
ТЕОРИЯ И ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ДАТЧИКОВ, ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

УДК 004.7.681.586:331.024.2

ДИНАМИЧЕСКОЕ НАЗНАЧЕНИЕ ПРОТОКОЛОВ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ В ПРОМЫШЛЕННОМ ИНТЕРНЕТЕ

DYNAMIC PROTOCOL ASSIGNMENT FOR COMMUNICATING SMART SENSORS IN INDUSTRIAL INTERNET

1) **Пилипенко Николай Александрович**
аспирант

E-mail: pilipenko-na@yandex.ru

1) **Восков Леонид Сергеевич**

канд. техн. наук, профессор

E-mail: lvoskov@hse.ru

2) **Ефремов Сергей Геннадьевич**

канд. техн. наук, ст. преподаватель

E-mail: sefremov@hse.ru

1) **Московский институт электроники и математики
НИУ ВШЭ, Москва**

2) **Национальный исследовательский университет
“Высшая школа экономики”, Москва**

Аннотация: Рассмотрена задача увеличения времени эффективной работы ограниченных в ресурсах интеллектуальных датчиков в промышленном Интернете и динамическое назначение протоколов коммуникации как способ ее решения. Приведена модель сети взаимодействующих интеллектуальных датчиков, представляющая передачу данных как процесс расхода ресурсов. Даны количественные оценки преимуществ использования динамического назначения протоколов коммуникации и определены условия их применения.

Ключевые слова: промышленный Интернет, интеллектуальные датчики, динамическое назначение протоколов, энергоэффективность.

ВВЕДЕНИЕ

Тенденция последних лет состоит в подключении недорогих миниатюрных интеллектуальных датчиков с малым энергопотреблением, способных обмениваться друг с другом информацией посредством беспроводных каналов связи, напрямую к глобальной сети Интернет, в связи с чем возник термин “Промышленный Интернет”. Пе-

1) **Pilipenko Nikolay A.**

Postgraduate

E-mail: pilipenko-na@yandex.ru

1) **Voskov Leonid S.**

Ph. D. (Tech.), Professor

E-mail: lvoskov@hse.ru

2) **Efremov Sergey G.**

Ph. D. (Tech.), Senior Lecturer

E-mail: sefremov@hse.ru

1) **HSE Moscow Institute of Electronics
and Mathematics, Moscow**

2) **National Research University “Higher School
of Economics”, Moscow**

Abstract: The paper focuses on the task of increasing efficient operation time of autonomous resource-constrained sensors in Industrial Internet and on dynamic assignment of communication protocols as the possible solution. A model of a network of communicating intellectual sensors is given, which presents the process of data transmission as consumption of multiple resources. We quantitatively assess advantages of using dynamic protocol assignment and suggest the application conditions.

Keywords: Industrial Internet, intellectual sensors, dynamic protocol assignment, energy efficiency.

реход к промышленному Интернету позволит производителям сократить издержки, связанные с ремонтом (12 %), обслуживанием (30 %) и незапланированным выходом из строя оборудования (70 %) [1].

Одна из основных проблем при этом заключается в отсутствии единых протоколов взаимодействия распределенных датчиков в промыш-

ленном Интернете. Концепция Веба Вещей (Web of Things) [2, 3] является одним из вариантов решения данной проблемы, который предполагает использование существующих web-стандартов для взаимодействия различных устройств. Однако этот подход имеет ряд ограничений. Во-первых, существующие веб-стандарты и технологии [4] в полной мере не учитывают особенностей функционирования ограниченных в ресурсах (заряд аккумулятора, память, процессорное время, канал связи) интеллектуальных датчиков, что может приводить к неэффективному их расходованию. Во-вторых, в зависимости от решаемых задач и ограничений взаимодействующих датчиков требования к расходованию ресурсов меняются. Данный фактор не учитывается в существующих в Web-моделях обмена данными, опирающихся на статический выбор протокола связи, что приводит к ограничению возможностей использования интеллектуальных датчиков в промышленности.

