

УДК 004.023:004.896

Оценка надежности двумерной инфокоммуникационной сети на основе мобильных сенсоров в среде распространения с плоскими границами¹

¹ Кудрявченко И. В., ² Карлусов В. Ю.

Севастопольский государственный университет,

¹ *Институт радиоэлектроники и информационной безопасности,*

² *Институт информационных технологий и управления в технических системах*
ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация
inform_kaf@mail.ru

Получено: 14 февраля 2019 г.

Отрецензировано: 20 февраля 2019 г.

Принято к публикации: 3 марта 2019 г.

Аннотация: Рассмотрен метод оценки устойчивости работы мобильной инфокоммуникационной сети (МИС), который базируется на модели лабиринта размером $n \times m$ клеток на дискретной плоскости с квадратным покрытием. Устойчивость работы МИС на основе мобильных интеллектуальных устройств (МИУ) оценивается по энергетическому критерию, который учитывает как прямые, так и отраженные волны, а также по критерию полноты контроля лабиринта. Для получения количественных оценок применены модели транспортного и коммуникационного графов, позволяющие определять необходимое число узлов сети и среднее время ее восстановления при отказах МИУ, задаваемых удалением произвольных узлов или ребер коммуникационного графа. Проанализированы результаты вычислительного эксперимента для различных топологий сети и параметров плоских границ. Показано, что наличие отражений сигналов от плоских границ повышает устойчивость сети даже при меньшей аппаратной избыточности по сравнению со средами, имеющими поглощающие плоские границы.

Ключевые слова: мобильное интеллектуальное устройство (МИУ), квадратное покрытие, дискретная плоскость, лабиринт, транспортный граф, коммуникационный граф, коэффициент устойчивости/готовности сети.

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 28-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2018 (Севастополь, РФ, 9—15 сентября 2018 г.).

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Кудрявченко И. В., Карлусов В. Ю. Оценка надежности двумерной инфокоммуникационной сети на основе мобильных сенсоров в среде распространения с плоскими границами // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2019. Т. 2, № 1. С. 71—85.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Кудрявченко, И. В. Оценка надежности двумерной инфокоммуникационной сети на основе мобильных сенсоров в среде распространения с плоскими границами / И. В. Кудрявченко, В. Ю. Карлусов // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2019. — Т. 2, № 1. — С. 71—85.

The reliability assessment of a two-dimensional infocommunication network based on mobile sensors in a propagation environment with flat boundaries

I. V. Kudryavchenko¹ and V. Yu. Karlusov²
Sevastopol State University,

¹ *Institute of Radio Electronics and Information Security,*

² *Institute of Information Technology and Management in Technical Systems
33, University St., Sevastopol, 2990533, Russian Federation
inform_kaf@mail.ru*

Received: February 14, 2019

Peer-reviewed: February 20, 2019

Accepted: March 3, 2019

Abstract: *A method for estimating the stability of a mobile infocommunication network (MIN), which is based on a model of a maze with a size of $n \times m$ cells on a discrete plane with a square covering is considered. The stability of the MIN based on mobile intelligent devices (MIU) is estimated by the energy criterion, which takes into account both direct and reflected waves, as well as by the criterion of completeness of the maze control. To obtain quantitative estimates, transport and communication graphs models were applied, which made it possible to calculate the required number of network nodes and the average recovery time for failures of the MIU given by removing arbitrary nodes or edges of the communication graph. The results of a computational experiment for various network topologies and parameters of flat boundaries were analyzed. It was shown that the presence of signal reflections from flat boundaries increases the stability of the network, even with less hardware redundancy compared with media that have absorbing flat boundaries.*

Keywords: *mobile intelligent unit, square coverage, a discrete plane, a maze, transport graph, communication graph, coefficient of the network's stability/availability.*

For citation (IEEE): I. V. Kudryavchenko et al. "The reliability assessment of a two-dimensional infocommunication network based on mobile sensors in a propagation environment with flat boundaries," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 1, pp. 71–85, 2019. (In Russ.). doi: 10.15826/icrt.2019.02.1.07

1. Введение

В последние годы наблюдается повышенный интерес к применению малоразмерных беспилотных подвижных объектов, имеющих признаки «коллективного» поведения и управляемых с помощью компьютерных программ при минимальном участии человека-оператора. В качестве таких подвижных объектов могут рассматриваться мобильные интеллектуальные устройства (МИУ), которые в общем случае можно рассматривать как беспилотные роботизированные средства, представляющие собой элементы инфокоммуникационной /сенсорной сети, размещенные на автономных подвижных платформах². Подобная сеть обладает большой гибкостью и повышенной надежностью.

