

МОДЕЛЬ ДОСТАВКИ КОНТЕНТА В СЕТЯХ ПОДВИЖНЫХ УЗЛОВ ПРИ ОГРАНИЧЕНИИ РЕСУРСОВ

С. В. КУЛЕШОВ, А. А. ЗАЙЦЕВА

*Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук,
199178, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: kuleshov@iias.spb.su*

Рассматриваются особенности передачи данных в инфокоммуникационных системах, с том числе в разрабатываемых сетях подвижных узлов. Целью работы является решение задачи синхронизации контента между отдельными узлами мобильной сети. Для этого разработана модель доставки контента в сетях подвижных узлов при ограниченных ресурсах. Преимуществом модели является возможность гарантированной передачи данных в чрезвычайных, неблагоприятных или аварийных ситуациях. Отличительными особенностями предложенной модели являются использование технологии активных данных и возможность активного управления планом доставки данных. Использование модели в основе протокола передачи данных между узлами сети позволяет гибко управлять доставкой фрагментов данных, которые требуются узлу-потребителю от узла-источника. Для формализации модели использована теоретико-множественная запись структуры синхронизируемых данных с учетом временных меток условий актуальности таких данных. На основе описания условий синхронизации контента в карте района между отдельными узлами мобильной сети разработана программная симуляция такой сети для оценки возможности снижения трафика между узлами.

Ключевые слова: *передача данных, коммуникационная среда, моделирование, активные данные, робототехнические комплексы, сети подвижных узлов*

В работе [1] рассматривались особенности коммуникационной инфраструктуры на основе сети, управляемой контентом; сформулированы принципы построения инфокоммуникационной среды, обеспечивающей передачу данных от источников к потребителям, а также допускающей возможность программного реконfigurирования. Настоящее исследование посвящено решению задачи синхронизации (между отдельными мобильными узлами подвижной сети) контента в карте описания района, как одной из задач, которая может решаться с использованием такой среды в сетях связи подвижных узлов при ограничении ресурсов и использовании таких систем в чрезвычайных, неблагоприятных или аварийных ситуациях.

Отдельные мобильные узлы (это могут быть автономные роботы, беспилотные летательные аппараты и др.) в процессе функционирования при помощи бортовых датчиков получают информацию о местности и для координации работы всех узлов должны синхронизировать данные о местности (карту района) между собой.

Множество современных исследований направлено на создание протоколов взаимодействия между узлами в подвижных сетях без учета особенностей контента [2—6] или без

накладывания ограничений по ресурсам. В других исследованиях подробно рассматривается вопрос синхронизации данных в информационных системах, не относящихся к сетям подвижных узлов [7, 8]. В настоящей работе учитываются особенности каждой из перечисленных областей.

В [1, 9, 10] показано, что инфокоммуникационная среда, обеспечивающая передачу данных от источников к потребителям, дает возможность абстрагировать уровень приложения от уровня физической среды и сократить трафик для синхронизации узлов на уровне семантики контента.

При разворачивании мобильной сети с необходимостью автономного управления ее узлами требуется организовать взаимодействие последних путем передачи управляющих команд и синхронизации данных об их состоянии и параметрах окружающей среды.

Основными информационными объектами, требующими синхронизации между узлами, являются данные о пространственном положении каждого узла сети и карта описания района разворачивания сети.

Такая карта представляет собой структуру данных

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} m_{1,1} & \cdots & m_{w,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{1,h} & \cdots & m_{w,h} \end{pmatrix},$$

привязанную к местности, где каждый элемент $m_{i,j} = (R, S, P)$, в котором R — условия ограничений на использование этого элемента карты (например, особенности рельефа), S — сигнатура, отражающая наличие идентифицированных объектов на элементе карты, важных для выполнения задачи, P — прочие данные, относящиеся к участку местности и важные для выполнения задачи и планирования маршрута робота, w и h — размеры карты района.

В случае ограничений (малый энергетический ресурс, условия для распространения сигнала в среде, обеспечение малой заметности путем уменьшения времени сеансов связи и др.) на коммуникационные функции требуется активно управлять планом доставки данных. Для активного управления планом доставки данных предлагается модель, в основе которой лежит процедура управления выборочной доставкой для устранения частичной неосведомленности узла-потребителя при наличии системы идентификации элементов данных внутри потока. Эта модель обеспечивает повышение энергоэффективности (уменьшаются потери на передаче избыточных данных), а также безопасности инфокоммуникации.

Использование в основе протокола передачи данных между узлами сети предлагаемой модели обеспечивает возможность гибкого управления доставкой фрагментов данных, которые требуются узлу-потребителю от узла-источника (держателя наиболее актуальной версии данных) в конкретной обстановке.

