УДК 004.052.3

Об оценке функциональной устойчивости динамической сенсорной локальной сети

Г.В. Зеленко, М.А. Кадиев, А.В. Рощин

Московский государственный университет информационных технологий, радиотехники и электроники, genn.vad70@yandex.ru, kadiev_m@mirea.ru, aleksey_roschin@mail.ru

***Аннотация* — В докладе предложена методика оценки функциональной устойчивости динамической сенсорной локальной сети, основанная на прогнозе эволюции ее структуры по результатам анализа динамики движения узлов.**

***Ключевые слова* — сенсорная сеть, достижимость, функциональная устойчивость, динамическая модель, идентификация.**

I. Введение

В настоящее время все большее распространение получают сенсорные локальные сети. Они используются как для создания различных распределенных систем контроля (пример тому – системы контроля и управления «умным домом»), так и для оперативного управления динамическими распределенными системами (например, командой спасателей). Если первый тип систем можно отнести к статическим, так как узлы такой системы пространственно зафиксированы или мало подвижны, то второй тип относится скорее к динамическим, в первую очередь потому, что узлы сети такой системы активно перемещаются, что может существенно повлиять на работоспособность сенсорной сети и системы в целом.

В настоящем докладе рассматриваются системы второго типа. Они отличаются ярко выраженной динамикой, связанной, прежде всего, с активным движением узлов сети (членов команды). Работоспособность сенсорной сети в этом случае во многом определяет успешность работы такой команды. Поэтому необходимо иметь эффективные методы оценки ее функциональной устойчивости, то есть, сохранения работоспособности сенсорной локальной сети в течение заданного интервала времени. Понятие функциональная устойчивость, используемое в докладе, подразумевает «простую возможность исполнения сенсорной локальной сетью своего предназначения, а именно, возможность прохождения информационных пакетов от обычных узлов сети к выделенным «управляющим», и управляющих пакетов от выделенных управляющих улов к обычным» [1, 2].

Чаще всего узлы сенсорных сетей таких систем снабжаются датчиками пространственного положения (чаще GPS, иногда ГЛОНАСС или комбинированные). Этот факт позволяет использовать не только косвенные признаки для оценки функциональной устойчивости сети [1, 2], но и прямые – взаимное расположение улов сети в пространстве.

II. Формирование критерия достижимости для сенсорной сети

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

Как и любой другой, граф сенсорной локальной сети описывается парой $X = [x_1, x_i, \dots x_M]$ – множеством вершин, описывающим множество узлов сети, и присоединенной матрицей A, описывающей связи между вершинами [3, 4]. 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 показано в [1, 2], «необходимым условием функционирования сенсорной локальной сети является, безусловная достижимость любого узла сети любым другим. То есть, понятие функциональной устойчивости основано на такой достижимости: сенсорная локальная сеть является функционально устойчивой, если существует путь длиной от 1 до M (где M – количество узлов сети) из любого узла сети до любого другого. Чем больше путей возможно между узлами, тем более функционально устойчивой является сенсорная локальная сеть».

III. Критерий функциональной устойчивости сенсорной сети

Как уже говорилось, в докладе понятие функциональной устойчивости формулируется более строго, чем в [2] – обеспечение взаимной достижимости узлов сенсорной сети в течение заданного интервала времени.

Точечная (в конкретный момент времени) достижимость узлов сенсорной локальной сети с одинаковой мощностью передатчиков узлов определяется матрицей [2]

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

которая называется простой матрицей M -достижимости. В (1) A – присоединенная матрица графа исследуемой сенсорной локальной сети, элементы которой a_{ij} характеризуют эффективную скорость передачи. В этом случае точечная оценка критерия полной достижимости i -го узла сети из любого другого, и наоборот, описывается условием:

$$d_{ij} > 0, i \neq j, i = 1...M,, i = 1...M , \quad (2)$$

где M – количество узлов исследуемой сети,

d_{ij} – элемент, находящийся на пересечении i -той строки и j -того столбца матрицы D (1).

