

3. Рвачев, В. Л. Алгебра логики и интегральные преобразования в краевых задачах [Текст] / В.Л. Рвачев, А.П. Слесаренко. - Киев: Наук. думка, 1976. - 288 с
4. Рвачев, В. Л. Теория R-функций и некоторые ее приложения [Текст] / В.Л. Рвачев. - Киев: Наук. Думка, 1982. - 552 с.
5. Слесаренко, А.П. Идентификация нелинейной нестационарной зависимости мощности источника энергии от температуры на базе вариационно-структурного и проекционного методов [Текст] / А.П. Слесаренко, Н.А. Сафонов // Проблемы машиностроения. - 2010. - Т.13, №6. - С. 58-63.
6. Ильин, В.П. Численные методы решения задач электрооптики [Текст] / В.П. Ильин. - Наука, сибирское отделение, 1974. - 202 с.
7. Ворожцов, Е.В. Сборник задач по теории разностных схем: Учеб. пособие [Текст] / Е.В. Ворожцов. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. - 41 с.
8. Слесаренко, А.П. Врахування особливостей у задачах пограничного шару на тілах складного профілю з сингулярними граничними умовами [Текст] / А.П. Слесаренко // Доп. АНУРСР, Сер. А – 1970. - №2. - С. 170-173.

Використовуючи теоретико-інформаційну концепцію різноманіття за К. Шенноном у рамках інформаційних систем, сформульовані умови забезпечення функціональної стійкості бездротових сенсорних мереж, що самоконфігуруються

Ключові слова: сенсор, мот, стійкість, квазіоптимальність

Используя теоретико-информационную концепцию многообразия по К. Шеннону в рамках информационных систем, сформулированы условия обеспечения функциональной устойчивости беспроводных самоконфигурируемых сенсорных сетей

Ключевые слова: сенсор, мот, устойчивость, квазиоптимальность

In this article being formulated conditions to provide the functional stability of the wireless self-configurable sensor network using information-theoretic concept of diversity in information systems by K. Shannon

Keywords: sensor, mote, stability, quasioptimality

УДК 519.72

ИНФОРМАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ ПРИ РАЗРАБОТКЕ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ (ЧАСТЬ 1)

В. А. Иваненко
Аспирантка*

E-mail: zlata_ne@bk.ru

А. Н. Зеленин

Кандидат технических наук, профессор*

*Кафедра «Сети связи»

Харьковский национальный университет радиозлектроники

пр. Ленина, 14, г. Харьков, 61166

Контактный тел.: (057) 345-00-83

1. Введение

В настоящее время в области информационных технологий одним из актуальных направлений является создание нового вида сетевых структур - сенсорных сетей (Sensor Network – SN). Беспроводные сенсорные сети (БСС, Wireless Sensor Network – WSN) [6], представляют собой самоорганизующиеся сети, состоящие из множества беспроводных сенсорных узлов (мотов, от англ. mote – пылинка) распределенных в пространстве определенным образом и предназначенных как для сбора соответствующей информации (об окружающей среде, состоянии объекта контроля и мониторинга и т.п.), так и для целей ретрансляции (передачи) информации от соседних мотов к соответствующему назначенно-

му сетевому узлу (координатору, маршрутизатору, головному, оконечному или любому другому узлу сети). Взаимодействие сенсорных узлов между собой формирует сенсорную сеть заданной топологии (рис. 1).

Сенсорная сеть размещается на ограниченной территории и по современным оценкам может содержать около 60 тысяч узлов. [5].

Проектирование и реализация WSN требует решения разноплановых сложных проблем, относящихся к различным областям исследований.

Важнейшей из проблем является обеспечение высокой отказоустойчивости сети (в дальнейшем будем использовать термин «функциональная устойчивость»). Важность этой проблемы именно для сенсорных сетей определяется рядом факторов

– ответственностью их применения (системы обороны и обеспечения безопасности, медицинский мониторинг, контроль окружающей среды, мониторинг промышленного оборудования и состояния сельскохозяйственных угодий), а также и ограничением в энергопотреблении узлов (практическая невозможность замены источников питания в сенсорных модулях).