Прикладные задачи, связанные с применением «коллектива» МИУ:

— поиск объектов;

— оперативное развертывания беспроводных инфокоммуникационных и сенсорных сетей (в том числе мобильных инфокоммуникационных сетей — МИС).

Особую актуальность указанные задачи приобретают в условиях городской застройки или в пределах больших зданий.

Данная работа развивает ранее изложенные идеи построения мобильных сенсорных сетей в средах распространения с плоскими границами в диапазонах сантиметровых и миллиметровых волн [1]. При этом основное внимание уделяется вопросам повышения устойчивости работы такой сети.

2. Модель и методы исследования

В основу построения МИС положена модель среды, в которой находятся МИУ, представляемая в виде лабиринта, а так же ограничений на параметры движения МИУ и на физические свойства среды.

² Технологические барьеры дорожной карты Автонет НТИ (Письмо РГ Автонет № А-002/2018 от 15 января 2018) [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://nti.one/technology/docs/Tematiki_Razvitie_NTI%20Autonet.pdf. (Дата обращения: 09.05.2018).

В качестве модели среды распространения с плоскими границами рассматривается лабиринт размером $n \times m$ клеток (n и m — целые числа) на дискретной плоскости (ДП) с квадратным покрытием (рис. 1). Топология лабиринта считается известной.

На параметры движения МИУ накладываются следующие ограничения:

— скорость МИУ в каждый момент дискретного времени принимает единичное или нулевое значения (под скоростью понимается число переходов за один такт дискретного времени);

— переходы могут осуществляться между двумя соседними узлами в направлениях, принятых в картографии: Север, Юг, Запад, Восток, таким образом, диагональные перемещения исключены;

— МИУ может переместиться в соседний узел только в том случае, если он свободен;

— запрещается одновременное нахождение двух и более МИУ в одном узле ДП;

— исключаются конфликты перемещений двух и более соседних МИУ в один общий узел (назначается МИУ с наивысшим приоритетом);

— приоритет МИУ назначается в зависимости от его местоположения в лабиринте.

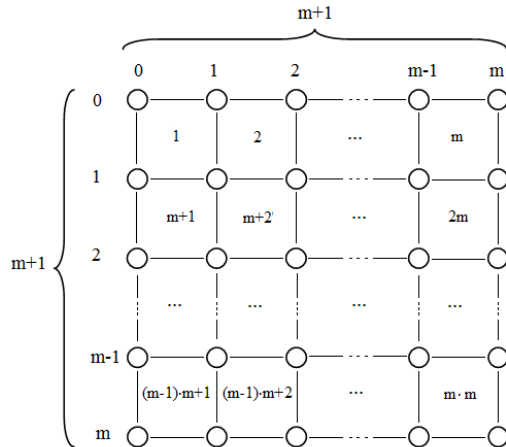


Рис. 1. Квадратное покрытие на двумерной дискретной плоскости.

Fig. 1. Square coating on a two-dimensional discrete plane

Среда нахождения МИУ, с позиции особенностей прохождения радиоволн и организации МИС, обладает следующими характеристиками, которые будем рассматривать как ограничения для оценивания устойчивости сети:

1) Волна распространяется «по лучу» (вектор Пойнтинга плоской волны направлен перпендикулярно ее фазовому фронту) [2, 3].

2) Коэффициент отражения ρ от плоских границ или препятствий принимает фиксированные значения.

3) Допускается однократное отражение волны от препятствия.

4) Критический угол $\theta_{кр}$ падения/отражения волны/луча ограничен.

Указанные ограничения относятся как к техническим параметрам МИУ, так и к среде распространения радиоволн.

