

УДК 004.051

НИЖНЯЯ ГРАНИЦА ДЛИТЕЛЬНОСТИ ПЕРИОДА СБОРА ИНФОРМАЦИИ В СЕНСОРНОЙ СЕТИ

А. П. Шепета,

доктор техн. наук, профессор

Г. С. Евсеев,

канд. техн. наук, доцент

Е. А. Бакин,

ассистент

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Проводится оценка длины бесконфликтного расписания передач для сенсорных сетей с логической структурой «все-к-одному». Используется известная модель коллизий в пакетных радиосетях. Для оценки предлагается подход, основанный на построении графа конфликта передач и нахождении в нем клика. Методом имитационного моделирования анализируется точность предложенной оценки для сетей с произвольной топологией.

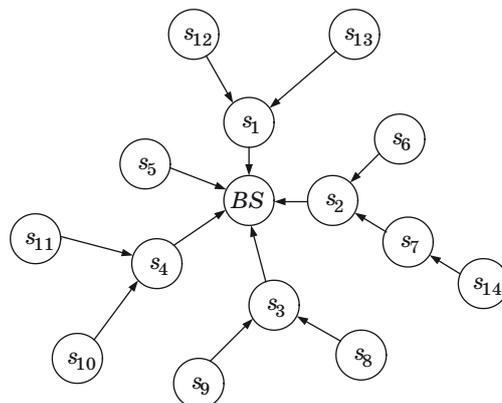
Ключевые слова — сенсорные сети, расписание передач, минимизация периода сбора информации.

Введение

В настоящее время существует значительное количество прикладных задач, для решения которых необходим контроль состояния большого числа объектов. Особой привлекательностью обладают системы контроля, использующие для передачи сообщений радиоканал. Миниатюризация элементной базы и прогресс технологий связи создали предпосылки для появления особого типа беспроводных систем передачи информации — сенсорных сетей. Как видно из названия, такая сеть состоит из множества автономных элементов — сенсоров. Сенсор включает в себя чувствительный элемент, регистрирующий изменение какого-либо физического параметра среды, блок обработки, приемопередатчик и элемент питания. Каждый сенсор может быть как источником сообщения, так и ретранслятором сообщений, поступающих от других сенсоров. Таким образом, использование сенсорных сетей позволяет передавать информацию на значительное расстояние при малой мощности передатчиков. Конечным пунктом доставки сообщений является базовая станция (БС). Таким образом, логической структурой сенсорной сети является структура «все-к-одному». Будем обозначать множество сенсоров сети как $S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$, где N — число сенсоров в сети, а БС в зависимости от удобства либо как BS , либо как s_0 (рис. 1).

Аппаратная составляющая типичного сенсора обладает следующими характерными особенностями: приемопередатчик сенсора маломощен (дальность связи не превышает, как правило, нескольких десятков метров), режим работы приемопередатчика полудуплексный, т. е. сенсор не может одновременно передавать и принимать сообщение, приемник сенсора одноканальный, т. е. возможен одновременный прием не более одного сообщения.

В данной работе рассматриваются сети с циклическим сбором данных. Время работы таких сетей можно условно поделить на *периоды сбора информации* (ПСИ). Длительности всех периодов равны между собой. В начале каждого ПСИ каж-



■ Рис. 1. Сенсорная сеть

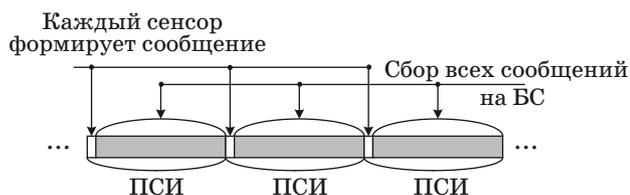


Рис. 2. Структура сбора информации в сети

Каждый сенсор формирует по сообщению, отражающему состояние контролируемого сенсором объекта. За оставшуюся часть ПСИ сформированные сенсорами сообщения поступают на БС (рис. 2). Пусть l_i — длина маршрута, соединяющего сенсор s_i и БС. Тогда в ходе ПСИ должно осуществиться

ровно $L = \sum_{i=1}^N l_i$ успешных передач. Обозначим это множество передач как P (мощность множества $|P| = L$).

Понятно, что оперативность сети определяется длительностью ПСИ, T . Чем меньше длительность ПСИ, тем чаще обновляется на БС информация о состоянии контролируемых объектов, а значит, более высокочастотные параметры можно контролировать. Сбор сообщений осложняется наличием помех, создаваемых одними передающими сенсорами другим. При этом одно или несколько сообщений могут оказаться искаженными, а передаваемая информация теряется. Такая ситуация называется *коллизией* (или *конфликтом*). Предлагается использовать *метод расписания* для борьбы с коллизиями.

