

References

1. Volkov Y. V., Zavriev S. K. A General Stochastic Outer Approximations Methods, *SIAM Journal on Control and Optimization*, 1997, vol. 35, pp. 1387–1421.
2. Zavriev S. K., Novikova N. M., Fedosova A. V. Stohasticheskiy algoritm resheniya vypuklykh zadach polubeskonechnoy optimizatsii s ogranichenijami ravenstvami i neravenstvami, *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 15. Vychislit. matem. i kibernetika*, 2000, no. 4, pp. 30–35.
3. Rapoport Je. Ja., Pleshivceva Ju. Je. Modeli i metody polubeskonechnoy optimizatsii v obratnykh zadachah teploprovodnosti, *Sb. drudov: 5-yj Minskij mezhdunarodnyj forum po teplo- i massoobmenu. Tezisy dokl. i soobshh.* Minsk: Institut teplo i massoobmena im. Lykova NANB, 2004, no. 1, pp. 274–276.
4. Antonova G. M. *Setochnye metody ravnomernogo zondirovaniya dlja issledovanija i optimizatsii dinamicheskikh stohasticheskikh sistem*, Moscow: FIZMATLIT, 2007. 224 p.
5. Baranova M. E., Gavrilov A. S. Metody raschetnogo monitoringa zagriznenija atmosfery megapolisov, *Estestvennye i tehnicheckie nauki*, 2008, no. 4, pp. 221–225.
6. Zamaj S. S., Jakubajlik O. Je. *Modeli ocenki i prognoza zagrijaznenija atmosfery promyshlennymi vybrosami v informacionno-analiticheskoj sisteme prirodoohrannyh sluzhb krupnogo goroda*: Ucheb. posobie / Krasnojarskij gos. un-t. Krasnojarsk, 1998. 109 p.
7. Vaz A. Ismael F., Ferreira E. C. Air pollution control with semi-infinite programming, *Applied Mathematical Modelling*. ELSEVIER, 2009, no. 33, pp. 1957–1969.

УДК 004.052.3

Г. В. Зеленко, канд. техн. наук, проф.,

Московский государственный университет информационных технологий, радиотехники и электроники,

А. Д. Иванников, д-р техн. наук, зам. директора по научной работе,

Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН,

Д. Ю. Коган, ведущий инженер, ООО "Элитекс",

А. В. Роцин, канд. техн. наук, проф., e-mail: aleksey_roschin@mail.ru,

Московский государственный университет информационных технологий, радиотехники и электроники

Проблемы функциональной устойчивости сенсорной локальной сети

Предложен критерий оценки функциональной устойчивости сенсорной локальной сети, основанный на показателях достижимости любого узла сети из любого другого. Предложен алгоритм идентификации сенсорной локальной сети по результатам прохождения реальных или тестовых сообщений.

Ключевые слова: сенсорная сеть, достижимость, функциональная устойчивость

Введение

Широкое использование сенсорных локальных сетей для создания распределенных систем контроля и управления требует наличия эффективных методов и способов оценки способности таких систем выполнять свое функциональное назначение. Понятие *функциональная устойчивость*, используемое в настоящей статье, подразумевает возможность исполнения сенсорной локальной сетью своего предназначения, а именно, прохождения информационных пакетов от обычных узлов сети к выделенным управляющим узлам и управляющих пакетов от выделенных управляющих узлов к обычным [1, 2].

Проблема оценки функциональной устойчивости в различных формулировках исследуется уже достаточно давно [3–9], однако чаще всего такие исследования проводятся применительно к человеку или организационным системам. Есть работы [3], где функциональная устойчивость привязывается к понятию динамической устойчивости, однако это требует наличия аппарата динамического опи-

сания сенсорных локальных сетей (например, на основе динамических графов), которое в настоящее время недостаточно проработано.