В связи с этим становится актуальной задача динамического выбора способа коммуникации, позволяющего минимизировать расход ограниченных ресурсов интеллектуальных датчиков при передаче данных.

Предлагается способ решения поставленной задачи, состоящий в разработке математической модели взаимодействия интеллектуальных датчиков, рассматриваемого как процесс расхода ресурсов, а также методов, позволяющих оптимизировать расход ресурсов.

МОДЕЛЬ СЕТИ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ДАТЧИКОВ, ОГРАНИЧЕННЫХ В РЕСУРСАХ

Зададим сеть взаимодействующих интеллектуальных датчиков в виде следующей четверки:

$$S = (Rs, D, P, L),$$

где $Rs = \{rs_1, \dots, rs_m\}$ — множество типов ресурсов, существующих в сети; $D = \{d_1, \dots, d_n\}$ — множество узлов сети, т. е. множество взаимодействующих датчиков и систем; $P = \{p_1, \dots, p_o\}$ — множество протоколов, поддерживаемых средой; $L = \{l_1, \dots, l_s\}$ — множество соединений между узлами.

Каждый ресурс сети определяется некоторой количественной характеристикой, относящейся либо непосредственно к физическому устройству (например, емкость заряда аккумулятора, объем памяти, процессорное время), либо к внешнему

состоянию среды в отношении взаимодействующих датчиков (например, ширина канала связи).

Каждый узел $d \in D$ характеризуется набором значений его остаточных ограниченных ресурсов $d = \{R_{vj}, \forall j \in Rs\}$, обеспечивающих корректное функционирование узла. Под ограниченным ресурсом подразумевается некоторая количественная величина, значение которой уменьшается в процессе передачи данных. Достижение отрицательного показателя значения любого из ресурсов считается его перерасходом. Перерасход приводит к прекращению функционирования заданного узла.

Каждый протокол $p \in P$ представляет собой набор функций расхода ресурса от объема передаваемой полезной информации $p = \{f_j(x), \forall j \in Rs\}$, где x — объем полезной передаваемой информации, под которой в данном случае подразумевается число бит, передаваемых узлом по сети, без учета накладных расходов, добавляемых конкретными протоколами (заголовки, служебная информация и дополнительные сообщения, специфичные для каждого отдельно взятого протокола).

Каждое соединение $l \in L$ между парой узлов определяет объем передаваемой полезной информации и протокол, используемый для передачи данных. Таким образом, каждое соединение характеризуется четверкой $l = \langle ld_1, ld_2, lv, lp \rangle$, где $ld_1 \in D, ld_2 \in D$ — пара узлов, между которыми осуществляется передача данных, при условии, что $ld_1 \neq ld_2$; lv — объем полезной передаваемой информации; $lp \in P$ — протокол, используемый при передаче данных.

Введем критерий оценки эффективности способа взаимодействия датчиков и систем в момент времени t . Для этого рассмотрим некоторый интервал времени $(t - \Delta t, t)$. Значение параметра Δt выбирается исходя из интенсивности событий в сети, времени передачи сообщений и требований приложений. Малое значение Δt позволяет представить передачу данных как процедуру расхода набора ресурсов без возможности их восстановления, например, передача данных по нескольким соединениям за малый промежуток времени уменьшает суммарный ресурс канала и доступное процессорное время, в то время как чередующиеся передачи по нескольким соединениям за длительный промежуток времени могут поочередно занимать канал и процессор, тем самым в меньшей степени влияя на его остаточный ресурс.

Пусть $N_{dr}(t)$ — остаточный ресурс r узла d в момент времени $t - \Delta t$, а $L_{dr}(t)$ — расход ресурса r узла d за интервал времени $(t - \Delta t, t)$ по всем соединениям узла d . Введем показатель расхода ресурса r :

$$\Psi_{dr}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } N_{dr} - L_{dr} \geq 0; \\ 0, & \text{если } N_{dr} - L_{dr} < 0. \end{cases}$$

Показателем эффективности функционирования за интервал времени $(t - \Delta t, t)$ можно считать:

$$\Psi_d(t) = \frac{\sum_{j=1}^m \Psi_{dj}(t)}{m},$$

где m — число типов ресурсов сети.