Так как в общем случае мощность передатчиков узлов сети может устанавливаться различной, присоединенная матрица графа сети может быть произвольной. Для получения точечной оценки достижимости узлов сенсорной локальной сети в этом случае необходимо сформировать более сложную матрицу [2]:

$$C = \sum_{k=0}^{2^M - 1} \prod_{j=0}^{M-1} Pj(k) , \quad (3)$$

где: $P_j(k) = \begin{cases} A, B_j(k) = 1 \\ A^T ,. B_j(k) = 0 \end{cases}$, (4)

$$B_j(k) = \begin{cases} 1, k \,\&\, 2^j \neq 0 \\ 0, k \,\&\, 2^j = 0 \end{cases} , \quad (5)$$

A^T – транспонированная матрица A,

& – побитовая операция над двоичными значениями (в данном случае, k и 2^j),

M – общее количество узлов сенсорной локальной сети,

$k = (0...2^{M-1})$ – индекс, описывающий все возможные комбинации переходов в сети с различной мощностью передатчиков в узлах.

Точечная оценка критерия полной достижимости всех узлов сети в этом случае имеет вид [2]:

$$c_{ij} > 0, i \neq j, i = 1...M,, i = 1...M , \quad (6)$$

где c_{ij} – элемент, находящийся на пересечении i -той строки и j -того столбца матрицы C (3).

Будем считать сенсорную локальную сеть функционально устойчивой, если условие (6) выполняется для всех моментов t_s интервала функционирования системы $[t_0, t_1, ..., t_N]$.

Так как в докладе рассматривается сенсорная локальная сеть динамической системы, то есть, сеть, узлы которой могут перемещаться в пространстве, присоединенная матрица графа сети не будет постоянной [5], равно, как и все матрицы достижимости, полученные из присоединенной матрицы. Таким образом, мы имеет присоединенную матрицу $A(t_s) = \{a_{ij}(t_s)\}_{M \times M}, t_s \in [t_0 ... t_N]$, которая является теперь функцией времени. Функциями времени будут также матрицы достижимости $D(t_s) = \{d_{ij}(t_s)\}_{M \times M}, t_s \in [t_0 ... t_N]$ и $C(t_s) = \{c_{ij}(t_s)\}_{M \times M}, t_s \in [t_0 ... t_N]$.

IV. Исследование функциональной устойчивости системы с динамической сенсорной локальной сетью

При исследовании функциональной устойчивости системы с динамической сенсорной локальной сетью будем исходить из того, что каждый узел знает свое пространственное положение (с помощью GPS или ГЛОНАСС модуля) и передает свои координаты главному управляющему узлу в каждом информационном пакете. Кроме того, будем считать, что возможность радиосвязи между модулями определяется расстоянием между ними. Конечно, на прохождение радиоволн влияют условия окружения каждого модуля, но формально учесть это влияние затруднительно.

В этой ситуации наличие связи между узловыми модулями x_i и x_j однозначно определяется мощностями передатчиков этих модулей и расстоянием между узлами. Так как мощности передатчиков модулей могут быть различны, то условие несимметрично. Так, связь модуля x_i с модулем x_j, определяемая мощностью передатчика узла x_i, возможна, если расстояние между модулями не более r_i. Связь же модуля x_j с модулем x_i, определяемая мощностью передатчика модуля x_j, возможна, если расстояние между модулями не более r_j. Связь между значениями допустимых дистанций r_i, r_j и мощностью передатчиков соответствующих узловых модулей определяется техническими данными передатчиков, и здесь рассматриваться не будет. Нам достаточно знать, что каждому уровню мощности передатчика узлового модуля соответствует допустимое максимальное расстояние между модулями, при котором обеспечивается надежная связь. Так как уровень мощности передатчика каждого модуля может быть различным и изменяться во времени по сигналам от главного управляющего модуля, для каждого момента времени мы имеем вектор допустимых дистанций $R(t_s) = [r_1(t_s) \quad \cdots \quad r_M(t_s)]^T, t_s \in [t_0 ... t_N]$.