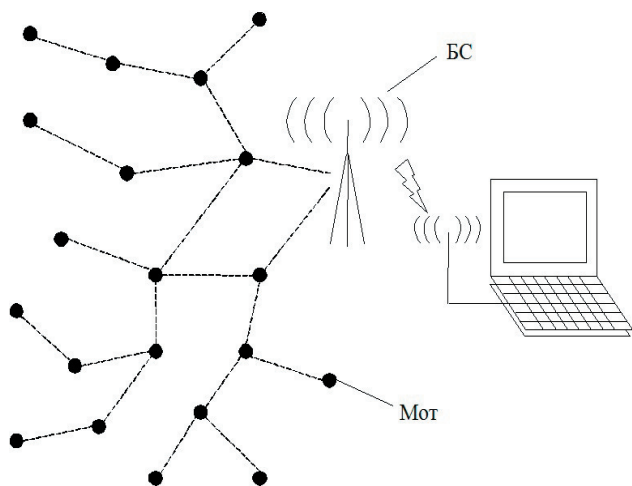


Рис. 1. Структура WSN

Все это свидетельствует о серьезных сложностях в процессе проектирования и развертывания эффективной WSN, так как это процесс не может быть формализован в виде predetermined набора правил, алгоритмов и стандартов, выполнение которых гарантирует построение WSN, удовлетворяющей некоторой совокупности общесистемных требований.

Такая ситуация приводит к доминированию эвристических подходов в разработке и постановке сенсорной сети, которые, в свою очередь, базируются на предыдущем опыте разработчиков. Однако специфика сенсорных сетей, в сравнении с другими (более традиционными информационными сетями), приводит к тому, что предыдущий опыт может оказаться не адекватным решаемым проблемам в предметной области конкретной WSN.

В сложившейся ситуации для формирования концептуальных представлений как о структуре WSN, так и о принципах ее функционирования целесообразно использовать идеи прикладной теории информации, так как и предыдущие телекоммуникационные сети, и WSN-структуры, по своей сути, являются информационными сетями связи (ИСС). Именно этот «информационный аспект» может стать фундаментальной «подсказкой» в формировании идеологической основы (концепции) в проектировании и развертывании конкретной WSN.

В дальнейшем рассмотрении мы, используя специфику теоретико-информационных представлений, попытаемся получить некоторые общие рекомендации по технологиям и структуре WSN, присущим всем сетям данного класса, независимо от «производственной направленности» каждой конкретной сети.

2. Функциональная устойчивость WSN

Функционирование реальных сенсорных сетей происходит в условиях, которые могут изменяться в достаточно широких пределах.

Учитывая то, что качество работы WSN (ее эффективность) зависит от условий, в которых она функционирует, актуальной становится проблема чувствительности (или критичности) показателей качества сенсорной сети к изменениям параметров этих условий.

Формализация указанной проблемы приводит к идеям устойчивости, формулируемым в классическом представлении следующим образом.

Предположим, что качество работы сети определяется вектором показателя качества

$$\bar{K} = \{K_1, \dots, K_i, \dots, K_n\}, \tag{1}$$

где K_i – частные показатели качества сети.

Условия функционирования WSN определяются параметрами условий

$$\bar{Y} = \{Y_1, \dots, Y_j, \dots, Y_m\}, \tag{2}$$

где Y_j – частные параметры условий (например, интенсивность потока вызовов, энергетический потенциал сенсоров, климатические и физические параметры среды и т.п.).

Вектор показателя качества (1) является некоторым функционалом вектора параметров условий функционирования (2):

$$\bar{K} = F(\bar{Y}), \tag{3}$$

В соответствии с [1], будем считать систему функционально устойчивой, если при сколь угодно малой области ϵ в (многомерном) пространстве показателей качества \bar{K} можно указать такую область $\delta(\epsilon)$ в (многомерном) пространстве параметров условий функционирования, что при нахождении конца вектора параметров условий функционирования \bar{Y} в любой точке области $\delta(\epsilon)$, конец вектора показателей качества \bar{K} не выйдет за пределы области ϵ .

С учетом несущественных для данного рассмотрения допущений можно утверждать, что для оптимальной системы при совокупности номинальных значений Y_j , т.е. для номинального вектора \bar{Y} , величина K имеет экстремальное K_{opt} , обычно равное максимальному (K_{max}), значению. При этом величина обобщенного показателя качества \bar{K} в результате изменения условий функционирования от номинального может отклониться только в худшую сторону, а «скорость» этого отклонения может характеризовать критичность качества системы к условиям ее функционирования.

Для придания большей наглядности последующему изложению рассмотрим следующую типовую ситуацию технического проектирования WSN:

1) сформулирована задача по функциональному назначению сети;

2) задан фиксированный набор номинальных условий, в которых сеть должна эксплуатироваться.

Задача состоит в том, чтобы на начальном этапе проектирования WSN сформулировать концепцию (предпосылки, условия), при которых возможно эффективное функционирование спроектированной сети во всех заданных условиях. Для этого сеть должна иметь возможность приспосабливаться к различным условиям. При этом многообразие условий определяется как многообразием заданных условий, так и их «малыми отклонениями» от номинальных значений, приводящих к дополнительному увеличению многообразия условий. Очевидно, что если многообразие заданных условий является функционально необходимым, то их вариации допустимо считать «внешним шумом».