Это означает, что потребитель должен не получать постоянный поток данных со всего сенсорного поля источников, но лишь компенсировать устаревание некоторых данных в собственной оперативной памяти (хранилище). В свою очередь, данные в оперативной памяти узла-потребителя отражают актуальную обстановку и могут быть использованы для принятия решения другими алгоритмами.

Порядком доставки элементов карты описания района разворачивания сети управляет узел-получатель, запрашивая у узлов-источников только недостающие фрагменты. Например, если какой-то элемент данных уже доставлен с другого узла-источника, повторная его передача не только не обязательна, но и нежелательна во избежание дополнительных энергозатрат со стороны узла-источника и загрузки коммуникационного ресурса. Таким образом, становится возможно запрашивать различные фрагменты контента с множества узлов-источников, для равномерной энергоэффективной загрузки коммуникационной аппаратуры.

Использование предлагаемой модели доставки контента для минимизации трафика с целью экономии энергии узлов сети позволяет решить задачу синхронизации данных в распределенном хранилище.

Каждый элемент данных $m_{i,j}$ структуры \mathbf{M} может поступать как от внутренних источников узла (например, видеокамер), так и от других узлов сети. Каждое обновление элемента данных сопровождается выставлением временных меток и, при необходимости, установкой признака приоритетности.

Каждому элементу данных $d_k \equiv m_{i,j}$ (где $k \equiv r(i, j)$ — функция развертки) сопоставляется сигнатура s_k , описывающая актуальность этого блока данных и условия, влияющие на планирование его передачи. На рис. 1 представлены элементы данных $D = \{d_1, d_2, d_3, \dots, d_N\}$ и соответствующие им сигнатуры $S = \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_N\}$.

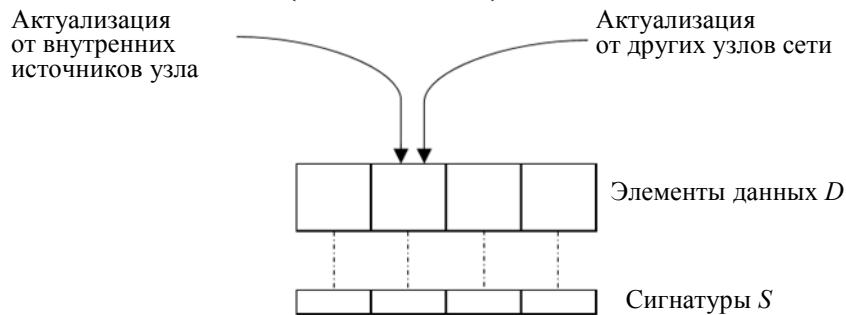


Рис. 1

Каждый элемент данных $d_k \in D$ является атомарным и описывает состояние одной сущности (фрагмент карты участка поверхности, пространственное положение и состояние узла и т.п.).

Сигнатура s_i , в свою очередь, состоит из следующих элементов:

$$s_i = \langle t_k, t_{S_i}, p, t_{k_{\text{actual}}}, n_{\text{actual}} \rangle,$$

где t_{k_i} — время, в течение которого актуален элемент данных D , t_{S_i} — время обновления элемента данных D , p — признак приоритета $p \in \{\text{true}, \text{false}\}$, $t_{k_{\text{actual}}}$ — время, в течение которого актуален соответствующий элемент данных d_i в группе, n_{actual} — идентификатор узла сети, имеющего элемент d_i .

При $t_{k_i} > t + \Delta t$ элемент данных d_i считается устаревшим и неактуальным, где Δt — время устаревания тактической информации, зависящее от скорости движения целей и характера решаемой задачи, t — текущее время. При $n_{\text{actual}} = n$ держателем наиболее актуального блока данных d_i является i -й узел сети, где n — идентификатор узла.

В случае обновления элемента данных d_i на узле ($n \equiv A$) из внешних источников производится повторная инициализация сигнатуры в виде:

$$s_i = \langle t_k \leftarrow t + \Delta t, t_s \leftarrow t, t_{k_{\text{actual}}} \leftarrow t + \Delta t, i_{\text{actual}} \leftarrow A \rangle,$$

при обновлении от другого узла сети ($n \equiv B$) — в виде:

$$s_i = \langle t_k \leftarrow t + \Delta t, t_s \leftarrow t_{S_B}, t_{k_{\text{actual}}} \leftarrow t_{k_B}, i_{\text{actual}} \leftarrow B \rangle.$$

Условием запрета на передачу сообщения, включающего элемент данных d_i , от узла $n \equiv A$ к узлу $n \equiv B$ является $(t_{k_A} < t) \wedge (t_{S_A} < t_{S_B})$.