Если $\Psi_d(t) = 1$, узел функционирует корректно, если $\Psi_d(t) < 1$, значит возник перерасход одного или более ресурсов.

Частным случаем неэффективного функционирования узла сети является полный расход его энергии. Таким образом, показатель полного прекращения работы устройства может быть определен следующим образом:

$$\Psi_{de}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } N_{de} - L_{de} \geq 0; \\ 0, & \text{если } N_{de} - L_{de} < 0. \end{cases}$$

где e — индекс ресурса энергии.

Показателем эффективности функционирования сети за интервал времени $(t - \Delta t, t)$ в таком случае можно считать отношение числа узлов, эффективно функционирующих, т. е. не допускающих перерасхода ресурсов, к общему количеству узлов сети:

$$\Psi(t) = \frac{\sum_{i=1}^n |\Psi_i(t)|}{n},$$

где n — число узлов.

Приведем постановку задачи в терминах целочисленного линейного программирования (ЦЛП).

Пусть задана сеть взаимодействующих датчиков и систем в соответствии с описанной моделью $S = (Rs, D, P, L)$. Необходимо найти оптимальный протокол на каждое соединение по критерию минимизации суммарных затрат энергии по всей сети.

Функция расхода энергии сети в целом определяется следующей формулой.

$$z(x_{11}, x_{12}, \dots, x_{so}) = 2 \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^o f_{je}(v_i) x_{ij}, \quad (1)$$

где x_{ij} — переменная, определяющая, должен ли быть назначен j -й протокол на i -ю связь; s — число соединений в сети; o — число протоколов в сети; e — индекс ресурса энергии; v_i — объем передаваемой полезной информации по соединению i ; $f_{je}(v)$ — функция расхода ресурса энергии протоколом j от объема полезной информации v .

Первый множитель функции показывает, что передача по каждому соединению расходует ресурсы двух узлов симметрично, т. е. в одинаковом объеме у обоих узлов.

Итоговая задача состоит в минимизации функции z , т. е. минимизации расхода ресурса энергии

$$z(x_{11}, x_{12}, \dots, x_{so}) = 2 \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^o f_{je}(v_i) x_{ij} \rightarrow \min \quad (2)$$

при следующих ограничениях:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } j\text{-й протокол назначен} \\ & \text{на } i\text{-ю связь,} \\ 0, & \text{если } j\text{-й протокол не назначен} \\ & \text{на } i\text{-ю связь;} \end{cases} \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^o x_{ij} = 1; \quad \forall i \in 1 \dots s; \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^o x_{ij} f_{jr}(v_{ik}) \leq d_{kr}; \quad \forall r \in 1 \dots m; \quad \forall k \in 1 \dots n. \quad (5)$$

Целевая функция z является суммарным расходом ресурса энергии в сети при условии, что каждый узел имеет свой изначальный запас ресурсов, восстановление ресурсов не происходит, и каждый ресурс не может быть перерасходован. Последнее обеспечивается требованием (5).

Переменная x_{ij} в выражениях (1), (4) является булевой, т. е. определяет, будет ли выбран протокол j или нет. Для гарантии целочисленности данной переменной вводятся ограничения (3).

Для заданной целевой функции в связи с минимизацией значения целевой функции лучшим решением для всех переменных x_{ij} всегда будет значение 0. Для исключения подобного решения вводится ограничение (4), которое гарантирует,

что на каждое соединение протокол должен быть выбран, и при этом он будет единственным.

Для оценки расхода ресурсов на передачу данных вводится ряд дополнительных переменных, а именно: m — число типов ресурсов сети; n — число узлов сети; v_{ik} — значение объема передаваемой полезной информации узлом k по соединению i . При этом, если соединение i не включает узел k , то $v_{ik} = 0$; $f_{pr}(v)$ — функция расхода ресурса r протоколом p от объема полезной информации v , причем $f_{pr}(v) = 0$, если передача данных не осуществляется, т. е. в случае $v = 0$; d_{kr} — остаточное значение ресурса r узла k .