Предполагается также, что в начале интервала наблюдения $[t_0 ... t_N]$ сенсорная локальная сеть работоспособна, и все информационные и управляющие сообщения проходят от узлов-источников к узлам назначения. При этом каждое информационное или управляющее сообщение содержит данные о координатах каждого узла маршрута.

Методика исследования функциональной устойчивости динамической сенсорной локальной сети основана на анализе изменения координат узлов сети, прогнозировании положения узлов в следующий момент времени и попарной проверке прогнозируемых расстояний между узлами на условие обеспечения надежной связи. По результатам такой проверки строится прогнозная ассоциированная матрица графа сенсорной сети, по которой строятся матрицы достижимости, и делается вывод о функциональной устойчивости сети. Если условия полной достижимости на следующем шаге удовлетворяются, то сенсорная сеть является функционально устойчивой. В противном случае делается вывод о возможном нарушении функциональной устойчивости сети, и принимаются меры для улучшения ситуации. Если обнаружено, что связь узла x_i с узлом x_j может прерваться, управляющий узел дает команду увеличить мощность передатчика *i*-того узла. Если мощность его передатчика уже имела максимальное значение, дается команда *i*-тому и/или *j*-тому члену команды, соответственно, изменить положение. Решения о перемещениях членов команды, а, следовательно, и соответствующих узлов сети, принимаются в зависимости от ситуации и решаемой задачи. В докладе проблемы принятия описанных решений не рассматриваются. Здесь решается задача обнаружения ситуации, когда могут быть нарушены условия полной достижимости, и значит, потеряна функциональная устойчивость сенсорной сети.

Для осуществления прогноза состояния сенсорной сети, строится динамическая модель движения каждого из узлов сети. При этом каждой вершине графа сети x_i ставится в соответствие вектор состояния:

$$y^i(t_s) = \begin{bmatrix} y_1^i(t_s) \\ \vdots \\ y_\nu^i(t_s) \end{bmatrix}, \qquad (7)$$

где ν – количество компонентов вектора состояния, определяемое порядком динамической модели движения узла.

Вообще говоря, порядок динамической модели может быть достаточно высоким, однако, учитывая слабо детерминированный характер движения членов команды (то есть, узлов сети) имеет смысл ограничиться одним порядком для каждой координаты в пространстве, в итоге – третьим порядком. В этом случае вектор состояния (7) будет иметь размерность 3.

Уравнение движения узла описывается разностным уравнением

$$y^i(t_{s+1}) = \Phi^i y^i(t_s), y^i(t_0), i = 1...M, s = 0...(N-1), \qquad (8)$$

где Φ^i – матрица перехода динамической модели i-того узла сети,

M – количество узлов сети (членов команды),

N – количество наблюдаемых моментов времени.

Как видно из (8), в описании модели отсутствует уравнение наблюдения. Это связано с использованием модели минимального порядка. В этом случае измерению подлежат сами координаты узла, а, следовательно, компоненты вектора состояния.

Если матрица перехода динамической системы (8) известна, то прогноз положения узла i в момент времени $s+1$ по измерениям координат в момент s описывается уравнением

$$\hat{y}^i(t_{s+1}) = \Phi^i y^i(t_s), \qquad (9)$$

где $\hat{y}^i(t_{s+1})$ – оценка координат i-того узла сети на шаге $s+1$.

