

УДК 004.627

doi:10.21685/2307-5538-2021-1-6

АДАПТИВНОЕ СЖАТИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ

Б. Я. Лихтциндер¹, Ю. О. Бакай²

^{1,2} Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия

¹lix@psuti.ru, ²ov.bakai@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Топология сети изменяется, сеть становится самоорганизующейся и для ее функционирования требуются новые специальные протоколы. Рассматривается понятие «беспроводные сенсорные сети» (БСС). *Материалы и методы.* Предложены методы сжатия данных в беспроводных сенсорных сетях. Описываются методы и алгоритмы сжатия измерительных данных. *Результаты.* Приведены пять категорий методов, включая сжатие на основе цепочек, сжатие на основе изображений, кодирование с распределенным источником, сжатие на основе агрегации данных. Наиболее подробно рассмотрен адаптивный метод сжатия. Выявлены особенности представляемых алгоритмов. *Выводы.* Показана эффективность применения алгоритма "дырявое ведро" для адаптации сжатия. Рассмотрена структура, реализующая указанный алгоритм. Показаны преимущества введения адаптации при сжатии данных в БСС.

Ключевые слова: сенсорные сети, сжатие данных, адаптация, алгоритмы, датчики

Для цитирования: Лихтциндер Б. Я., Бакай Ю. О. Адаптивное сжатие измерительных данных в беспроводных сенсорных сетях // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 1. С. 52–57. doi:10.21685/2307-5538-2021-1-6

ADAPTIVE COMPRESSION OF MEASURED DATA IN WIRELESS SENSOR NETWORKS

B.Ya. Likhttsinder¹, Yu.O. Bakay²

^{1,2} Volga Region State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia

¹lix@psuti.ru, ²ov.bakai@gmail.com

Abstract. *Background.* The network topology is changing, the network is becoming self-organising and new special protocols are required for its operation. The paper discusses the concept of wireless sensor networks (WSNs). *Materials and methods.* The paper proposes methods of data compression in wireless sensor networks (WSN). It describes methods and algorithms of sensing data compression. *Results.* Five categories of compression methods are presented, including chaining-based compression, image-based compression, distributed-source coding, and aggregation-based compression. The adaptive compression method suggested by the author is discussed in details. The peculiarities of the presented algorithms are pointed out. *Conclusions.* The effectiveness of application of the "hole-bucket" algorithm for adaptive compression is shown. The structure implementing the mentioned algorithm is considered. The advantages of introducing adaptation in data compression in WSN are shown.

Keywords: sensor networks, data compression, adaptation, algorithms, sensors

For citation: Likhttsinder B.Ya., Bakay Yu.O. Adaptive compression of measured data in wireless sensor networks. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;1:52–57. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-1-6

Введение

Информационно-измерительные системы существуют уже много лет. Различные сенсорные устройства, датчики подключались к центральному обрабатываемому устройству, как терминальные устройства подключались к центральной ЭВМ. Информация обрабатывалась централизованно и выдавалась потребителю. Датчики не могли размещаться на удаленном

© Лихтциндер Б. Я., Бакай Ю. О., 2021. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

расстоянии от центральной ЭВМ и подключались с помощью специальных соединительных кабелей. Информация передавалась в аналоговом виде и преобразовывалась в цифровую форму аналого-цифровым преобразователем (АЦП), который поочередно подключался к сенсорным устройствам. АЦП были громоздкие и весьма дорогие. Потеря точности за счет передачи аналоговых сигналов послужила причиной разработки малогабаритных АЦП, которые устанавливались вблизи датчиков и передавали информацию в цифровой форме. Развитие цифровой элементной базы позволило осуществить такой переход. Одновременно уменьшались размеры цифровых обрабатывающих устройств и увеличивалась их вычислительная мощность, появились малогабаритные контроллеры. Создание больших интегральных схем (БИС) с высоким уровнем интеграции позволило совместить контроллерную обработку информации от датчиков с самим измерительным процессом, встраивая вычислительные мощности в измерительные преобразователи. Появились «умные» сенсорные устройства, адаптирующиеся к изменению условий измерений. Уменьшились не только физические размеры устройств цифровой обработки, но уменьшалось также их энергопотребление, увеличивался срок непрерывной работы с автономным малогабаритным источником энергии. Низкая стоимость интеллектуальных сенсорных устройств привела к широкому их распространению. Информация уже собирается от сотен и даже тысяч таких устройств, и возникли проблемы с их подключением к устройствам сбора информации. Все шире начинают создаваться сети, передающие информацию по радиоканалам с использованием стандартных протоколов. В указанных целях широко используются Wi-Fi-сети, характеристики которых позволяют передавать информацию на расстояние более одного километра. Однако стандартные протоколы оказались слишком громоздкими. Для большинства приложений не требовалось высоких скоростей передачи, однако требовалось большое количество таких узлов. Размещение датчиков на больших площадях потребовало бы увеличения мощности передатчиков, что невозможно из-за ограниченности их источников энергии. Решить проблему позволило применение MESH сетей, когда информация транслируется промежуточными приемопередатчиками. При этом приемопередатчики конструктивно объединяются с датчиками в один узел. Топология сети изменяется, сеть становится самоорганизующейся и для ее функционирования потребовались новые специальные протоколы. Так появилось понятие «беспроводные сенсорные сети» (БСС) – сети, объединяющие сенсорные преобразователи и средства передачи измерительной информации и информации управления.