Таким образом, выражение (5) гарантирует, что расход ресурса r по всем соединениям i узла k не превысит остаточного значения d_{ik} ресурса r узла k .

В результате решения задачи (2), например, одним из стандартных методов, получается набор величин x_{ij} , $i \in [1...s]$, $j \in [1...o]$, определяющих, должен ли быть назначен протокол j на соединение между парой узлов i при передаче заданного объема информации.

Очевидно, задача (2) в общем виде является NP-трудной и не может быть решена за допустимое время для большого числа соединений l . Более того, в реальных системах не всегда существует возможность получить всю информацию, необходимую для ее решения.

Одним из способов решения может быть декомпозиция основной задачи назначения протокола на две подзадачи. Осуществляется направленный перебор всех узлов сети. На каждом шаге выбирается набор соединений текущего узла и для участка сети, основанного на данном наборе, осуществляется выбор локально оптимальных протоколов путем решения задачи (2). При дальнейшем переборе данные соединения исключаются из рассмотрения.

В случае, если процедура получения информации о состоянии других узлов сети невозможна, то может быть использован второй алгоритм. По аналогии с предыдущим методом осуществляется направленный перебор узлов сети. На каждом шаге выбирается набор соединений текущего узла и далее осуществляется выбор локально оптимальных протоколов путем решения задачи (2) с учетом ограничений ресурсов лишь текущего узла.

МОДЕЛИРОВАНИЕ

Получим количественные оценки преимуществ использования динамического выбора протокола на основе моделей и методов, описанных в предыдущем разделе. В качестве исходной точки для сравнения возьмем усредненные показатели по сети с одним статическим протоколом.

При моделировании использовались следующие параметры:

- RC (4) — число расходуемых ресурсов;
- PC (3) — число поддерживаемых протоколов;
- DC (100) — число узлов в сети;
- LC (300) — число связей в сети.

В качестве критерия оценки рассматривается функция относительного приращения времени эффективного функционирования сети [8], задаваемая следующим образом:

$$\delta_t = \left(\frac{t}{t_m} - 1 \right) \cdot 100 \%, \quad (6)$$

где t_m — усредненное время эффективной работы сети по всем статическим протоколам; t — время эффективной работы сети той же конфигурации, в которой протокол назначается согласно предлагаемому методу.

Статический протокол

Прежде всего необходимо смоделировать базовый случай, т. е. работу сети при наличии единственного протокола. На рис. 1 представлена смоделированная ситуация для трех различных протоколов с различными характеристиками. Видно, что протоколы $p1$ и $p3$ показывают стабильную работу в начальные моменты времени, когда все узлы удовлетворяют всем требованиям приложе-

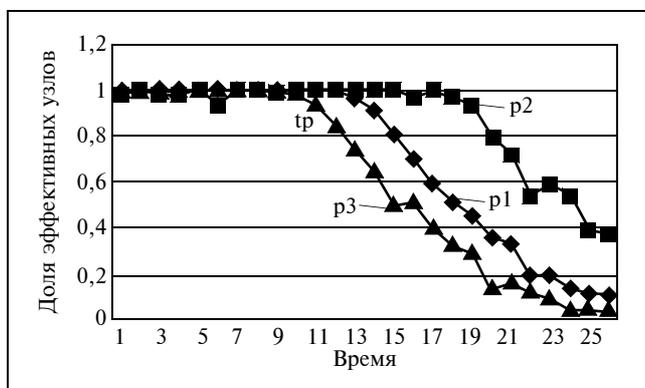


Рис. 1

ний. Но при этом они быстро расходуют энергию узла, что приводит к резкому спаду числа эффективных узлов, начиная с некоторого момента времени t_p .

С другой стороны, протокол $p2$ гораздо эффективнее расходует энергию узла, тем самым увеличивая время работы, и, как следствие, обеспечивая решение всех поставленных задач. Однако даже в начальные моменты времени данный протокол не всегда обеспечивает корректное функционирование всех узлов, что вызвано периодически возникающими пиковыми нагрузками на отдельные узлы.