В работе [4] рассматривается функциональная устойчивость навигационно-информационной системы (НИС): "...НИС представляет собой многообъектную распределенную иерархическую систему автоматизированного управления. При этом сами объекты управления НИС изменяют во времени под действием внешних воздействий и внутренних факторов не только свое состояние, но и местоположение в пространстве, что влечет за собой, вследствие пространственных неоднородностей телекоммуникационной подсистемы и навигационного поля, изменения структурно-функциональных связей внутри самой системы. Кроме того, воздействие внешней среды (преднамеренное или непреднамеренное) на элементы системы может существенно влиять на ее работоспособность. В связи с этим необходима способность сохранять или восстанавливать (полностью или частично) возможность выполнения возложенных на нее функций в условиях воздействия деструктивных

факторов. Такую способность будем трактовать как функциональную устойчивость НИС".

В работах [5, 6] говорится, что "Технологической основой обеспечения функциональной устойчивости стало создание бортовых информационно-управляющих комплексов, которые позволили комплексировать ресурсы системы и осуществлять их перераспределение. Только комплексирование всех каналов систем автоматического управления в единый информационно-управляющий комплекс, где информационно-измерительная подсистема будет включать все источники информации, устройства перекодирования и сопряжения, вычислительная система — все вычислители, а энергетическая подсистема — все исполнительные механизмы и источники энергии, позволит обеспечить ее функциональную устойчивость. Следует учитывать, что возможность комплексного использования ресурсов и обеспечения функциональной устойчивости систем ограничивается условиями устойчивости динамической системы, ее управляемости и наблюдаемости по Калману. На сегодняшний день достаточно полное исследование условий обеспечения функциональной устойчивости проведено для линейных нестохастических стационарных моделей. Поэтому задачи обеспечения функциональной устойчивости можно рассматривать как вид задач адаптивного оптимального управления "в большом", предполагающих оптимальное использование на каждом этапе или режиме функционирования системы всех располагаемых ресурсов (энергетических, информационных, вычислительных), для достижения главной для этого этапа цели при соблюдении множества ограничений."

В работе [7] понятие функциональной устойчивости строится на способности системы "гарантированно выполнять заданные функции, причем значения показателей, характеризующих качество выполнения системой функций, соответствуют установленным требованиям. Уровень гарантии при этом определяется выполнением заданных требований к качеству выполнения функций".

В работе [8] понятие функциональной устойчивости привязывается к понятию устойчивости системы по Ляпунову. При этом говорится, что "Качество функционирования СЭОУ в большой степени зависит от чувствительности показателей качества к изменениям параметров системы. Такого рода чувствительность определяет поведение системы в условиях нежелательной вариации ее параметров, и высокая чувствительность становится причиной того, что СЭОУ оказывается функционально неустойчивой."

К сожалению, конструктивных критериев функциональной устойчивости в указанных работах предложено не было.

Формирование критерия достижимости для сенсорной сети

В данной статье определяется конструктивный критерий функциональной устойчивости, основанный на достижимости любого узла сети из любого другого [1]. В работе [2] показано также, что сенсорные локальные сети достаточно хорошо описываются графом.

Как и любой другой, граф сенсорной локальной сети описывается парой — множеством вершин $X = [x_1, x_2, \dots, x_N]$, описываемым множеством узлов сети, и присоединенной матрицей A , описывающей связи между вершинами [9, 10]. Нумерация узлов сенсорной локальной сети в общем случае может быть произвольной. Удобнее, однако, начинать с выделенного (управляющего) узла, который собирает данные со всей сети и может координировать и конфигурировать ее узлы. Если выделенных узлов несколько, имеет смысл давать им младшие номера.

Как уже было сказано, необходимым условием функционирования сенсорной локальной сети является безусловная достижимость любого узла сети любым другим. То есть понятие функциональной устойчивости основано на следующей достижимости: сенсорная локальная сеть является функционально устойчивой, если существует путь длиной от 1 до N (где N — число узлов сети) из любого узла сети до любого другого. При этом запас функциональной устойчивости определяется числом таких путей. Чем больше путей возможно между узлами, тем более функционально устойчивой является сенсорная локальная сеть.