Так требование 1) диктуется применением датчиков (передатчиков и приемников МИУ) миллиметрового и/или сантиметрового диапазонов длин волн; а требования 2)—4) относятся непосредственно к среде распространения радиоволн.

Для устойчивой работы сети необходимо, чтобы, во-первых, осуществлялась надежная связь между МИУ за счет достаточно высокого уровня принимаемого сигнала, и, во-вторых, обеспечивался полный контроль каждой доступной свободной клетки/ячейки лабиринта.

Данные требования будут выступать в качестве критериев в оценке надёжности.

Высокий уровень принимаемого сигнала может оцениваться посредством энергетического критерия, в качестве которого выступает коэффициент связности w_{ij} между двумя клетками (где $i \leq n$, $a, j \leq m$), который с учетом допускаемого однократного отражения волны от препятствия может принимать следующие значения:

$$w_{ij} = \begin{cases} 1-2 & \text{для области прозрачности;} \\ 0,5-1 & \text{для области полутени;} \\ 0 & \text{для области тени.} \end{cases}$$

Зону покрытия инфокоммуникационной сети образует совокупность областей прозрачности и полутеней [1].

Выполнение второго требования проверяется с помощью критерия полноты контроля лабиринта. То есть МИУ должны располагаться таким образом, чтобы любой дополнительный объект, размещаемый в лабиринте, мог быть обнаружен по изменению интенсивности принимаемого сигнала («на просвет»). Это возможно, если такой объект будет находиться:

— между двумя МИУ в их общей зоне покрытия,

— либо между МИУ и препятствием в зоне покрытия МИУ на пути отраженного луча.

2.1. Пример построения инфокоммуникационной сети

Для осуществления построения сети воспользуемся методикой, предложенной в [1].

Данная методика предполагает синтез инфокоммуникационной сети однотипных МИУ путем последовательного построения на основании известной топологии лабиринта сперва транспортного графа (ТГ), а затем коммуникационного графа (КГ). Продемонстрируем построения ТГ и КГ применительно к лабиринту заданной топологии (рис. 2) при различных значениях коэффициента отражения волн.

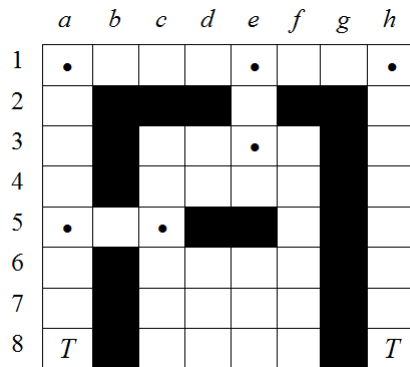


Рис. 2. Топология плоского лабиринта в 2D ДП.

Fig. 2. Topology of the flat labyrinth in 2D discrete plane

Пусть МИУ попадают вовнутрь лабиринта через шлюз, который соответствует клетке с координатами a_1 . Граф, показанный на рис. 2, согласно [1] может быть представлен набором примитивов, к каковым относятся прямоугольники (фигуры $A—E$) и кольца (фигура F) на рис. 3.

Примитивы, стыкуясь в точках сборки, называемых базовыми клетками или базовыми узлами, образуют вершины транспортного графа. Очевидно, что для случая лабиринта, базовые точки соответствуют клеткам развилки. На рис. 2 они отмечены точками (•). Для обозначения тупиковых клеток транспортного графа применяется литера « T ». Ребра транспортного графа размечаются весами, которые определяются значениями длин путей (числом переходов отдельно взятого МИУ) между соответствующими клетками лабиринта.

Отметим, что вес ребра, соединяющего на графе вершины c_5 и e_3 , не определен, ввиду неоднозначности перехода вследствие обилия вариантов между указанными клетками лабиринта.