Влияние структуры сети

Как было сказано, связи между узлами, а также объем передаваемых данных определяются случайным образом по заданным заранее правилам в допустимых пределах. Проверим, насколько сильный разброс получает целевой показатель при 1000 различных конфигурациях сети.

Результат моделирования показан на рис. 2. На гистограмме виден разброс результатов: при среднем значении 41 % среднеквадратичное отклонение составило 8 %. Такое поведение является ожидаемым, так как в нормальном режиме работы лишь некоторые узлы могут не соответствовать требованиям по расходу ресурсов, работая в энергоэффективном режиме. При этом, когда энергия узлов начинает заканчиваться, выбирается наиболее энергоэффективный режим работы, тем самым увеличивая итоговое количество решенных задач.

Несмотря на то, что в большинстве случаев динамическое изменение протоколов дает приращение общего времени работы узлов в эффективном режиме, в некоторых случаях данный подход дает результаты, сходные с использованием статических протоколов. Однако в ряде случаев получается 2-х кратное увеличение показателя времени эффективной работы.

Влияние максимального числа связей на узел сети

Введем ограничение на максимально возможное число связей на один узел. Результаты моделирования приведены на рис. 3.

Из графика видно, что при малом числе связей на один узел динамическая реконфигурация не

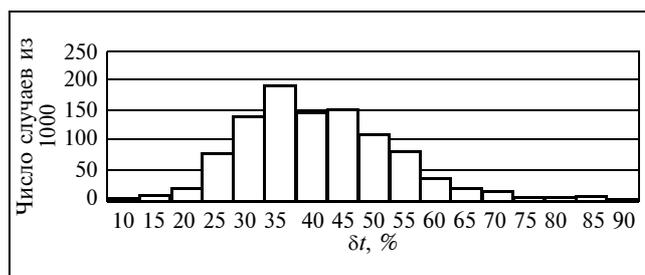


Рис. 2

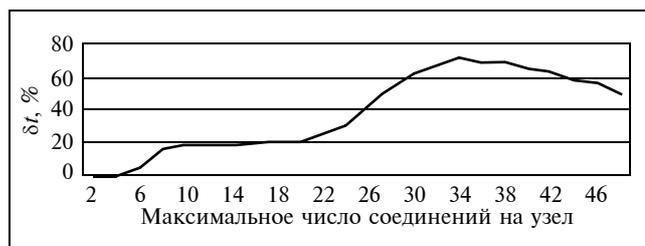


Рис. 3

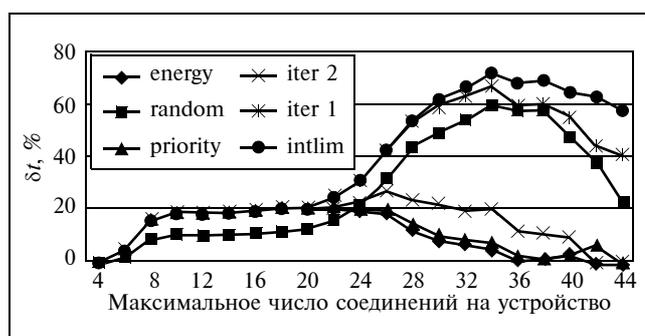


Рис. 4

дает прироста параметра (6), поскольку при малой нагрузке на узел использование протоколов практически не влияет на время эффективной работы в виду небольшого объема передаваемых данных.

Увеличение числа связей на узел улучшает прирост показателя (6). Однако при слишком большом количестве связей вероятность того, что узел эффективно передаст все данные, уменьшается, и эффективность от использования динамической реконфигурации падает.

Сравнение методов

Проведем сравнение следующих методов организации взаимодействия в сети взаимодействующих датчиков (рис. 4);

— метод оптимального назначения протоколов на основе сведения к задаче ЦЛП (*intlin*);

— метод выбора статического энергоэффективного протокола (*energy*) [5, 6];

— метод выбора приоритетного протокола на основе минимизации энергозатрат (*priority*) [5—7];

— метод случайного назначения протокола на каждую связь (*random*);

— метод поиска локально оптимальных решений (*iter1, iter2*).