Сжатие данных в БСС

Беспроводная сенсорная сеть состоит из одного или нескольких удаленных приемников и большого количества сенсорных узлов. Каждый сенсорный узел представляет собой небольшое беспроводное устройство, которое может непрерывно собирать информацию и сообщать данные в приемник через схему множественной маршрутизации с несколькими переходами [1]. БСС предоставляют новую возможность для повсеместного компьютерного и контекстно-ориентированного мониторинга физических сред. Они обычно развертываются в областях, представляющих интерес для наблюдения специфических явлений или объектов. Практические применения БСС включают: мониторинг животных, предприятий сельского хозяйства, здравоохранение, надзор и интеллектуальные здания [2–6]. Поскольку узлы датчиков обычно питаются от батарей и многие приложения БСС нацелены на долгосрочный мониторинг окружающей среды, то важной проблемой является сохранение энергии сенсорных узлов с целью продления срока их службы. Существует два общих решения экономии энергии сенсорных узлов. Одним из решений является использование избыточности узлов, выбирая для активизации те подмножества сенсорных узлов, которые имеют наибольший запас энергии по сравнению с другими [7–9]. Выбранный поднабор активных сенсорных узлов должен охватывать всю область мониторинга и поддерживать сетевое подключение. Другими словами, эти активные узлы датчиков должны следить за тем, чтобы сеть по-прежнему функционировала нормально. Путем выбора различных подмножеств сенсорных узлов, которые будут активны по очереди, мы можем помешать некоторым узлам датчиков потреблять слишком много энергии, продлить срок службы сети. Однако часто избыточность узла использована быть не может (например, из-за занятости сети [10, 11] или из-за прерывания). Альтернативным решением является уменьшение количества данных, отправляемых датчиками, поскольку передача

является одной из наиболее энергозатратных операций сенсорных узлов. Такое решение особенно полезно, когда узлы датчиков должны регулярно сообщать данные своих измерений приемнику в течение длительного промежутка времени. Чтобы уменьшить количество передаваемых данных, необходимо сжать их внутри сети. В зависимости от возможности восстановления данных можно классифицировать схемы сжатия данных по трем категориям: без потерь, с потерями и необратимое сжатие. Сжатие без потерь означает, что после выполнения операции декомпрессии мы можем получить точно такие же данные, что и перед выполнением операции сжатия. Кодирование Хаффмана [12] является одним из типичных примеров. Сжатие с потерями означает, что некоторые детализированные данные могут быть потеряны из-за операции сжатия. Большинство схем сжатия изображений и видео, таких как JPEG2000 [13], относятся к этой категории. Наконец, сжатие с потерями означает, что операция сжатия необратима.

Методы сжатия данных в БСС могут быть классифицированы по пяти категориям:

1. Методы сжатия на основе построения префиксных кодов рассматривают воспринимаемые данные как последовательность символов, а затем применяют к ним схемы сжатия, используемые для обработки текстовых данных. Унаследованные от этих методов способы сжатия на основе строк также могут обеспечивать сжатие без потерь.

2. Методы сжатия на основе изображений организуют БСС в иерархическую архитектуру, а затем применяют некоторые схемы сжатия изображений, такие как вейвлет-преобразование, чтобы обеспечить множественное разрешение воспринимаемых данных внутри сети. Некоторые незначительные характеристики таких данных могут быть потеряны из-за операций сжатия, и, таким образом, технология сжатия на основе изображения поддерживает сжатие с потерями.