По прогнозам координат всех узлов сенсорной сети в момент $s+1$ строится ассоциированная матрица графа сети следующим образом:

$$\begin{aligned} &\left\| \hat{y}^i(t_{s+1}) - \hat{y}^j(t_{s+1}) \right\|^2 < r_i(t_s) \to \hat{a}_{ij}(t_{s+1}) = 1, \\ &\left\| \hat{y}^i(t_{s+1}) - \hat{y}^j(t_{s+1}) \right\|^2 \ge r_i(t_s) \to \hat{a}_{ij}(t_{s+1}) = 0, \qquad (10) \\ &\hat{A}(t_{s+1}) = \{\hat{a}_{ij}(t_{s+1})\},\ i = 1...M,\ j = 1...M, \end{aligned}$$

где

$$\left\| \hat{y}^i(t_{s+1}) - \hat{y}^j(t_{s+1}) \right\|^2 = [\hat{y}^i(t_{s+1}) - \hat{y}^j(t_{s+1}]^T [\hat{y}^i(t_{s+1}) - \hat{y}^j(t_{s+1}]$$

– означает обычную евклидову норму, характеризующую расстояние между точками в трехмерном пространстве.

Как только оценка ассоциированной матрицы графа сенсорной сети на $s+1$ шаге найдена, ищется оценка матрицы достижимости на том же шаге $\hat{C}(t_{s+1}) = \{\hat{c}_{ij}(t_{s+1})\}_{M \times M}$, для которой проверяется условие полной достижимости:

$$\hat{c}_{ij}(t_{s+1}) > 0, i \ne j, i = 1...M,, i = 1...M. \qquad (11)$$

Если условие выполнено, система до шага $s+1$ является функционально устойчивой. Если условие не выполнено, проводятся мероприятия по восстановлению функциональной устойчивости, как это было описано выше.

Мы рассмотрели получение прогнозной оценки ассоциированной матрицы (10), считая, что переходная матрица динамической системы (9) известна. На самом деле эта матрица чаще всего неизвестна. Посмотрим, как можно найти эту матрицу по измерениям вектора состояния $y^i(t_s)$, $s=0,1...s$ [6].

Рассмотрим уравнение динамики i -того узла сети на первых трех шагах (не забываем при этом, что размерность вектора состояния $y^i(t_s)$ равна трем):

$$\begin{cases} y^i(t_1)=\Phi^i y^i(t_0), \\ y^i(t_2)=\Phi^i y^i(t_1), \\ y^i(t_3)=\Phi^i y^i(t_2). \end{cases} \tag{12}$$

Иначе эти уравнения можно записать в матричной форме:

$$\begin{aligned} &[y^i(t_1) \quad y^i(t_2) \quad y^i(t_3)] = \\ &= \Phi^i\,[y^i(t_0) \quad y^i(t_1) \quad y^i(t_2)]. \end{aligned} \tag{13}$$

Обозначив матрицы, составленные из измеренных векторов $\hat{y}^i(t_s)$, как

$$Y^i(t_{s-1})=[y^i(t_{s-3}) \quad y^i(t_{s-2}) \quad y^i(t_{s-1})], \tag{14}$$

получим уравнение (13) в следующем виде:

$$Y^i(t_s)=\Phi^i Y^i(t_{s-1}),\ s\ge 3. \tag{15}$$

Если измеренные векторы $y^i(t_{s-2}), y^i(t_{s-1}), y^i(t_s)$ линейно независимы, то матрица $Y^i(t_s)$, составленная из них, квадратная и неособая, что позволяет получить оценку переходной матрицы динамической модели i - того узла сети:

$$\hat{\Phi}_s^i = Y^i(t_s)[Y^i(t_{s-1})]^{-1}. \tag{16}$$

После того, как оценки переходных матриц $\hat{\Phi}^i(t_s)$ динамических моделей для всех узлов сети получены, находятся прогнозные значения положения для каждого узла согласно (9), строятся оценки ассоциированной матрицы графа сети $\hat{A}(t_{s+1})$ согласно (10) и оценка матрицы достижимости $\hat{C}(t_{s+1})$ согласно (3), (4), (5). Затем проверяются условия полной достижимости согласно (11). При выполнении условий делается вывод о функциональной устойчивости сенсорной локальной сети на интервале $[t_0, t_{s+1}]$. В противном случае выполняются мероприятия по восстановлению полной достижимости, как это было описано выше.