Критерий функциональной устойчивости сенсорной сети

Для формирования конструктивного критерия функциональной устойчивости рассмотрим присоединенную матрицу графа сети. В присоединенной матрице $A = \{a_{ij}\}_{N \times N}$ a_{ij} описывает возможность передачи сообщения от элемента i элементу j [1]. В качестве значений элементов a_{ij} могут выбираться значения, пропорциональные эффективной скорости передачи, определяемой числом потерянных пакетов, потребовавших повторной передачи. Для начала мы будем рассматривать простейший вариант — бинарные значения: 1 — есть связь, 0 — нет связи. Так как обычно в качестве узлов сенсорной локальной сети используются элементы, мощность передающей части которых может изменяться, разные узлы сети могут характеризоваться различной мощностью передатчика. В результате может возникнуть ситуация, при которой из узла i в узел j сообщение может быть передано, а из j в i — не может. В результате присоединенная матрица графа, описывающего сенсорную локальную сеть, в общем случае является несимметричной.

Для начала рассмотрим случай, когда все узлы сенсорной локальной сети имеют одинаковую мощность передающей части. В этом случае присоединенная матрица графа сети является симметричной. Тогда возможные переходы в сети за один шаг описываются присоединенной матрицей $A = \{a_{ij}\}_{N \times N}$. Все возможные переходы от узла к узлу за два шага описываются квадратом присоединенной матрицы A^2 , за три шага — третьей степенью и т. д. Все возможные переходы в сети за любое число шагов от 1 до N определяются суммой всех степеней присоединенной матрицы от 1 до N .

Таким образом, достижимость узлов сенсорной локальной сети определяется матрицей

$$D = \sum_{i=1}^N A^i, \quad (1)$$

которую назовем простой матрицей N -достижимости. Понятно, что в (1) A — присоединенная матрица графа, описывающего исследуемую сенсорную локальную сеть. В этом случае критерий достижимости i -го узла сети из любого другого, и наоборот, описывается условием

$$d_{ij} \neq 0, \quad i \neq j, \quad j = \overline{1, N}, \quad (2)$$

где N — число узлов исследуемой сети; d_{ij} — элемент, находящийся на пересечении i -й строки и j -го столбца матрицы D (1).

Критерием функциональной устойчивости сенсорной локальной сети является условие полной достижимости всех узлов сети, причем число возможных путей для каждого целевого узла должно быть более одного:

$$d_{ij} > 1, \quad i \neq j, \quad j = \overline{1, N}, \quad \dots, \quad i = \overline{1, N}. \quad (3)$$

В общем случае мощность передающей части различных узлов сети может быть различной, а следовательно, присоединенная матрица имеет произвольный вид. Для того чтобы оценить достижимость узлов сенсорной локальной сети с различной мощностью передатчиков узлов, необходимо сформировать более сложную матрицу:

$$C = \sum_{k=0}^{2N-1} \prod_{j=0}^{N-1} M_j(k), \quad (4)$$

где

$$M_j(k) = \begin{cases} A, & B_j(k) = 1; \\ A^T, & B_j(k) = 0; \end{cases} \quad (5)$$

$$B_j(k) = \begin{cases} 1, & k \& 2^j \neq 0; \\ 0, & k \& 2^j = 0; \end{cases} \quad (6)$$

A^T — транспонированная матрица A ;

$\&$ — побитовая операция над двоичными значениями (в данном случае, k и 2^j);

N — общее число узлов сенсорной локальной сети; $k = 0, \dots, 2^{N-1}$ — индекс, описывающий все возможные комбинации переходов в несимметричном графе сети (в сети с различной мощностью передатчиков в узлах).

Таким образом, комплексная матрица достижимости, построенная для произвольной присоединенной матрицы графа сети, определяется всеми возможными сочетаниями произведения прямой и транспонированной присоединенной матрицы графа сети.

Критерием функциональной устойчивости сенсорной локальной сети в случае произвольной присоединенной матрицы также является условие полной достижимости всех узлов сети, причем опять число возможных путей для каждого целевого узла должно быть более одного:

$$c_{ij} > 1, \quad i \neq j, \quad j = \overline{1, N}, \quad \dots, \quad i = \overline{1, N}, \quad (7)$$

где c_{ij} — элемент, находящийся на пересечении i -й строки и j -го столбца матрицы C (4).

