

文章编号: 2095-2163(2021)11-0001-05

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

# 无线传感器网络的通信调度算法研究综述

朱同鑫, 李建中

(哈尔滨工业大学 计算机科学与技术学院, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 通信调度是无线传感器网络中最基础且重要的问题之一, 决定了无线传感器网络的可行性及性能, 因此引起了国内外学者的广泛关注。通过对网络中传感器节点的调度, 使其高效协作地完成网络中的监测、计算等任务。主要包括广播调度问题、数据收集调度问题, 以及数据聚集调度问题。本文对现有无线传感器网的通信调度算法进行了性能比较分析。

**关键词:** 无线传感器网络; 通信调度; 广播; 数据收集; 数据聚集

## A review of algorithms for communication scheduling problem in wireless sensor networks

ZHU Tongxin, LI Jianzhong

(School of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**[Abstract]** Communication scheduling is one of the most fundamental and important problem in wireless sensor networks, which decides the feasibility and performance of wireless sensor networks. It focuses on scheduling the sensor nodes in wireless sensor networks, making them cooperate with each other to accomplish sensing and computation efficiently. The communication scheduling problem includes broadcast scheduling problem, data collection scheduling problem and data aggregation scheduling problem. In this paper, we summarize the existing communication scheduling algorithms in wireless sensor networks and provide performance analysis.

**[Key words]** wireless sensor networks; communication scheduling; broadcast; data collection; data aggregation

### 0 引言

无线传感器网络为人类低成本地监测复杂的物理世界提供了一条有效的途径, 被广泛地应用于军事防御、环境监测、交通监测、结构健康监测各个领域。由于通信调度关系到传感器节点是否可以高效协作地完成网络中的监测、计算任务, 因而引起了国内外学者的广泛关注。通信调度问题主要研究如何合理利用无线传感器网络中有限的信道资源, 为传感器节点分配传输时间, 避免传感器节点的传输干扰, 提高通信质量以及数据包传输的成功率。常见的优化目标有: 最小化传输的时间延迟、最小化网络的能量消耗等等。通信调度问题主要包括: 广播调度问题、无融合的数据收集调度、有融合的数据聚集调度问题。

### 1 广播调度算法

广播操作是无线传感器网络中最基础且最重要的操作之一, 实现了一个传感器节点的源数据包在网络内的广播, 使得网络内所有传感器节点都接收

到源数据包, 通常用来发布控制命令等。传感器节点只能与一定通信范围内的其他传感器节点通信, 而该通信范围相比于整个无线传感器网络的监测范围是很小的。因此, 广播源节点无法直接将源数据包传输给网络内的所有传感器节点, 需要借助网络中的其他传感器节点将收到的源数据包转发。但是, 多个传感器节点的同时传输可能存在干扰。因此, 需要调度传感器节点在广播过程中的数据传输, 使得所有数据传输都是通信无干扰的。目前已有大量研究工作为无线传感器网络设计广播调度算法。广播调度算法可分为两类: 一是非占空比无线传感器网络的广播调度算法, 另一类是占空比无线传感器网络的广播调度算法。

在非占空比无线传感器网络中, 传感器节点可以在其生命周期内的任意时刻传输或接收数据包。文献[1]首先研究了在基于电池能源的无线传感器网络中, 最小化能量消耗的广播调度问题, 并证明了该问题是 NP 难的。文献[2]在无线传感器网络的链路层和路由层之间增加 CorLayer 层, CorLayer 层通过将某些链路加入黑名单的方式简化网络拓扑,

**作者简介:** 朱同鑫(1992-), 女, 博士研究生, 主要研究方向: 传感器网络的近似计算、调度; 李建中(1950-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 传感器网络、数据仓库、海量数据管理等。

收稿日期: 2021-03-25

从而降低广播的能量消耗。文献[3]致力于为网络中数据包的广播构建主干网,并通过网络编码降低广播过程中的冗余传输,进而降低整个广播过程的能量消耗。文献[4]证明了在基于电池能源的无线传感器网络中,最小化时间延迟的广播调度问题是 NP 难的,并提出了可以同时保证时间延迟和传输次数的近似广播调度算法。文献[5]研究了在基于电池能源的无线传感器网络中,最小化时间延迟的广播调度问题,并提出 3 个算法,并证明了 3 个算法的广播时间延迟上界。在文献[6]中,作者首先研究了将一个源节点的数据包广播至整个网络的广播调度问题,并提出了一个近似比为 12 的最小化时间延迟的近似广播调度算法。然后,作者研究了将网络中所有节点的数据包广播至整个网络的广播调度问题,并提出两个近似比分别为 20 和 34 的最小化时间延迟的近似广播调度算法。

在占空比无线传感器网络中,传感器节点为了节省能量,可以在活动和休眠状态之间轮换,但是只能在活动状态下接收数据。文献[7]证明了在基于电池能源的占空比无线传感器网络中,最小化时间延迟的广播调度问题是 NP 难的,并为该问题提出了一个近似比为  $24T + 1$  的近似算法( $T$  为一个工作周期包含的时间槽数)。文献[8]提出了一个名为 OTAB 的近似最小化时间延迟的广播调度算法,该研究将网络中所有节点的数据包广播至整个网络的广播调度问题,证明了该问题是 NP 难的,并提出两个近似比分别为  $17T + 20$  和  $(\Delta + 22)T$  的近似最小化时间延迟的广播调度算法( $\Delta$  为网络中节点的最大度)。文献[9]研究了在基于电池能源的占空比无线传感器网络中,将源节点的数据包传输至多个指定节点的多播调度问题,为网络设计多播调度算法,使得算法在满足给定时间延迟上界条件的同时,最小化节点的活动状态时间。当目的节点数  $K = 2$  时,作者提出了一个最优算法,当目的节点数  $K > 2$  时,作者提出了近似比为  $(K - 1)$  的多播调度算法。文献[10]研究了在基于电池能源的占空比无线传感器网络中,最小化时间延迟的广播调度问题。首次提出自适应地构造广播树的方法,通过并行构造广播树和生成广播调度,达到降低网络广播时间延迟的目的。文献[11]研究了在基于电池能源的占空比无线传感器网络中,通过容忍通信干扰来降低时间延迟的广播调度问题,提出了一个名为 CTS 的广播调度策略。在 CTS 调度策略中,允许某些节点存在通信干扰,通过重传的方式确保所有节