3. Методы кодирования распределенных источников сжимают данные считывания внутри сети в соответствии с теоремой Слепяна – Вольфа и работой [14], которая доказывает, что два или более коррелированных потока данных могут быть закодированы независимо друг от друга и затем декодироваться совместно в приемнике со скоростью, соответствующей их совместной энтропии. Поэтому методы кодирования с распределенным источником могут поддерживать сжатие без потерь.

4. Методы сжатого зондирования показывают, что любые достоверно сжимаемые данные могут быть точно восстановлены из небольшого числа неадаптивных рандомизированных образцов линейной проекции. Таким образом, они могут использовать сжимаемость, не полагаясь на какие-либо предварительные знания или предположения об измеряемых данных. При вышеуказанном наблюдении методы сжатого зондирования могут обеспечить сжатие без потерь.

5. Методы агрегирования данных передают данные в приемник [15]. Поскольку из этих агрегированных данных не могут быть получены данные исходных измерений, сжатие методами агрегирования данных является необратимым. К таким методам относится рассматриваемый в этой статье метод адаптивного сжатия.

Адаптивное сжатие

Наиболее часто сжатие передаваемых данных осуществляется с помощью вейвлет-преобразований. Некоторые незначительные характеристики измеряемых данных могут быть потеряны из-за операций сжатия. Сущность предлагаемого нами метода заключается в том, что указанные потери (мгновенные отклонения реального процесса от восстановленного из сжатого процесса) анализируются, и при выходе анализируемого параметра отклонения за определенные установленные пределы начинает передаваться полная информация о процессе [16]. В качестве анализирующего алгоритма предлагается использовать известный алгоритм «дырявое ведро», широко применяющийся при анализе трафика сетей связи с коммутацией пакетов.

Рассмотрим работу указанного алгоритма на рис. 1. Измерительная информация, поступающая от сенсора, кодируется с помощью АЦП, и в виде цифровых отсчетов m_{ik} поступает на вход буферной памяти. Одновременно в памяти может находиться N отсчетов. При поступлении очередного отсчета наиболее ранний отсчет удаляется.

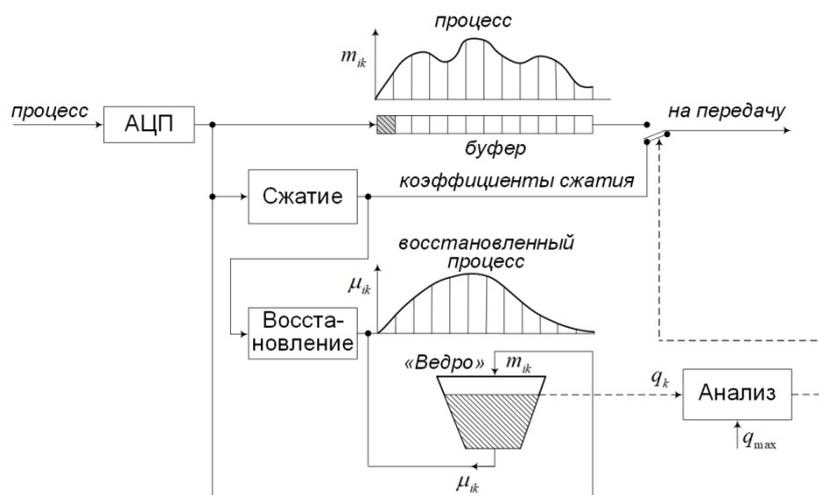


Рис. 1. Структурная схема адаптивного сжатия

Отсчеты также поступают на устройство сжатия. Коэффициенты, получаемые в результате сжатия процесса на данном цикле, поступают циклически на передачу. Одновременно отсчеты поступают на суммирующий вход обработки алгоритмом «дырявое ведро».

По коэффициентам, получаемым в результате «сжатия», производится восстановление процесса, результаты которого в виде отсчетов μ_{ik} поступают на вычитающий вход обработки алгоритмом «дырявое ведро». Уровень «наполнения ведра» q_{ik} сравнивается с заданным максимальным значением q_{max} , и в случае превышения происходит переключение на передачу всех не сжатых данных о процессе из буферной памяти. Если в течение цикла превышение отсутствует, то на передачу поступают только коэффициенты, полученные в результате сжатия исходного процесса.

Способ сжатия с помощью вейвлет требует задержки передачи информации на интервал времени, равный длительности одного цикла, поскольку значения всех коэффициентов разложения могут быть получены лишь по завершению цикла. Если в сети производится циклический доступ методом TDMA [17], то рассмотренный способ сжатия можно считать оправданным. Если же используется метод случайного доступа, то может возникнуть задержка между моментом существенного отклонения процесса и моментом передачи информации об этом отклонении. В указанных случаях целесообразней использовать способ сжатия на основе прогнозирования.