Все узлы сети, получая сигнатуры от других узлов, обновляют копии сигнатур s_i путем обновления в них значений $t_{k_{\text{actual}}} \leftarrow t_{k_B}, i_{\text{actual}} \leftarrow B$, для тех B , которые имеют наибольшее значение t_{S_B} , т.е. наиболее актуальный элемент данных.

В случае передачи выбранных элементов данных передаются также все сигнатуры всех актуальных элементов данных ($t_{k_A} < t$) конкретного узла ($n \equiv A$).

При необходимости актуализировать какой-то элемент данных, если предполагается использование этого элемента (приближение к соответствующему элементу карты), узел ($n \equiv A$) может запросить этот элемент данных у узла-держателя актуальной версии соответствующего элемента данных ($n \equiv B$) при выполнении следующего условия:

$$(t_{k_B} < t) \wedge (t_{k_A} < t_{k_B}) \wedge (i_{\text{actual}} = B).$$

Синхронизация данных между узлами сети заключается в подготовке плана передачи сообщений. Плановая передача состоит из обмена сообщениями поддержания соединения (heartbeat message) с сигнатурой последнего обновленного элемента данных с периодичностью t_{HB} .

На изменение плана доставки контента влияет:

- необходимость передачи приоритетного сообщения (инициатор передачи — держатель элемента данных);
- запрос элемента данных узла ($n \equiv A$) \wedge ($t_{k_A} < t$) при необходимости актуализации.

В максимальном объеме описанный механизм может быть реализован при наличии в сети нескольких узлов, обладающих полным набором датчиков (активными средствами наблюдения), при этом возникает необходимость синхронизации карт описания района и поддержания их консистентности.

Разработана программная реализация модели, позволяющая оценить выигрыш от использования описанного принципа активного управления планом доставки данных. На рис. 2 отражено расположение мобильных узлов на двумерной схематической карте описания района, зеленым цветом отмечены блоки карты, актуальной версией данных о состоянии которых владеет хотя бы один узел сети. Дополнительные метки отражают числовой идентификатор узла-держателя актуальных данных для этих блоков и время, оставшееся до их устаревания. Серым цветом маркированы блоки, про которые группе узлов ничего не известно, или устаревшие.

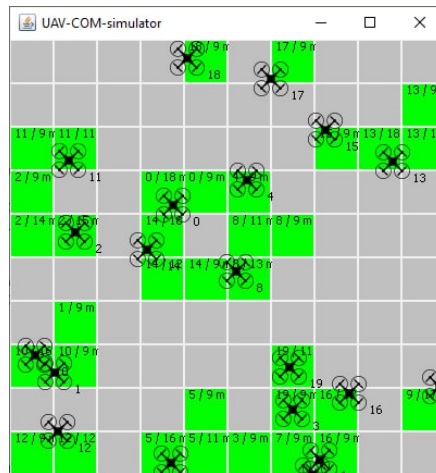


Рис. 2

Проведенное моделирование показало снижение количества переданных пакетов в среднем на 40—70 % для группы, содержащей до двадцати подвижных узлов. Наибольшее снижение числа переданных блоков данных достигается при уменьшении количества узлов в

районе (плотности). Полученные результаты моделирования позволяют оценить возможности снижения трафика между узлами при решении подобных коммуникационных задач, требующих синхронизации данных подвижных узлов.

Работа поддержана Государственным заданием на 2021 г. № 0073-2019-0005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулешов С. В., Зайцева А. А. Вариант информационно-коммуникационной инфраструктуры на основе управляемой контентом сети // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 11. С. 1020—1026.
2. Li X., Yan J. LEPR: link stability estimation-based preemptive routing protocol for flying ad hoc networks // Proc. IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC). Heraklion, 2017. P. 1079—1083.
3. Jawhar I., Mohamed N., Al-Jaroodi J. et al. Communication and networking of UAV based systems: classification and associated architectures // J. Netw. Comput. Appl. 2017. Vol. 84. P. 93—108.
4. Li T., Mastorakis S., Xu X., Zhang H., and Zhang L. Data synchronization in Ad Hoc mobile networks // Proc. of the 5th ACM Conf. on Information-Centric Networking (ICN '18). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2018. P. 186—187.
5. Liu C., Lai C. A group-based data-driven approach for data synchronization in unstructured mobile P2P systems // Wireless Networks. 2018. Vol. 24, is.7. P. 2465—2482.
6. Goh K. C. W., Ng R. B. C., Wong Y. K. et al. Aerial filming with synchronized drones using reinforcement learning // Multimed Tools Appl. 2021. Vol. 80. P. 18125—18150.
7. Демин В. О., Пищик Б. Н. Синхронизация данных на мобильных платформах // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Информационные технологии. 2013. Т. 11, вып. 4. С. 46—58.
8. Трофимов В. В., Завьялов Д. В. Синхронизация списков данных в клиент-серверных системах // Изв. Волгоград. гос. техн. ун-та. 2015. № 6. С. 87—90.
9. Kuleshov S. V., Aksenov A. Y., Zaytseva A. A. Software-Defined Data Formats in Tele-communication Systems // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2017. Vol. 575. P. 326—330.
10. Kuleshov S. V., Zaytseva A. A., Aksenov A. Y. The conceptual view of unmanned aerial vehicle implementation as a mobile communication node of active data transmission network // Intern. J. of Intelligent Unmanned Systems. 2018. Vol. 6, is. 4. P. 174—183.