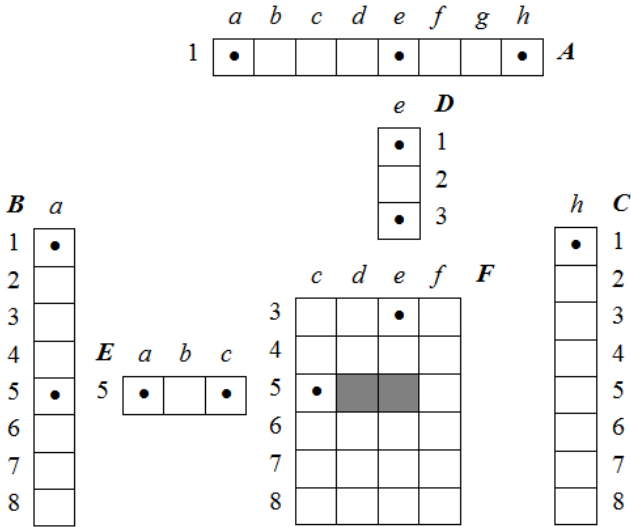


Рис. 3. Пояснения к построению транспортного графа.

Fig. 3. Explanation for the transport graph construction

Вид транспортного графа, соответствующего лабиринту на рис. 2, показан ниже на рис. 4.

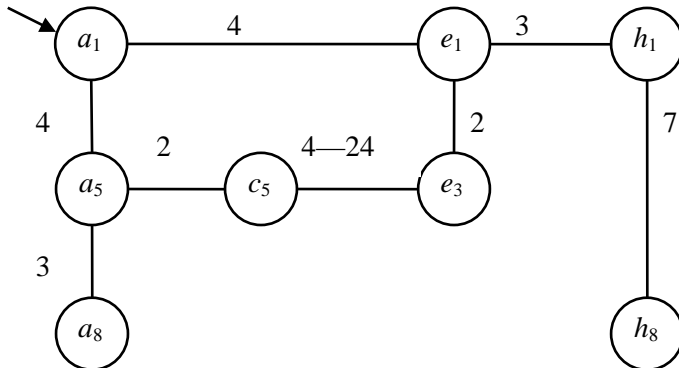


Рис. 4. Вид транспортного графа для лабиринта на рис. 2.

Fig. 4. The transport graph view for the maze in Fig. 2

Построение, и, как следствие, топология коммуникационного графа будут целиком зависеть от того, какие значения принимает коэффициент отражения ρ . Разметка лабиринта приводится на рис. 5.

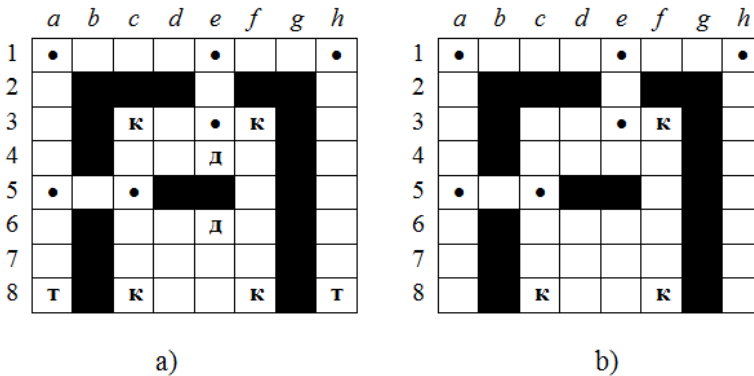


Рис. 5. Разметка лабиринта в зависимости от значений ρ : $\rho=0$ (а) и $\rho=1$ (б).

Fig. 5. The maze markup depending on the ρ values: $\rho=0$ (a), $\rho=1$ (b)

Если $\rho=0$, то это соответствует случаю, когда плоские неоднородности лабиринта (препятствия и границы) являются поглощающими. Поэтому для выполнения требования полноты контроля лабиринта необходимо добавить к базовым и тупиковым клеткам концевые клетки кольца (к) и две дополнительные клетки (д).

В итоге получим КГ на рис. 6 а, содержащий 14 узлов (вершин) и 24 ребра, где стрелкой отмечен узел, соответствующий шлюзу (клетке a_1).

В случае, когда $\rho=1$, отпадает необходимость в двух добавочных вершинах и можно пренебречь одной из концевых, а также двумя тупиковыми вершинами. В результате получим КГ на рис. 6 б, содержащий 9 вершин.

Вопрос методики подсчета числа ребер является дискуссионным. Более корректным, в данной ситуации, является представление КГ в виде орграфа. Тогда можно будет точно определить число дуг и дополнительно разделить передатчики и приемники МИУ. Однако такое изображение будет более громоздким.