Случайное назначение протокола (*random*) улучшает время эффективной работы сети, однако данный подход практически никогда не обеспечивает наилучший результат. Выбор энергоэффективного протокола (*energy*) дает прирост эффективности работы сети в сравнении с усредненным значением, но имеет наихудшие характеристики в сравнении с другими методами. Метод приоритетного выбора (*priority*) показывает немногим лучшие характеристики. Наилучший результат показывает решение модели численным методом (*intlin*). В то время как приближенный метод № 1 (*iter1*) показывает результат, близкий к численному, приближенный метод № 2 (*iter2*) при некотором числе соединений показывает также близкие к численному результаты, но при их увеличении становится менее эффективен в сравнении с методом случайного назначения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный новый критерий взаимодействия интеллектуальных датчиков и систем позволяет оценивать эффективность использования их ограниченных ресурсов.

Разработана математическая модель сети, ориентированная на оценку корректности функционирования взаимодействующих датчиков и систем, позволяющая учитывать наличие множества ограниченных ресурсов, которые расходуются в процессе передаче данных.

На основании расчета расхода ресурсов по разработанной модели предложен метод динамической реконфигурации сети, заключающийся в сведении задачи назначения протоколов к оптимизационной задаче целочисленного линейного программирования по критерию минимизации энергозатрат.

Для сетей датчиков с большим количеством связей предложены два приближенных метода, заключающихся в решении локальной оптимизационной задачи для каждого узла отдельно. Данный подход имеет практическую целесообразность, так как требует информации лишь о локальных связях и может осуществляться каждым узлом самостоятельно.

Имитационное моделирование, проведенное с помощью разработанного программного обеспечения, позволило оценить преимущества использования методов динамического назначения протоколов. В частности, использование предложенного численного метода позволяет добиться увеличения времени работы сети датчиков с автономными источниками питания в среднем на 41 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Industrial Internet of Things: Unleashing the Potential of Connected Products and Services* // World Economic Forum Report. — 2015. URL: www3.weforum.org/docs/WEFUSA_IndustrialInternet_Report2015.pdf. Accessed: Feb 2016.
2. *Восков Л. С., Пилипенко Н. А. Web вещей — новый этап развития Интернета вещей // Качество. Инновации. Образование. — 2013. — № 2. — С. 44—49. [Voskov L. S., Pili-penko N. A. Web of Things — new step in evolution of the Internet of Things // Quality. Innovations. Education. — 2013. — № 2. — P. 44—49. (In Russian)]*
3. *Guinard D., Trifa V., Mattern F., Wilde E. From the Internet of Things to the Web of Things: Resource Oriented Architecture and Best Practices.*
4. *Si-Ho Cha, Yoemun Yun. HTML5 Standards and Open API Mashups for the Web of Things // Computer Applications for Web, Human Computer Interaction, Signal and Image Processing, and Pattern Recognition. — 2012. — P. 189—194.*
5. *Bovet G., Jean H. Communicating with Things — an Energy Consumption Analysis // Pervasive. — 2012.*
6. *Mandyam G. Power-efficient persistent web-based cellular connectivity // Globecom Workshops (GC Wkshps), IEEE, 2012. — P. 40—45.*
7. *Macedo J. A. et al. ES-Aware: Energy and Stability Support for P2P Video Streaming on Mobile Devices // Proceedings of the Latin America Networking Conference on LANC 2014. — ACM, 2014. — P. 3—9.*
8. *Ефремов С. Г., Восков Л. С. Задача увеличения времени автономной работы беспроводных сенсорных сетей в системах сбора данных и способ ее решения // Датчики и системы. — 2013. — № 4 (167). — С. 2—9. [Efremov S. G., Voskov L. S. A method for increasing lifetime of wireless sensor networks in data acquisition systems // Sensors and Systems. — 2013. — № 4 (167). — P. 2—9. (In Russian)]*