Так как сенсорная локальная сеть строится из элементов, которые позволяют ей самоконфигурироваться, оценить структуру реальной сенсорной сети достаточно трудно, поскольку структура графа, описывающего такую сеть, зависит не только от числа и расположения узлов, но и от условий прохождения радиосигнала между узлами. Дополнительно усложняют оценку реальной структуры сенсорной сети различные значения мощности передатчиков узлов, которые могут быть установлены в процессе настройки сети управляющим (или управляемыми) узлом (узлами). Для получения объективной оценки показателей достижимости и функциональной устойчивости реальной сенсорной сети необходимо провести идентификацию ее структуры по результатам реальной работы. Для этого следует выполнить анализ всех пакетов (как информационных, передаваемых от обычных узлов — датчиков к выделенному управляющему узлу, так и управляющих пакетов, передаваемых в обратном направлении) за определенный интервал времени. Временной интервал должен быть достаточен для "проявления" в сенсорной сети по возможности всех возможных маршрутов прохождения пакетов. Для проведения такой идентификации пакеты, передаваемые в сети, должны быть снабжены информационным кадром, включающим в себя номер узла-источника и номера всех узлов, через который пакет прошел. Длина информационного кадра фиксирована — одно значение для узла-источника и N значений для элементов маршрута. В принципе, при передаче пакетов возможно образование циклов. Для исключения их в каждом узле должен анализироваться зафиксированный маршрут и, если в

маршруте обнаруживается собственный номер, что говорит о возникновении цикла, пакет ликвидируется. В этом случае N значений позволяют описать любой возможный маршрут в сети без циклов.

Идентификация структуры сенсорной сети для оценки ее функциональной устойчивости

Выполнение идентификации сенсорной локальной сети проводится следующим образом [2]:

- для каждого сообщения из выборки строятся цепочки прохождения узлов сети;
- на основании этих цепочек строится граф сенсорной сети по следующему правилу:
 - к элементу оценки ассоциированной матрицы графа сети \hat{a}_{ij} добавляется единица, если в исследуемом маршруте имеется переход из i -го узла сети в j -й;
 - предыдущий пункт выполняется для всех переходов всех тестовых маршрутов;
 - после анализа всех переходов всех маршрутов все элементы полученной ассоциированной матрицы делятся на число проанализированных маршрутов;
- в результате получается оценка ассоциированной матрицы графа исследуемой сенсорной локальной сети.

Понятно, что предложенный метод идентификации дает в результате достаточно грубую оценку ассоциированной матрицы графа исследуемой сети, так как из-за возможного наличия множественных путей в каждом маршруте реализуется только один конкретный. Для идентификации полной ассоциированной матрицы графа сенсорной сети необходимо предусмотреть поочередное отключение отдельных узлов сети и их комбинаций [2].

Реализация алгоритма идентификации сенсорной сети для оценки ее функциональной устойчивости

Для реализации предложенного алгоритма была разработана программа на языке C++.

Для работы программы необходим набор тестовых или реальных маршрутов сообщений, прошедших через исследуемую сеть. В случае идентификации реальной сенсорной локальной сети используются реальные наборы маршрутов. Для тестового прогона программы использовался выход модели сенсорной локальной сети, также реализованной в виде программы [2].

На рис. 1 показано окно для ввода матрицы модели сенсорной локальной сети. На рис. 2 представлен результат работы программы идентификации.

Как видно из рисунков, в идентифицированной матрице присутствуют не все элементы исходной матрицы, а некоторые присутствующие имеют меньшие значения, чем в исходной.