Отметим особенности различных ребер графа на рис. 6 б.

Ребро с весом 8, выделенное пунктиром, соответствует случаю, когда в точку приема поступает 50% мощности сигнала, то есть коэффициент передачи по мощности $T_p=0,5$. Ребро 12, выделенное пунктиром, соответствует случаю, когда в точку приема поступает отраженный сигнал с потерей 50% мощности. Кольцевые дуги, намеченные точками, соответствуют отраженным сигналам (от препятствий или от границ лабиринта).

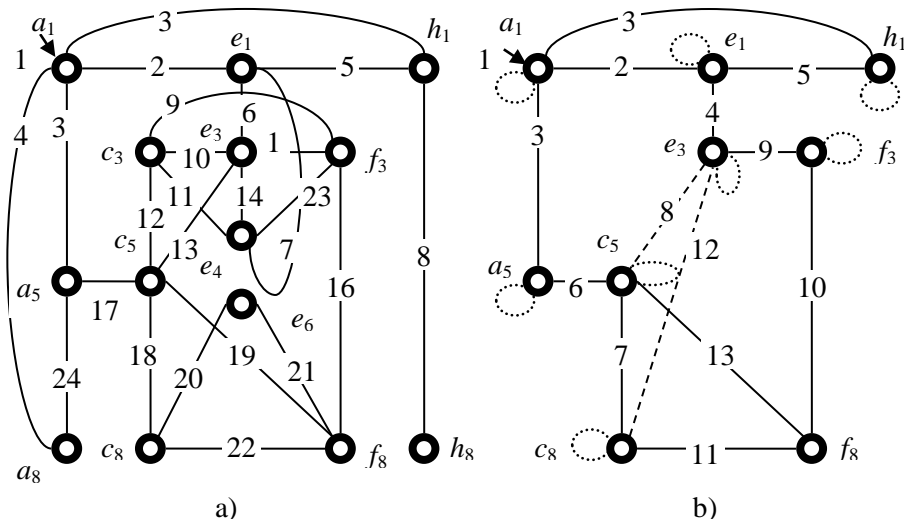


Рис. 6. Коммуникационные графы лабиринта
 а) случай $\rho=0$, б) случай $\rho=1$

Fig. 6. Labyrinth-related communication graphs
 for $\rho=0$ (a), $\rho=1$ (b)

2.2. Моделирование отказов инфокоммуникационной сети

Отказы инфокоммуникационной сети моделируются нарушением структуры соответствующего КГ, то есть удалением дуг или узлов (вершин) графа.

В коммуникационном графе ребро, соединяющее две вершины, соответствует радиолинии. Поэтому для осуществления дуплексной связи две смежные вершины правильнее соединять двумя ориентированными дугами. Будем (для простоты) считать, что удаление ребра соответствует случаю нарушения/прекращения связи между двумя МИУ. Но возможность связи с другими МИУ при этом сохраняется.

Эту ситуацию можно интерпретировать как отказ одного из каналов многоканальной системы связи. В этом случае утрачивается возможность непосредственной передачи информации между двумя МИУ, а также возможность контроля клеток лабиринта через которые проходит соответствующий луч.

Удаление узла КГ означает выход из строя приемо-передающего модуля МИУ либо переход в состояние полной неисправности вплоть до физического уничтожения.