Метод расписания

В методе расписания ПСИ делится на *слоты* — отрезки времени, равные длительности передачи одного сообщения (считается, что все сообщения, формируемые сенсорами, имеют равную длительность). В каждом слоте сенсор может либо передавать сообщение, либо принимать сообщение, либо находиться в спящем режиме. Обозначим $S_{\text{прд}}^i, S_{\text{прм}}^i, S_{\text{сп}}^i$ множества сенсоров, соответственно передающих сообщение, принимающих сообщение или находящихся в спящем режиме в i -м слоте ($S_{\text{прд}}^i \cup S_{\text{прм}}^i \cup S_{\text{сп}}^i = S, S_{\text{прд}}^i \cap S_{\text{прм}}^i = \emptyset$). Каждой из L передач назначается строго определенный слот. Назначение осуществляется таким образом, чтобы в каждом слоте с номером i множество осуществляемых в нем передач p_i было бесконфликтно (рис. 3). Пусть

ПСИ состоит из K слотов. Тогда $P = \bigcup_{i=1}^K p_i$.

Понятно, что может существовать множество бесконфликтных расписаний. Выбор конкрет-

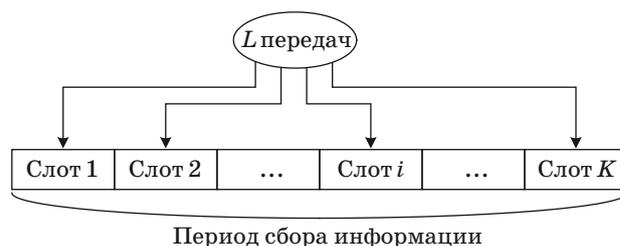


Рис. 3. Организация ПСИ при работе по расписанию

ного расписания осуществляется на основании используемого критерия. В данной работе основным критерием будет являться минимизация длины расписания K . Знание минимально возможной длительности ПСИ позволяет понять возможность сети выполнять возложенные на нее функции еще на этапе проектирования.

Модель коллизии

Рассматриваемые сети описываются следующим набором параметров:

- 1) $g_{i,j}$ (для $i, j = \overline{0, N}, i \neq j$) — набор коэффициентов передачи канала между всеми парами устройств сети;
- 2) $d_{i,j}$ (для $i, j = \overline{0, N}, i \neq j$) — набор расстояний между всеми парами устройств сети;
- 3) P_i (для $i = \overline{1, N}$) — мощность передатчика i -го сенсора (считается, что $P_1 = P_2 = \dots = P_N = P$);
- 4) N_{0i} (для $i = \overline{1, N}$) — средняя мощность внутреннего шума приемника i -го сенсора (считается, что $N_{01} = N_{02} = \dots = N_{0N} = N_0$);
- 5) q_i (для $i = \overline{1, N}$) — отношение сигнал/помеха в приемнике сенсора, при котором прием сообщения происходит с заданной достоверностью (считается, что $q_1 = q_2 = \dots = q_N = q$).

Тогда для бесконфликтности расписания для любой передачи $s_j \rightarrow s_i$ должно выполняться условие

$$\forall k = \overline{1, K}, \forall s_i \in S_{\text{прм}}^k : \frac{Pg_{j,i}}{\sum_{s_m \in (S_{\text{прд}}^k \setminus s_j)} Pg_{m,i} + N_0} \geq q. \quad (1)$$

В данной статье принята базовая модель канала, используемая во многих работах [1, 2]. В базовой модели ключевым параметром является радиус действия передатчика $r_{\text{прд}}$. Коэффициенты передачи канала оцениваются по следующей формуле:

$$g_{i,j} = \begin{cases} g_{\text{сл}}, & \text{если } d_{i,j} < r_{\text{прд}} \\ 0, & \text{если } d_{i,j} \geq r_{\text{прд}} \end{cases}, \quad (2)$$

где $g_{\text{сл}}$ — некоторая константа, большая или равная $\frac{N_0 q}{P}$. Таким образом, считается, что если два

сенсора находятся друг от друга на расстоянии меньше, чем $r_{\text{прд}}$, то при отсутствии помех от других передающих сенсоров между ними может быть установлена надежная связь. Мощность передаваемого сигнала за пределами радиуса действия считается пренебрежимо малой.