Заключение

Сенсорные узлы питаются от батарей, сохранение их энергии является основной проблемой БСС. Сжатие данных в сети помогает уменьшить количество измеряемых данных, которые сенсорные узлы должны регулярно сообщать приемнику, и значительно снизить потребление энергии. Адаптация алгоритма сжатия к постоянно изменяющимся во времени данным значительно повышает его эффективность. Предлагаемый алгоритм позволяет отслеживать текущие изменения и в случае значительных отклонений предоставляет информацию о предыстории контролируемого процесса.

Список литературы

1. Akyildiz I. F., Su W., Sankarasubramaniam Y., Cayirci E. A survey on sensor networks // IEEE Comm. Magazine. 2002. Vol. 40, № 8. P. 102–114.
2. Zhang P., Sadler C. M., Lyon S. A., Martonosi M. Hardware design experiences in ZebraNet // Proc. ACM Int'l Conf. Embedded Networked Sensor Systems. 2004. P. 227–238.
3. Tseng, Y. C., Wang Y. C., Cheng K. Y., Hsieh Y. Y. iMouse: an integrated mobile surveillance and wireless sensor system // Computer. 2007. Vol. 40, № 6. P. 60–66.
4. Wark T., Corke P., Sikka P. [et al.] Transforming agriculture through pervasive wireless sensor networks // IEEE Pervasive Computing. 2007. Vol. 6, № 2. P. 50–57.

5. Huang Y. M., Hsieh M. Y., Chao H. C. [et al.] Pervasive, secure access to a hierarchical sensor-based healthcare monitoring architecture in wireless heterogeneous networks // *IEEE J. Selected Areas in Comm.* 2009. Vol. 27, № 4. P. 400–411.
6. Yeh L. W., Wang Y. C., Tseng Y. C. iPower: an energy conservation system for intelligent buildings by wireless sensor networks // *Int'l J. Sensor Networks.* 2009. Vol. 5, № 1. P. 1–10.
7. Cardei M., Du D. Z. Improving wireless sensor network lifetime through power aware organization // *ACM Wireless Networks.* 2005. Vol. 11, № 3. P. 333–340.
8. Zou Y., Chakrabarty K. A distributed coverage- and connectivity-centric technique for selecting active nodes in wireless sensor networks // *IEEE Trans. Computers.* 2005. Vol. 54, № 8. P. 978–991.
9. Zhao Q., Gurusamy M. Lifetime maximization for connected target coverage in wireless sensor networks // *IEEE/ACM Trans. Networking.* 2008. Vol. 16, № 6. P. 1378–1391.
10. Heo N., Varshney P. K. Energy-efficient deployment of intelligent mobile sensor networks // *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics – Part A: Systems and Humans.* 2005. Vol. 35, № 1. P. 78–92.
11. Wang Y. C., Hu C. C., Tseng Y. C. Efficient placement and dispatch of sensors in a wireless sensor network // *IEEE Trans. Mobile Computing.* 2008. Vol. 7, № 2. P. 262–274.
12. Nelson M., Gailly J. L. *The data compression book.* MIS Press, 1996. P. 541.
13. Taubman D. S., Marcellin M. W. *JPEG2000: fundamentals, standards and practice.* Kluwer Academic Publishers, 2002.
14. Haupt J., Bajwa W. U., Rabbat M., Nowak R. Compressed sensing for networked data // *IEEE Signal Processing Magazine.* 2008. Vol. 25, № 2. P. 92–101.
15. Голубничая Е. Ю. Агрегирование данных в беспроводных сенсорных сетях мониторинга // Проблемы передачи информации в инфокоммуникационных системах : сб. докл. и тез. VIII Всерос. науч.-практ. конф. Волгоград : Изд-во ВолГУ, 2017. С. 37–42.
16. Лихтциндер Б. Я. Интервальный метод анализа трафика мультисервисных сетей // Модели инфокоммуникационных систем: разработка и применение. Приложение к журналу ИКТ. 2011. Вып. 8. С. 101–152.
17. Голубничая Е. Ю. Применение детерминированного расписания TDMA в беспроводных сенсорных сетях // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций : XX Междунар. науч.-техн. конф., Оптические технологии в телекоммуникациях : XVI Междунар. науч.-техн. конф. : материалы конф. : в 2 т. Уфа : РИК УГАТУ, 2018. Т. 1. С. 135–137.