Сведения об авторах

Сергей Викторович Кулешов

— д-р техн. наук; Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, лаборатория автоматизации научных исследований; гл. научный сотрудник; E-mail: kuleshov@ias.spb.su

Александра Алексеевна Зайцева

— канд. техн. наук; Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, лаборатория автоматизации научных исследований; ст. научный сотрудник; E-mail: cher@ias.spb.su

Поступила в редакцию
17.10.2021 г.

Ссылка для цитирования: Кулешов С. В., Зайцева А. А. Модель доставки контента в сетях подвижных узлов при ограничении ресурсов // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 12. С. 959—964.

CONTENT DELIVERY MODEL IN MOBILE NODE NETWORKS IN RESOURCE-CONSTRAINED ENVIRONMENTS

S. V. Kuleshov, A. A. Zaytseva

St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, 199178, St. Petersburg, Russia
E-mail: kuleshov@iias.spb.su, cher@iias.spb.su

The features of data transmission in infocommunication systems, including in the development of mobile node networks, are considered. The aim of the work is to solve the problem of synchronizing the content in the area description map between individual mobile nodes of the mobile network. A model of content delivery in mobile nodes networks in conditions of limited resources, is developed. The model advantage is provision of the possibility of guaranteed data transmission in emergency, adverse, or unfavorable situations. A distinctive feature of the proposed model is the use of active data technology and the ability to actively manage the data delivery plan. The use of the proposed model as the basis of the protocol for transferring data between network nodes makes it possible to flexibly control the delivery of data fragments that are required by the consumer node from the source node in a specific situational situation to eliminate its ignorance. To formalize the model, a set-theoretical record of the structure of synchronized data is applied, accounting for the time stamps of the conditions for the relevance of such data. Based on the description of the content synchronization conditions in the area description map between individual nodes of the mobile network, a software model of such a network is developed to assess the possibility of reducing traffic between nodes.

Keywords: data transmission, communication environment, modeling, active data, robotic systems, networks of mobile nodes

REFERENCES

1. Kuleshov S.V., Zaytseva A.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, no. 11(63), pp. 1020–1026. (in Russ.)
2. Li X., Yan J. *Proc. IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, Heraklion, 2017, pp. 1079–1083.
3. Jawhar I., Mohamed N., Al-Jaroodi J. et al. *J. Netw. Comput. Appl.*, 2017, vol. 84, pp. 93–108.
4. Li T., Mastorakis S., Xu X., Zhang H., and Zhang L. *Proc. of the 5th ACM Conference on Information-Centric Networking (ICN '18)*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2018, pp. 186–187.
5. Liu C., Lai C. *Wireless Networks*, 2018, no. 7(24), pp. 2465–2482.
6. Goh K.C.W., Ng R.B.C., Wong Y.K. et al. *Multimed Tools Appl.*, 2021, vol. 80, pp. 18125–18150.
7. Demish V.O., Pishchik B.N. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*, 2013, no. 4(11), pp. 46–58. (in Russ.)
8. Trofimov V.V., Zavyalov D.V. *Izvestia Volgograd State Technical University*, 2015, no. 6, pp. 87–90. (in Russ.)
9. Kuleshov S.V., Aksenov A.Y., Zaytseva A.A. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2017, vol. 575, pp. 326–330.
10. Kuleshov S.V., Zaytseva A.A., Aksenov A.Y. *International Journal of Intelligent Unmanned Systems*, 2018, no. 4(6), pp. 174–183, DOI 10.1108/IJIUS-04-2018-0010.

Data on authors

Sergey V. Kuleshov

— Dr. Sci.; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of scientific research automation; Chief Researcher; E-mail: kuleshov@iias.spb.su

Alexandra A. Zaytseva

— PhD; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of scientific research automation; Senior Researcher; E-mail: cher@iias.spb.su

For citation: Kuleshov S. V., Zaytseva A. A. Content delivery model in mobile node networks in resource-constrained environments. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 12. P. 959–964 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-12-959-964