В указанных условиях сеть полностью описывается графом слышимости, узлы которого соответствуют сенсорам. Если пара сенсоров s_i и s_j находится друг от друга на расстоянии $d_{i,j}$ меньше, чем дальность действия передатчика $r_{\text{прд}}$, то пара соответствующих им узлов в графе соединяется ребром $e_{i,j}$. Обозначим граф слышимости как $G_{\text{сл}} = (S, E_{\text{сл}})$, где $E_{\text{сл}}$ — множество ребер сети ($E_{\text{сл}} \subseteq S \times S, e_{i,j} \in E_{\text{сл}}$, если $d_{i,j} < r_{\text{прд}}, |S| = N$). Обозначим множество соседей сенсора s_i в графе $G_{\text{сл}}$ как $C_{\text{сл}i}$.

Для данной модели условия бесконфликтной передачи (1) сводятся к следующему: у каждого принимающего сообщение сенсора должен быть ровно один передающий соседний сенсор:

$$\forall k = \overline{1, K}, \forall s_i \in S_{\text{прм}}^k : |S_{\text{прд}}^k \cap C_{\text{сл}i}| = 1. \quad (3)$$

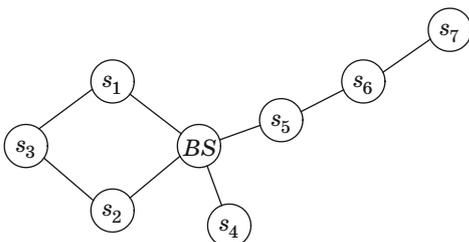
Нижняя граница длительности ПСИ

Вычислим нижнюю границу длительности ПСИ для описанной модели сенсорной сети. Очевидно, что длина расписания не может быть меньше чем N слотов. Это следует из того, что БС за время ПСИ должна получить N сообщений и не может получать больше одного сообщения за слот (иначе возникнет коллизия). Эту величину будем называть *абсолютной нижней границей* длительности ПСИ.

Знание топологии сети, а также маршрутов доставки сообщений позволяет существенно уточнить эту границу. Для этого введем понятие *задачи*. Под задачей $s_i \xrightarrow{N_{i,j}} s_j$ будем понимать процесс передачи $N_{i,j}$ сообщений сенсором s_i сенсором s_j . Каждую отдельную задачу будем обозначать символом z .

Выпишем все задачи, выполняемые в ходе ПСИ, и проиллюстрируем это на примере сети, изображенной на рис. 4.

Маршруты передачи сообщений следующие:
Сообщение от сенсора $s_1: s_1 \rightarrow BS$



■ Рис. 4. Пример сенсорной сети

Сообщение от сенсора $s_2: s_2 \rightarrow BS$

Сообщение от сенсора $s_3: s_3 \rightarrow s_1 \rightarrow BS$

Сообщение от сенсора $s_4: s_4 \rightarrow BS$

Сообщение от сенсора $s_5: s_5 \rightarrow BS$

Сообщение от сенсора $s_6: s_6 \rightarrow s_5 \rightarrow BS$

Сообщение от сенсора $s_7: s_7 \rightarrow s_6 \rightarrow s_5 \rightarrow BS$

Тогда список задач будет следующий:

$$z_1 : s_1 \xrightarrow{2} BS$$

$$z_2 : s_2 \xrightarrow{1} BS$$

$$z_3 : s_3 \xrightarrow{1} s_1$$

$$z_4 : s_4 \xrightarrow{1} BS$$

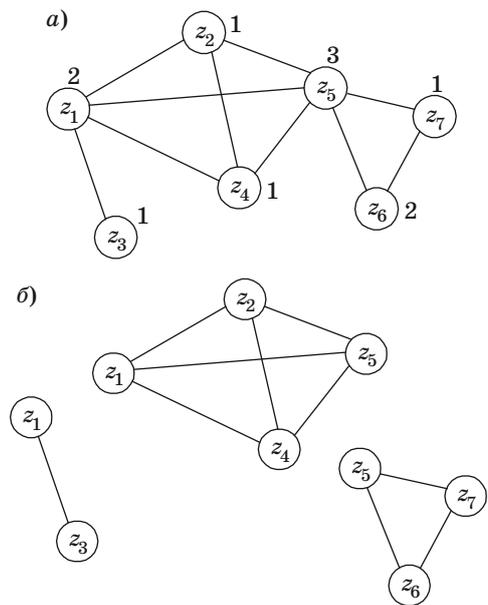
$$z_5 : s_5 \xrightarrow{3} BS$$

$$z_6 : s_6 \xrightarrow{2} s_5$$

$$z_7 : s_7 \xrightarrow{1} s_6$$

Составим *граф задач* Z , узлы которого будут соответствовать задачам. Количество передач, осуществляемых в задаче, является весом узла. Два узла в графе Z соединяются ребром в случае, если соответствующие данным узлам задачи не могут осуществляться одновременно (по причине коллизии). Пример подобного графа для сети, изображенной на рис. 4, приведен на рис. 5, а. Рядом с каждой вершиной графа указан ее вес.