References

1. Akyildiz I.F., Su W., Sankarasubramaniam Y., Cayirci E. A survey on sensor networks. *IEEE Comm. Magazine.* 2002;40(8):102–114.
2. Zhang P., Sadler C.M., Lyon S.A., Martonosi M. Hardware design experiences in ZebraNet. *Proc. ACM Int'l Conf. Embedded Networked Sensor Systems.* 2004:227–238.
3. Tseng, Y.C., Wang Y.C., Cheng K.Y., Hsieh Y.Y. iMouse: an integrated mobile surveillance and wireless sensor system. *Computer.* 2007;40(6):60–66.
4. Wark T., Corke P., Sikka P. [et al.]. Transforming agriculture through pervasive wireless sensor networks. *IEEE Pervasive Computing.* 2007;6(2):50–57.
5. Huang Y.M., Hsieh M.Y., Chao H.C. [et al.]. Pervasive, secure access to a hierarchical sensor-based healthcare monitoring architecture in wireless heterogeneous networks. *IEEE J. Selected Areas in Comm.* 2009;27(4):400–411.
6. Yeh L.W., Wang Y.C., Tseng Y.C. iPower: an energy conservation system for intelligent buildings by wireless sensor networks. *Int'l J. Sensor Networks.* 2009;5(1):1–10.
7. Cardei M., Du D.Z. Improving wireless sensor network lifetime through power aware organization. *ACM Wireless Networks.* 2005;11(3):333–340.
8. Zou Y., Chakrabarty K. A distributed coverage- and connectivity-centric technique for selecting active nodes in wireless sensor networks. *IEEE Trans. Computers.* 2005;54(8):978–991.
9. Zhao Q., Gurusamy M. Lifetime maximization for connected target coverage in wireless sensor networks. *IEEE/ACM Trans. Networking.* 2008;16(6):1378–1391.
10. Heo N., Varshney P.K. Energy-efficient deployment of intelligent mobile sensor networks. *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics – Part A: Systems and Humans.* 2005;35(1):78–92.
11. Wang Y.C., Hu C.C., Tseng Y.C. Efficient placement and dispatch of sensors in a wireless sensor network. *IEEE Trans. Mobile Computing.* 2008;7(2):262–274.
12. Nelson M., Gailly J.L. *The data compression book.* MIS Press, 1996:541.
13. Taubman D.S., Marcellin M.W. *JPEG2000: fundamentals, standards and practice.* Kluwer Academic Publishers, 2002.
14. Haupt J., Bajwa W.U., Rabbat M., Nowak R. Compressed sensing for networked data. *IEEE Signal Processing Magazine.* 2008;25(2):92–101.

15. Golubnichaya E.Yu. Data aggregation in wireless sensor monitoring networks. *Problemy peredachi informatsii v infokommunikatsionnykh sistemakh: sb. dokl. i tez. VIII Vseros. nauch.-prakt. konf. = Problems of information transmission in infocommunication systems: sat. dokl. and tez. VIII All-Russian Scientific and practical conf.* Volgograd: Izd-vo VolGU, 2017:37–42. (In Russ.)
16. Likhttsinder B.Ya. Interval method for traffic analysis of multiservice networks. *Modeli infokommunikatsionnykh sistem: razrabotka i primenenie. Prilozhenie k zhurnalu IKT = Models of infocommunication systems: development and application. Appendix to the Journal of ICT.* 2011;8:101–152. (In Russ.)
17. Golubnichaya E.Yu. Applying a deterministic TDMA schedule to wireless sensor networks. *Problemy tekhniki i tekhnologii telekommunikatsiy: XX Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., Opticheskie tekhnologii v telekommunikatsiyakh: XVI Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.: materialy konf.: v 2 t. = Problems of Telecommunications Engineering and Technology: XX International Scientific and Technical Journal. conf., Optical technologies in Telecommunications: XVI International Scientific and Technical Journal. conf.: materials of conf.: in 2 vol.* Ufa: RIK UGATU, 2018;1:135–137. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Борис Яковлевич Лихтциндер

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры сетей и систем связей,
Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
(Россия, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23)
E-mail: lixt@psuti.ru

Boris Ya. Likhttsinder

Doctor of technical sciences, professor,
professor of sub-department of network
and communication systems,
Volga Region State University
of Telecommunications and Informatics
(23 L. Tolstogo street, Samara, Russia)

Юлия Олеговна Бакай

студентка,
Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
(Россия, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23)
E-mail: ov.bakai@gmail.com

Yulia O. Bakai

Student,
Volga Region State University
of Telecommunications and Informatics
(23 L. Tolstogo street, Samara, Russia)