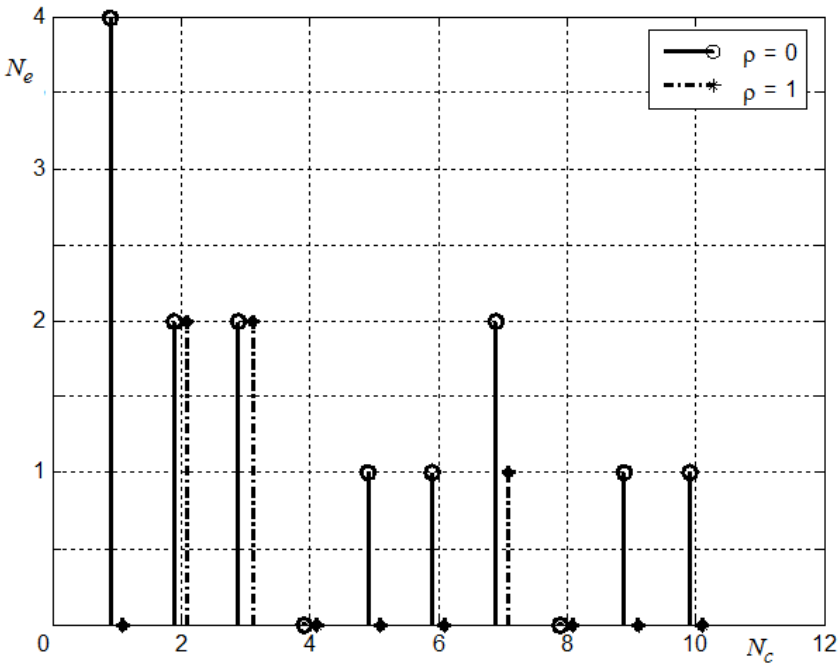


Рис. 7. Результаты выхода из строя одиночного МИУ.

Fig. 7. The results of a single node failure:

 N_c — numbers of uncontrolled cells in the maze, N_e — numbers of events

В зависимости от значения коэффициента отражения ρ отказы будут иметь различные последствия.

Пусть $\rho=0$, рис. 6 а. В данном примере удаление любого из ребер приводит к деградации системы (то есть утрачивается один из резервных каналов связи или одна из радиолиний).

В частных случаях утрачивается контроль за частью лабиринта: в рассматриваемом примере при удалении ребра $h_1—h_8$ не контролируются 7 клеток, располагающихся в столбце h .

Пусть $\rho=1$, рис. 6 b. В целом, наблюдаются те же закономерности, что и в первом варианте, однако из-за меньшей аппаратной избыточности сети, число случаев, связанных с утратой контроля над частью лабиринта возрастает. Например, удаление ребра с весом 8 между узлами e_3 и c_5 приводит к потере контроля над клеткой d_4 , а ребра с весом 13 (между c_5 и f_8) — к потере контроля над клетками d_6 и e_7 .

Случаи выхода из строя произвольного узла (МИУ), полученные для двух значений ρ приведены на диаграмме (рис. 7).

Для варианта $\rho=1$ на диаграмме указаны 5 возможных исходов из 9-ти, а еще 4 на диаграмме отсутствуют, поскольку они являются нулевыми, то есть приводят к деградации системы и не связаны с утратой контроля над лабиринтом. Однако один из таких исходов (удаление узла a_1) приводит к потере возможности внешнего управления сетью.

2.3. Исследование отказов инфокоммуникационной сети на основании энергетического критерия

Применение энергетического критерия основывается на построении функций связности или весовых функций для заданной конфигурации лабиринта. Для определения энергетической устойчивости сети необходимо построить матрицу весовых функций (функций связности) размерности $n \times m$.

Матрица связностей аддитивно определяется прямыми и отражёнными волнами в точке дискретного пространства:

$$W = D_W + R_W,$$

где D_W – весовая функция прямых волн, а R_W – весовая функция отраженных волн. Элементы матрицы W суть коэффициенты связности, рассчитываемые по формуле

$$w_{ij} = (d_{ij}^W + r_{ij}^W) \times b_{ij},$$

где переменная b_{ij} имеет смысл индекса препятствий. Если клетка лабиринта является препятствием, то значение индекса $b_{ij}=0$, а если свободна, то $b_{ij} = 1$.

Расчет всех $(n \times m)^2$ коэффициентов связности позволяет получить возможные значения коэффициентов передачи сигнала c_{ij} из i -й клетки (в которой находится источник сигнала) в j -ю (где находится приемник).

Таким образом, можно разметить ветви транспортного графа сети при любом заданном размещении вершин, и для каждого узла графа представляется возможным определить мощность (то есть число клеток лабиринта, свободных от препятствий) его зоны покрытия.

Покажем на примере простого лабиринта расчет коэффициентов связности. Схема лабиринта и результирующий граф представлены на рис. 8.