В случае, если измеренные векторы окажутся линейно зависимы (это может случиться, в частности, при неподвижном узле), то в качестве прогнозного значения положения целесообразно взять текущее положение.

V. Заключение

В докладе предложен метод оценки функциональной устойчивости динамической сенсорной локальной сети, основанный на показателях достижимости любого узла сети из любого другого на всем интервале функционирования. Предложен метод прогнозирования ассоциированной матрицы графа сенсорной локальной сети по данным о пространственном положении узлов сети. Предложен также критерий функциональной устойчивости сети, основанный на полученных прогнозных оценках.

Литература

[1] Баранов М.А., Зеленко Г.В., Рощин А.В. Проблемы маршрутизации сообщений в сенсорной локальной сети // Информационные технологии. 2014. №11. С. 8 - 12.

[2] Баранов М.А., Зеленко Г.В., Рощин 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] – Режим доступа: http://it-4-mgupi.ru/conference/iconf_about.html

[3] Саати Т.Л. Математические модели конфликтных ситуаций. М.: Советское Радио. 1977. 304 с.

[4] Оре О. Теория графов. М.: Наука, 1980. – 336 с.

[5] 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,

[6] Ли Р. Оптимальные оценки, определение характеристик и управление. – М.: Наука, 1966. – 178 с..

Assessment of Functional Stability of the Dynamic Sensor Network

G.V. Zelenko, A.R. Kadiev, A.V.Roshchin

Moscow State University of Information Technologies, Radio Engineering and Electronics,
genn.vad70@yandex.ru, kadiev_m@mirea.ru, aleksey_roschin@mail.ru

Keywords — sensor network, reachability, functional stability, dynamic model, identification.

Abstract

The presentation proposes a method for estimating of functional stability of dynamic system based on sensor LAN. The object of study is a dynamic distributed system such as rescue team.

These systems are considered dynamic because their nodes actively move and it significantly affects the operability of sensor LAN and the whole system in general.

The proposed method of functional stability estimation is based on the indicators of intermeshed reachability of all network nodes during the entire time of operation.

The prognosis of the graph's full reachability matrix at time step (s+1) is computed by the prognosis of the graph's associated matrix, that in turn is computed by the nodes' position data measured before time step (s) using the proposed method.

The criterion of functional stability of the network is based on the computed prognosis. The dynamic model of the nodes' movement is identified by measurement of their coordinates during several time steps.

References

[1] M.A. Baranov, G.V. Zelenko, A.V. Roshchin Problems of message routing in sensor network // Informacionnye tehnologii. 2014. No. 11. pp. 8 - 12 (in Russian).

[2] M.A. Baranov, G.V. Zelenko, A.V. Roshchin, IV Stepanova Problemy identification sensor network. Actual problems of hardware and software package and information science, education, culture and business: VII International Scientific and Practical Internet Conference on April 28-30, 2015. Moscow, MGUPI, 2015. Available at: http://it-4-mgupi.ru/conference/iconf_about.html (accessed 23.11.2015) (in Russian).

[3] T.L. Saati Mathematical models of conflict situations. Moscow, Sovetskoe Radio. 1977. 304 p. (in Russian).

[4] O Ore Graph Theory. Moscow, Nauka, 1980. 336 p. (in Russian).

[5] MA Yzerman, LA Gusev, IM Smirnova, SV Petrov A dynamic approach to the analysis of structures described graphs (grafodinamiki basics). Avtomatika i telemehanika. 1977. No. 7. pp. 135-151 (in Russian).

[6] R Li Optimal Estimation, Identification and Control. – Moscow, Nauka, 1966. – 178 p. (in Russian).