Тогда, учитывая аддитивность информационных мер, общее количество информации, присущее технической системе (WSN), может быть представлено в виде

$$I_s = I + I_{ш} , \tag{4}$$

где I – информация, необходимая для приспособления к совокупности заданных условий работы сети (назовем ее функциональной), а $I_{ш}$ – «шумовая информация», непосредственно не связанная с задачами целенаправленного функционирования WSN, но необходимая для компенсации «шума», создаваемого случайными вариациями условий.

Из (4) следует, что количество функциональной информации в сети

$$I = I_s - I_{ш} , \tag{5}$$

где

$$I_s = -\sum_i P(i) \log_2 P(i) , \tag{6}$$

$$I_{ш} = -\sum_{i,j} P(i)P(j|i) \log_2 P(j|i) , \tag{7}$$

$P(j|i)$ – вероятность перехода i -го значения характеристики системы к j -му, что необходимо для приспособления системы к вариациям заданных условий функционирования.

Условные вероятности $P(j|i)$ в (7) сами подвержены случайным вариациям, обусловленным различными внутренними и внешними причинами, которые отобразим некоторой переменной q . Тогда вероятности

$P(j|i)$ в (7), а в общем случае и $P(i)$ в (6), можно рассматривать как функции q , а зависимость количества функциональной информации I (5) от q будет определяться выражением (8) [4].

$$\begin{aligned} \frac{dI_s}{dq} &= \left(-\sum_i P(i) \log_2 P(i) \right) \frac{d}{dq} = -\sum_i \left[\left(\frac{d}{dq} P(i) \right) \log_2 P(i) + P(i) \left(\frac{d}{dq} \log_2 P(i) \right) \right] = \\ &= -\sum_i \left[\left(\frac{d}{dq} P(i) \right) \frac{\ln P(i)}{\ln 2} + P(i) \frac{1}{P(i) \ln 2} \left(\frac{d}{dq} P(i) \right) \right] = -\frac{\log_2 e}{\log_2 2} \sum_i \left[\left(\frac{d}{dq} P(i) \right) \ln P(i) + \frac{d}{dq} P(i) \right] = \\ &= -\log_2 e \sum_i \left[1 + \ln P(i) \right] \frac{d}{dq} P(i). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dI_{ш}}{dq} &= \left(-\sum_{i,j} P(i)P(j|i) \log_2 P(j|i) \right) \frac{d}{dq} = \\ &= -\sum_{i,j} \left[\left(\frac{d}{dq} P(i) \right) P(j|i) \log_2 P(j|i) + P(i) \left(\frac{d}{dq} P(j|i) \right) \log_2 P(j|i) + P(i)P(j|i) \left(\frac{d}{dq} \log_2 P(j|i) \right) \right] = \\ &= -\sum_{i,j} \left[\left(\frac{d}{dq} P(i) \right) P(j|i) \frac{\ln P(j|i)}{\ln 2} + P(i) \left(\frac{d}{dq} P(j|i) \right) \frac{\ln P(j|i)}{\ln 2} + P(i)P(j|i) \frac{1}{P(j|i) \ln 2} \left(\frac{d}{dq} P(j|i) \right) \right] = \\ &= -\log_2 e \sum_{i,j} \left[P(j|i) \ln P(j|i) \frac{d}{dq} P(i) + P(i) \ln P(j|i) \frac{d}{dq} P(j|i) + P(i) \frac{d}{dq} P(j|i) \right] = \\ &= -\log_2 e \sum_{i,j} \left[P(i) \frac{d}{dq} P(j|i) + P(i) \ln P(j|i) \frac{d}{dq} P(j|i) + P(j|i) \ln P(j|i) \frac{d}{dq} P(i) \right]. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dI}{dq} &= -\log_2 e \sum_i \left[1 + \ln P(i) \right] \frac{d}{dq} P(i) + \\ &+ \log_2 e \sum_{i,j} \left[P(i) \frac{d}{dq} P(j|i) + P(i) \ln P(j|i) \frac{d}{dq} P(j|i) + P(j|i) \ln P(j|i) \frac{d}{dq} P(i) \right]. \tag{8} \end{aligned}$$

Если сеть спроектирована оптимально, то ее приспособление к фактическим изменяемым условиям функционирования будет происходить всегда наилучшим и, следовательно, *детерминированным* образом ($P(j|i)=1$) в зависимости от конкретных (с учетом случайных вариаций) условий функционирования.