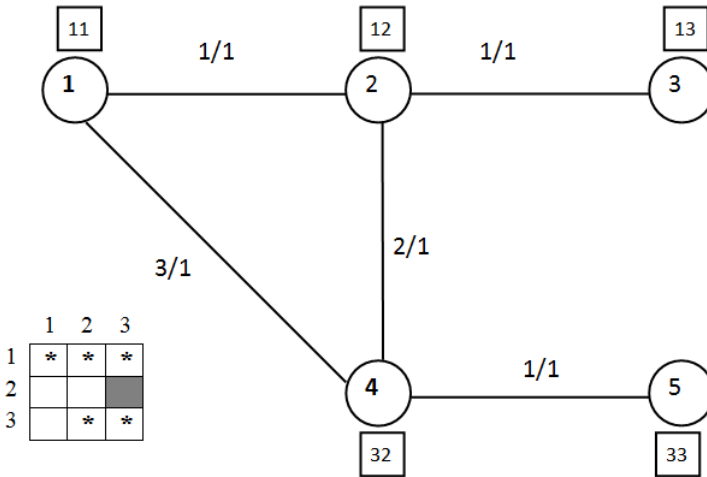


Рис. 8. Демонстрационный пример лабиринта и графа.

Fig. 8. Demo of the maze and its graph

На схеме лабиринта отмечены звездочками местоположения МИУ. Потребовалось построить 9 матриц весовых функций. Очевидно, что матрица W_{32} тождественна нулю, поскольку МИУ не может находиться внутри препятствия, а матрица W_{11} , для МИУ, расположенного в северо-западном углу, выглядит так:

$$W_{11} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 0 \\ 1 & 1 & 0,5 \end{pmatrix}$$

На рис. 8 в квадратах показаны координаты размещения МИУ, а дроби на дугах интерпретируются следующим образом: числитель — длина пути, знаменатель — коэффициент связности.

Оценим устойчивость инфокоммуникационных сетей для лабиринтов различной топологии, представленных на рис. 9 ниже.

Результаты исследований оформлены в табл. 1, в которой учтено, что моделировались 1000 тактов работы сети.

Для схемы А при $\rho=0$, в зависимости от номера отказавшего узла сети, МИУ может заменить отказавший узел за 1, 3 или 5 тактов, что в среднем на 4 использованных МИУ, составит 3 такта.

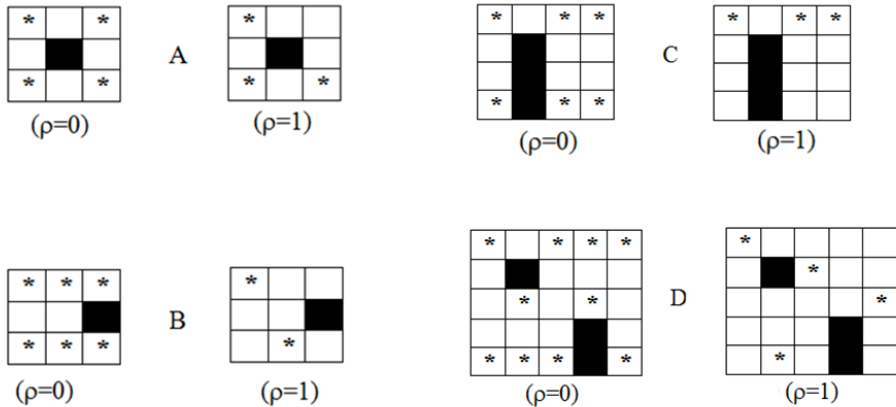


Рис. 9. Схемы размещения узлов инфокоммуникационных сетей в лабиринтах при различных значениях коэффициента отражения ρ .

Fig. 9. Layouts of infocommunication networks nodes in mazes at different values of the reflection coefficient ρ

Табл. 1. Сравнительное оценивание устойчивости сетей.