В теории графов известно понятие «клика». Клика графа есть подмножество его вершин такое, что между каждой парой вершин этого подмножества существует ребро и, кроме того, это подмножество не принадлежит никакому большему подмножеству с тем же свойством [3]. Весом клики называется сумма весов ее вершин. Например, граф, изображенный на рис. 5, а, имеет 3 клики весом 3, 7 и 6 соответственно (рис. 5, б).



■ Рис. 5. Пример графа Z (а) и клики этого графа (б)



■ Рис. 6. Зависимость средней длительности ПСИ от числа сенсоров

Теорема. Для сенсорной сети невозможно составить расписание длительностью меньше, чем максимальный вес клики графа задач для данной сети.

Доказательство: Ни одна из задач, участвующих в клике, не может выполняться одновременно с любой другой из этой же клики. Значит, время выполнения всех задач из клики не может быть меньше, чем сумма времен выполнения каждой задачи. А это время равно весу клики, ч. т. д.

Для нахождения клик используется алгоритм Брона—Кербоша, основанный на методе ветвей и границ и считающийся на данный момент наиболее быстрым алгоритмом поиска клик [4]. Показано, что в худшем случае сложность алгоритма не превышает $O(3^{n/3})$ [5].

Чтобы ускорить работу алгоритма, можно для формирования графа задач использовать не все задачи, а только те, которые осуществляются сенсорами, находящимися на первых нескольких ярусах. Это несколько ухудшит точность оценки, однако существенно снизит время ее вычисления. В данной работе при использовании предложенной оценки учитываются только задачи, осуществляемые сенсорами, находящимися на расстоянии не больше трех от БС.

Проведем оценку точности предложенной границы. Для этого на случайных графах слышимости сенсорных сетей сравним граничное значение с длиной расписания, полученного одним из эвристических алгоритмов составления бесконфликтного расписания передач [6]. Этот алгоритм основан на известном подходе, называемом «составление расписания при помощи списка». В нем каждой передаче назначается некий приоритет. Составляется список передач, упорядочен-

ный в порядке уменьшения приоритета. Если в некотором слоте две передачи не могут быть осуществлены одновременно, выбирается та, чей приоритет выше. Расписание составляется путем многократного просмотра списка.

Для генерации случайной топологии сенсорной сети воспользуемся известным алгоритмом MIN-DPA [7]. Данный алгоритм отличается высоким быстродействием и позволяет осуществлять генерацию графов слышимости с заданным средним числом соседей у сенсоров.

Методом имитационного моделирования построим зависимость средней длины расписания от числа сенсоров в сети (рис. 6). Среднее число соседей узлов в графе слышимости равно 5.

Заключение

Результаты моделирования показали точность предложенной нижней границы (расхождение с результатами эвристического алгоритма не более 4 %). Использование предложенной оценки позволяет осуществить выбор топологии сети и маршрутов доставки сообщений на этапе проектирования сенсорной сети.

Литература

1. Chlamatic I., Kuttan S. Tree-based broadcasting in multihop radio network // IEEE Transactions on Computers. 1987. Vol. 11. N 10. P. 1209–1223.
2. Zhang Y., Gandham S., Huang Q. Distributed minimal time convergecast scheduling for small or sparse data sources // 28th IEEE Intern. Real-Time Systems Symp. 2007. P. 301–310.
3. Харари Ф. Теория графов. — М.: УПСС, 2003. — 300 с.
4. Bron C., Kerbosh J. Finding all cliques of an undirected graph // Comm. of ACM. 1973. Vol. 16. N 6. P. 575–577.
5. Tomita E., Tanaka A., Takahashi H. The worst-case time complexity for generating all maximal cliques and computational experiments // Theoretical Computer Science. 2006. Vol. 363. P. 28–42.
6. Bakin E. Algorithm of schedule calculation for centralized sensor network // Forum Modern information society formation — problems perspectives, innovation approaches: Proc. of the Intern. Forum, St. Petersburg, June 6–11 / SUAI. SPb., 2010. P. 112.
7. Onat F. A., Stojmenovic I., Yanikomeroğlu H. Generating random graphs for simulation of wireless ad hoc, actuator, sensor, and wireless networks // Pervasive and Mobile Computing. 2008. Vol. 4. P. 597–615.