Но если хотя бы одна из вероятностей $P(j|i)$ перехода i -ой характеристики к j -ой в (8) стремится к единице, то все остальные вероятности перехода от i -ой характеристики к k -ой ($k \neq j$) стремятся к нулю. При этом вторая сумма в (8) стремится к нулю и, следовательно, $\frac{dI}{dq} \rightarrow \infty$. Другими словами, оптимальная (в оговоренном смысле) сеть оказывается абсолютно неустойчивой к малейшим изменениям (вариациям) условий ее функционирования. С этих позиций проблему создания оптимальных систем можно рассматривать как некорректно поставленную (в смысле А.Н. Тихонова [3]) задачу. Речь может идти только о квазиоптимальных (асимптотически оптимальных) системах. При этом, для того чтобы система была функционально устойчивой, она обязательно должна быть в достаточной степени *неупорядоченной*. В этой связи уместно привести высказывание У.Р. Эшби [2]: «только разнообразие может уничтожить раз-

нообразии», причем это многообразие должно быть достаточным для того, чтобы скомпенсировать оговоренные выше многообразия условий – как функционально необходимое (определяемое заданным набором исходных условий), так и имеющее характер «шума» (обусловленное вариациями).

Введение неупорядоченности в поведение системы, необходимое для ее функциональной устойчивости, может быть реализовано двояким образом: либо переходы из одного состояния в требуемое другое состояние регламентированы не жестко (т.е. $P(j|i) < 1$), либо на жестко регламентированную систему связей и переходов ($P(j|i) = 1$) накладывается неупорядоченная система – «ультраструктура», вносящая в общую систему связей и переходов требуемую долю неупорядоченности.

Применительно к процессу проектирования WSN, высказанное заключение следует признать концептуальным.

Поэтому разработчику на начальном этапе формирования стратегии функционирования разрабатываемой WSN необходимо определиться с «сетевым уровнем» внесения этой неупорядоченности. Например:

1) *введение иерархии* – сеть мотов будет представлять собой «нулевой» уровень иерархии, на котором взаимодействие между узлами будет организовано детерминированным образом (стремится к оптимальному); следующим – «первым» – уровнем будет сеть головных узлов в условных

кластерах, взаимодействие которых между собой будет организовано случайным и ограничиваться только направлением к ближайшей базовой станции (БС), при этом, взаимодействие с «нулевым» уровнем как раз и будет вносить в него необходимую неупорядоченность с вероятностями перехода $P(j|i) < 1$;

2) *использование двух алгоритмов* – реализация взаимодействия мотов по неупорядоченному алгоритму может осуществляться параллельно с взаимодействием по наиболее оптимальному алгоритму, т.е. неупорядоченная наложенная ультраструктура является виртуальной.

3. Заключение

Полученный вывод о функциональной неустойчивости оптимальных систем может показаться довольно неожиданным, т.к. всереально существующие и длительно функционирующие телекоммуникационные сети, несомненно, в некотором смысле оптимальны. Однако, еще раз укажем на то, что используемый нами аспект оптимальности связан с определенной моделью, предполагающей условия оптимальности при обращении в экстремум *обобщенного* показателя качества (эффективности) сети. А выбор такой модели был обусловлен тем, что мы стремились получить *концептуальную подсказку* по условиям организации функционально устойчивой сети. И мы ее получили.

Литература

1. Ляпунов А.М. Общая задача об устойчивости движения [Текст]/ А.М. Ляпунов. – Харьков: Гостехиздат, 1950. – 386 с.
2. Эшби У.Р. Введение в кибернетику [Текст]: Пер. с англ./ У.Р. Эшби; Пер. В.А. Успенского. – М.: ИЛ, 1959. – 432 с.
3. Тихонов А.Н. Методы решения некорректных задач [Текст]: А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. – М.: Наука, 1974.
4. Коган И.М. Прикладная теория информации [Текст]: И.М. Коган. – М.: Радио и связь, 1981. – 216 с.
5. A. Mainwaring, J. Polastre, R. Szewczyk, D. Culler, J. Anderson. Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring [Electronic resource]: Computer Engineering Research Group. Electrical and Computer Engineering Department University of Toronto, 2003. – Electronic data (1 file). – Режим доступа: <http://www.eecg.toronto.edu/~ashvin/courses/ece1746/2003/reading/mainwaring-wsna02.pdf>. – Название с экрана.
6. А.О. Телятников, Кудр Латиф. Моделирование беспроводных сенсорных сетей [Электронный ресурс]: НБУ им. Вернадского, 2009. – Електрон. дан. (1 файл). – Режим доступа: http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/pit/2009_2/Telyat.htm. – Название с экрана.