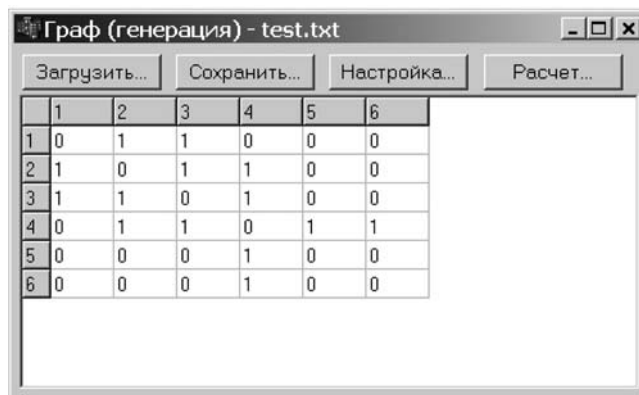


Рис. 1. Ввод матрицы в программу моделирования сети

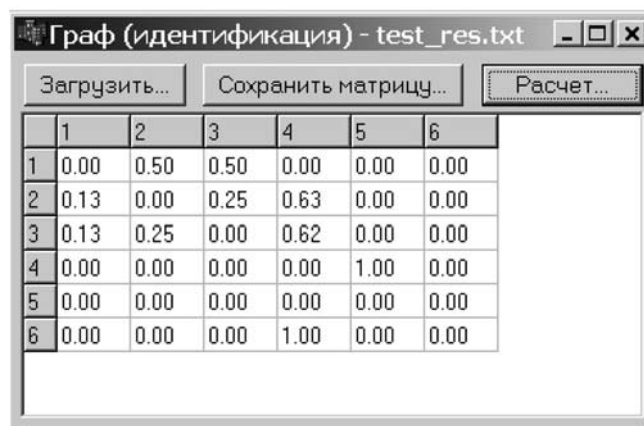


Рис. 2. Результат идентификации ассоциированной матрицы графа сенсорной сети

Как уже было сказано, причины этого заключаются в том, что не все узлы и не всегда участвовали в передаче тестовых сообщений.

В том случае, когда проводится идентификация реальной сенсорной локальной сети, по результатам идентификации могут быть построены критерии достижимости и функциональной устойчивости исследуемой сети.

Заключение

В статье предложен критерий оценки функциональной устойчивости сенсорной локальной сети, основанный на показателях достижимости любого узла сети из любого другого. Предложен алгоритм идентификации сенсорной локальной сети по результатам прохождения реальных или тестовых сообщений.

Использование поочередного отключения отдельных узлов сети и их комбинаций позволит оценить критические места сенсорной сети. Эти оценки могут использоваться для выработки стратегии коррекции конфигурации сети.

Список литературы

1. Баранов М. А., Зеленко Г. В., Рошин А. В. Проблемы маршрутизации сообщений в сенсорной локальной сети // Информационные технологии. 2014. № 11. С. 8–12.
2. Баранов М. А., Зеленко Г. В., Рошин А. В., Степанова И. В. Проблемы идентификации сенсорной локальной сети. Актуальные проблемы аппаратно-программного и информационного обеспечения науки, образования, культуры и бизнеса // VII международная научно-практическая интернет-конференция, 28–30 апреля 2015. М.: МГУПИ, 2015. [Электронный ресурс]. URL: http://it-4-mgupi.ru/conference/iconf_about.html
3. Семеняк М. В., Федоров В. К. Вариация энтропии как аналог функции Ляпунова в статистическом анализе функциональной устойчивости. [Электронный ресурс]. URL: vestnik.omgau.ru/wp-content/files/7_12.pdf
4. Королев А. Н., Тарасов А. А. О функциональной устойчивости навигационно-информационных систем. [Электронный ресурс]. URL: <http://studik.net/o-funkcionalnoj-ustojchivosti-navigacionno-informacionnyx-sistem/>

5. Машков О. А., Самчишин О. В. Современные проблемы развития теории функционально устойчивых сложных систем управления. [Электронный ресурс]. URL: [dspace.nbuu.gov.ua>bitstream/handle/123456789/](http://dspace.nbuu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/)
6. Машков О. А. О функциональной устойчивости бортовых информационно-управляющих комплексов // Вопросы повышения эффективности и качества систем управления полетом и навигации воздушных судов. К.: КИИГА, 1990. С. 79–83.
7. Бородакий Ю. В., Тарасов А. А. О функциональной устойчивости информационно-вычислительных систем // Изв. Южного федерального университета. Технические науки. 2006. Т. 62. Вып. № 7. [Электронный ресурс]. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/o-funktsionalnoj-ustojchivosti-informatsionno-vychislitelnyh-sistem>
8. Айзерман М. А., Гусев Л. А., Смирнова И. М., Петров С. В. Динамический подход к анализу структур, описываемых графами (основы графодинамики) // Автоматика и телемеханика. 1977. № 7. С. 135–151.
9. Саати Т. Л. Математические модели конфликтных ситуаций. М.: Советское радио. 1977. 304 с.
10. Оре О. Теория графов. М.: Наука, 1980. 336 с.