Table 1. Comparative evaluation of networks stability

Топология лабиринта Maze topology	Размер лабиринта $n \times m$, клеток Size of the maze $n \times m$, cells	Количество узлов (МИУ), k_i Number of nodes (MID), k_i	Коэффициент отражения границы, ρ Border reflection coefficient, ρ	Вероятность отказа МИУ, 1/такт (q_i) Probability of MID failure, 1/measure (q_i)	Коэффициент устойчивости/готовности сети, k_r Coefficient of network stability/ availability, k_r
A	3×3	4	0	$10^{-3}/10^{-2}$	0,984/0,857
	3×3	3	1	$10^{-3}/10^{-2}$	0,988/0,890
B	3×3	6	0	$10^{-3}/10^{-2}$	0,976/0,800
	3×3	2	1	$10^{-3}/10^{-2}$	0,993/0,933
C	4×4	6	0	$10^{-3}/10^{-2}$	0,970/0,752
	4×4	3	1	$10^{-3}/10^{-2}$	0,989/0,898
D	5×5	10	0	$10^{-3}/10^{-2}$	0,943/0,6
	5×5	4	1	$10^{-3}/10^{-2}$	0,977/0,807

Таким образом, при средней вероятности отказа сети $Q \approx 4 \times q \approx 4 \times 10^{-3}$ и коэффициент готовности сети будет равен: $K_r = 996/1012 = 0,984$, что эквивалентно 98,4 %.

Если положить $q = 10^{-2}$, то получим $K_r = 96/112 = 0,857$ или 85,7 %.

Для этой же схемы А при $\rho=1$:

$Q \approx 3 \times q \approx 3 \times 10^{-3}$ — средняя вероятность отказа сети;

$N_{т.ср} = (1+3+5)/3 = 3$ такта на восстановление;

при $q=10^{-3}$ $K_T=997/1009=0,988$ (98,8 %), а

при $q=10^{-2}$ $K_T=97/109 = 0,890$ или 89 %.

Аналогично рассчитываются остальные элементы табл. 1.

4. Обсуждение

Рассмотрен метод оценки устойчивости МИС на основе модели среды распространения с плоскими границами. Для тестирования метода рассматривались различные топологии лабиринтов заданных размеров. Применялись коэффициенты отражения $\rho_1=1$ и $\rho_2=0$. Угол падения/отражения волны ограничивался сверху допустимой величиной $\Theta_{кр} \leq 45^\circ$.

В результате можно сделать следующие выводы:

1. Наличие отражений сигналов от плоских границ повышает устойчивость МИС даже при меньшей аппаратной избыточности по сравнению со средами, имеющими поглощающие плоские границы.

2. На практике размерность лабиринта может устанавливаться с учетом характерных временных интервалов движения МИУ, а коэффициенты отражения от препятствий должны уточняться на основе получаемых экспериментальных данных.

3. Возможное применение метода:

— решение прикладных задач поиска объектов на пересеченной местности;

— для оперативного развертывания надежных беспроводных инфокоммуникационных и сенсорных сетей в условиях городской застройки или в пределах больших зданий.

Список литературы

1. Кудрявченко И. В. Построение мобильных сенсорных сетей в средах распространения с плоскими неотражающими границами // СВЧ техника и телекоммуникационные технологии : 27-я Междунар. Крымская конф. (КрыМиКо'2017). — Севастополь, 10—16 сент. 2017 г. : материалы докладов. — Москва; Минск; Севастополь, 2017. С. 516—522.
2. Саламатин В. В., Афонин И. Л. Основы электродинамики (традиционной и геометрической) / Под ред. В. В. Саламатина. Севастополь : СевНТУ, 2003. 216 с.
3. Вайнштейн Л. А. Электромагнитные волны. М. : Радио и связь, 1988. 440 с.

Информация об авторах

Кудрявченко Иван Владимирович, кандидат технических наук, доцент Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская федерация. ORCID 0000-0002-1669-5447.

Карлусов Вадим Юрьевич, кандидат технических наук, доцент Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская федерация. ORCID 0000-0002-4337-258X.

Information about the authors

Ivan V. Kudryavchenko, candidate of technical sciences, docent of Sevastopol State University, Sevastopol, Russia. ORCID. 0000-0002-1669-5447

Vadim Yu. Karlusov, candidate of technical sciences, docent of Sevastopol State University, Sevastopol, Russia. ORCID 0000-0002-4337-258X.