if ($l_{new} < l_{old}$) { управление m_i и/или m_j ; return }
  else { return; }
}

В графе может быть один или несколько мостов (например, в графе Pn – простой цепи все ребра являются мостами). В нашей модели динамического графа начальный граф G_0 мостов не содержит: мосты могут возникать только за счет возмущений движения. Поскольку все возмущения полагаются независимыми, то вероятность одновременного появления двух мостов пренебрежимо мала. Однако в виду упомянутой

симметрии графа G_0 вслед за появлением одного моста можно ожидать появления еще двух – этот факт можно использовать в алгоритме предсказания изменения топологии сети.

Управление сближением узлов m_i и m_j, образующих мост, учитывает не только их взаимное расположение, но их «идеальные» координаты – то положение в пространстве, которое у них было бы при движении в отсутствие возмущений (мы полагаем, что математическое ожидание возмущения за продолжительное время для любого узла равно нулю). Если идеальные траектории двух узлов моста лежат между их реальными траекториями, то сближение производится в сторону идеальных траекторий и в нем участвуют оба узла. Если первая из идеальных траекторий находится между реальными траекториями, а вторая – вне, то в сближении участвует только первый узел. Такой подход в управлении способствует частичному восстановлению исходной конфигурации, разрушаемой возмущениями. Наиболее сложный случай – когда обе идеальные траектории находятся вне реальных. Тогда движение узлов в направлении идеальных траекторий приведет к увеличению длины моста и, в конечном счете, к потере связности графа. Правильным решением будет встречное корректировка движения узлов с сохранением их на реальных траекториях, т.е. сохранение радиусов, но встречное изменение углов: один узел должен увеличить скорость, а другой уменьшить.

На рис. 6 приведены графики зависимостей относительного увеличения математического ожидания длительности первого периода связности $E\lambda$ как функции относительного радиуса r/δ действия приемопередающих устройств компьютерной сети, расположенной на дронах.



Графики построены для двух уровней возмущений движения: $b = 0.01$ и $b = 0.02$. Они демонстрируют увеличение продолжительности периода связности динамического графа, достигнутое за счет применения алгоритма управления топологией, описанного в данной работе, к времени связности графа, вычисляемого для возмущенного движения при отсутствии управления. При значительном возмущении ($b = 0.02$) улучшение достигает 16%, а при вдвое меньшем возмущении – 38%. Но это касается только радиусов, больших 2.6δ. При малых радиусах, близких к критическому (2δ), выигрыш незначителен. Правда, при еще меньших возмущениях ($b = 0.005$), как показывает имитационное моделирование компьютерной сети, уже при радиусе 2.1δ выигрыш составляет 23%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен алгоритм автоматического управления компьютерной сетью, расположенной на группе БПЛА. Показано, что управление целесообразно строить на топологических принципах. Алгоритм реализует предсказательную математическую модель, связывая возможную потерю связности динамического графа сети с появлением в нем мостов. Алгоритм сочетает глобальный (по всей сети) анализ топологии с целью отыскания мостов с локальными управляющими воздействиями (по отношению к одному или двум узлам одновременно) корректировки положения. Методами имитационного моделирования проведена оценка эффективности предложенного алгоритма управления. Дальнейшее развитие алгоритма управления видится в координации нескольких синхронных действий корректировки положений узлов.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-01-00359. Авторы благодарят рецензента д.ф.-м.н., профессора С.В. Русакова.

Acknowledgments. The reported study was funded by RFBR, project number 18-01-00359.

Конфликт интересов отсутствует.

There is no conflict of interest.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Khanna G., Chaturvedi S.K., Soh S.** Time Varying Communication Networks: Modelling, Reliability Evaluation and Optimization. // Ram M., Pham H. (eds) Advances in Reliability Analysis and its Applications. Springer Series in Reliability Engineering. Springer, Cham. 2020
2. **Conti M., Giordano S.** Mobile ad hoc networking: milestones, challenges, and new research directions // IEEE Communication Magazine. 2014. V. 52(1). P. 85–96
3. **Penrose M.** Random geometric graphs. Oxford Studies in Probability. Oxford University Press, 2004
4. **Díaz J., Mitsche D., Santi P.** Theoretical aspects of graph models for MANETs. // Theoretical aspects of distributed computing in sensor networks. Springer. 2011. P. 161–190
5. **Silva R. T., Colletti R. R., Pimentel C., de Moraes R. M.** BETA random waypoint mobility model for wireless network simulation. Ad Hoc Networks. 2016. V. 48 . P. 93-100
6. **Crescenzi P., Di Ianni M., Marino A., Rossi G., Vocca P.** Spatial Node Distribution of Manhattan Path Based Random Waypoint Mobility Models with Applications. // Kutten S., Žerovnik J. (eds) Structural Information and Communication Complexity. SIROCCO 2009. Lecture Notes in Computer Science. 2010. V. 5869. Springer, Berlin, Heidelberg
7. **Миков А.И.** Связность автономных беспроводных компьютерных сетей в местностях с плохой инфраструктурой. //Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2014. №1. с. 70-75

Поступила 01.04.2020
УДК 519.173.1, 519.245

REFERENCES

1. **Khanna G., Chaturvedi S.K., Soh S.** (2020) Time Varying Communication Networks: Modelling, Reliability Evaluation and Optimization. In: Ram M., Pham H. (eds) Advances in Reliability Analysis and its Applications. Springer Series in Reliability Engineering. Springer, Cham
2. **Conti M., Giordano S.** (2014) Mobile ad hoc networking: milestones, challenges, and new research directions. IEEE Commun Mag 52(1):85–96
3. **Penrose M.** Random geometric graphs. Oxford Studies in Probability. Oxford University Press, 2004
4. **Díaz J, Mitsche D, Santi P** (2011) Theoretical aspects of graph models for MANETs. In: Theoretical aspects of distributed computing in sensor networks. Springer, pp 161–190
5. **Silva R. T., Colletti R. R., Pimentel C., de Moraes R. M.** (2016) BETA random waypoint mobility model for wireless network simulation. Ad Hoc Networks, Volume 48, 15 September 2016, Pages 93-100
6. **Crescenzi P., Di Ianni M., Marino A., Rossi G., Vocca P.** (2010) Spatial Node Distribution of Manhattan Path Based Random Waypoint Mobility Models with Applications. In: Kutten S., Žerovnik J. (eds) Structural Information and Communication Complexity. SIROCCO 2009. Lecture Notes in Computer Science, vol 5869. Springer, Berlin, Heidelberg
7. **Mikov A.I.** Connectivity of autonomous wireless computer networks in areas with poor infrastructure. //Ekologicheskii vestnik nauchnyh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva, Ecological Bulletin of Scientific Centers of the Black Sea Economic Cooperation. 2014, №1, с. 70-75 [In Russian]

Received 01.04.2020
UDK 519.173.1, 519.245

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

1. **Миков Александр Иванович** – доктор физико-математических наук, профессор, Кубанский государственный университет:
   e-mail: alexander_mikov@mail.ru
2. **Миков Александр Александрович** – студент, Кубанский государственный университет:
   e-mail: a.a.mikov@mail.ru

AUTHORS' INFORMATION

1. **Alexander I. Mikov** – doctor of physics and mathematics, professor, Kuban State University:
   e-mail: alexander_mikov@mail.ru
2. **Alexander A. Mikov** – student, Kuban State University:
   e-mail: a.a.mikov@mail.ru