G. V. Zelenko, Professor,

Moscow State University of Information Technologies, Radio Engineering and Electronics,

A. D. Ivannikov, Deputy Director for Research of the Institute for Design Problems
in Microelectronics of Russian Academy of Sciences,

D. Yu. Kogan, Chief Engineer of "Elitex" LLC,

A. V. Roshchin, Professor, e-mail: aleksey_roschin@mail.ru,

Moscow State University of Information Technologies, Radio Engineering and Electronics

Problems of Functional Stability in Sensor Network

The paper proposes the criterion for evaluating the functional stability of the sensor network, based on the reachability of any network node from any other. The existing papers of the systems' functional stability research were analyzed.

It is shown that cited papers did not propose suitable constructive criteria of functional stability. Functional stability criteria are considered for the sensor network with symmetrical and asymmetrical attached matrix of the network graph. It is shown that for an objective evaluation of functional stability and attainability of real sensor network, one must identify its structure as a result of real work. To do this, an analysis of all packets sent over a certain period of time is required. The analysis period should be sufficient for the development of all possible routes of the network packets. Since the transmission of packets in a sensor network can create loops, the special measures are provided to avoid those loops. An algorithm for the identification of the sensor network as a result of the passage of real or test messages is proposed.

Keywords: sensor network, reachability, functional stability

References

1. Baranov M. A., Zelenko G. V., Poshchin A. V. Problemy marshrutizatsii soobshhenij v sensornoj lokal'noj seti, *Informacionnyye tehnologii*, 2014, no. 11, pp. 8–12.
2. Baranov M. A., Zelenko G. V., Roshchin A. V., Stepanova I. V. Problemy identifikatsii sensornoj lokal'noj seti. Aktual'nye problemy apparatno-programmnogo i informacionnogo obespecheniya nauki, obrazovaniya, kul'tury i biznesa. *VII mezhdunarodnaja nauchno-prakticheskaja internet-konferencija*, 28–30 aprelja 2015. M.: MGUPI, 2015. [Elektronnyj resurs]. URL: http://it-4-mgupi.ru/conference/iconf_about.html
3. Semenjak M. V., Fedorov V. K. *Variacija entropii kak analog funktsii Lyapunova v statisticheskom analize funkcional'noj ustojchivosti*. [Elektronnyj resurs]. URL: vestnik.omgau.ru/wp-content/files/7_12.pdf
4. Korolev A. N., Tarasov A. A. *O funkcional'noj ustojchivosti navigacionno-informacionnyh sistem*. [Elektronnyj resurs]. URL: <http://studik.net/o-funkcionalnoj-ustojchivosti-navigacionno-informacionnyx-sistem/>

5. Mashkov O. A., Samchishin O. V. *Sovremennye problemy razvitiya teorii funkcional'no ustojchivyh slozhnyh sistem upravlenija*. [Elektronnyj resurs]. URL: [dspace.nbuu.gov.ua>bitstream/handle/123456789/](http://dspace.nbuu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/)
6. Mashkov O. A. O funkcional'noj ustojchivosti bortovyh informacionno-upravljajushih kompleksov, *Voprosy povysheniya effektivnosti i kachestva sistem upravlenija poletom i navigacii vozduzhnyh sudov*. Kiev: KIIGA, 1990, pp. 79–83.
7. Borodakij Ju. V., Tarasov A. A. O funkcional'noj ustojchivosti informacionno-vychislitel'nyh sistem. *Izvestija Juzhnogo federal'nogo universiteta. Tehnicheskie nauki*, 2006, vol. 62, vyp. 7. [Elektronnyj resurs]. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/o-funktsionalnoj-ustojchivosti-informatsionno-vychislitelnyh-sistem>
8. Ajzerman M. A., Gusev L. A., Smirnova I. M., Petrov S. V. *Dinamicheskij podhod k analizu struktur, opisываемых графами (основы графодинамики)*, *Avtomatika i telemehanika*, 1977, no. 7, pp. 135–151.
9. Saati T. L. *Matematicheskie modeli konfliktnyh situacij*. Moscow: Sovetskoe Radio. 1977. 304 p.
10. Ore O. *Teorija grafov*. Moscow: Nauka, 1980. 336 p.