点都能接收到广播数据包。

## 2 无融合的数据收集算法

无融合的数据收集调度问题,研究了在无线传感器网络中,将所有传感器节点在某一采集周期生成的感知数据包收集到汇聚节点的通信调度。由于无融合的数据收集操作是无线传感器网络的基础操作,直接影响到网络的性能。目前,已经有大量工作专注于无融合的数据收集调度问题的研究。根据网络应用的通信干扰模型可将现有研究工作分为两类:协议干扰模型下的数据收集调度问题和物理干扰模型下的数据收集调度问题。

在协议干扰模型下,传感器节点间的通信干扰取决于节点间的距离和通信干扰半径之间的关系。文献[12]证明了在协议干扰模型下,基于电池能源的无线传感器网络中,最小化时间延迟的数据收集调度问题是 NP 难的。文献[13]为具有树型拓扑的无线传感器网络,提出了一个最小化数据收集时间的调度算法,并将问题扩展到图型拓扑结构,分析了具有图型拓扑的无线传感器网络的数据收集时间上界。文献[14]分别研究了在树型拓扑结构和图型拓扑结构的无线传感器网络中,最小化时间延迟的数据收集调度问题,分别为树型拓扑结构和图型拓扑结构的无线传感器网络提出了一个数据收集调度算法,并证明了这两个算法生成的数据收集调度的时间延迟上界。文献[15]分别研究了无融合与有融合的数据收集调度问题,并分别为降低数据收集的时间延迟、降低数据聚集的时间延迟、以及提高单位时间内收集数据数量提出了调度算法。文献[16]研究了在具有任意拓扑结构的无线传感器网络中,数据收集速率的上界,并提出了一个基于广度优先搜索树的贪心数据收集调度算法,分析了该算法生成的数据收集速率的上界。

在物理干扰模型下,传感器节点间的通信干扰取决于传输节点和接收节点间传输信号的信噪比( $SINR$  值)。文献[17]考虑了在树型拓扑的无线传感器网络中,有融合的数据聚集调度问题和无融合的数据收集调度问题,分别在协议干扰模型和物理干扰模型下,设计了具有多项式时间的最小化时间延迟的启发式调度算法。文献[18]研究了异构无线传感器网络的分布式数据收集调度问题,提出了一个可扩展的分布式数据收集调度算法,该算法不仅提高了 sink 节点接收数据的速率,同时考虑了数据传输的公平性。文献[19]通过将网络分块,并把

每个块内的传感器节点抽象为一个超级节点, 将所有超级节点构建成一棵数据收集树。基于数据收集树, 提出了一个提高 sink 节点数据收集速率的数据收集调度算法。文献[20]研究了概率无线传感器网络的数据收集调度问题, 即网络中的每一个链路有一个传输成功概率, 该概率与链路两个顶点之间传输信号的信噪比 (SINR 值) 有关。作者为概率无线传感器网络提出了一个提高 sink 节点收集数据速率的数据收集调度算法。文献[21]研究了低延迟数据收集调度问题, 在物理干扰模型下, 为无线传感器网络构建数据收集树, 调度数据收集树上的链路, 包括传输时间分配以及传输功率分配。

### 3 有融合的数据聚集调度算法

有融合的数据聚集调度算法, 研究了在无线传感器网络中将网络中所有传感器节点在某一采集周期生成的感知数据包, 通过网内计算的方式聚集到汇聚节点的通信调度。有融合的数据聚集调度问题是无线传感器网络中基础且重要的问题, 已有大量研究为基于电池能源的无线传感器网络生成有融合的数据聚集调度算法。这些研究工作主要分为两类: 一类是为非占空比无线传感器网络设计有融合的数据聚集调度算法, 另一类是为占空比无线传感器网络设计有融合的数据聚集调度算法。

在非占空比无线传感器网络中, 传感器节点由电池供能, 可以在其生命周期内的任意时刻传输或接收数据包。文献[22]证明了在非占空比无线传感器网络中, 最小化时间延迟的数据聚集调度问题是 NP 难的, 并提出了一个近似比为  $\Delta - 1$  的调度算法 ( $\Delta$  为网络的最大度)。文献[23]研究了在协议干扰模型下, 最小化时间延迟的数据聚集调度问题, 并基于最大独立集提出了一个时间延迟上界为  $23R + \Delta - 18$  的数据聚集调度算法。文献[24]同样专注于降低数据聚集调度的时间延迟, 并提出了 3 个数据聚集调度算法, 其生成的数据聚集调度的时间延迟上界分别为  $15R + \Delta - 4$ 、 $2R + O(\log R) + \Delta$ 、以及  $(1 + O(\log R / \sqrt[3]{R}))R + \Delta$ 。文献[25]为非占空比无线传感器网络提出分布式的数据聚集调度算法, 该算法生成的数据聚集调度的时间延迟上界为  $24D + 6\Delta + 16$  ( $D$  为网络直径)。文献[26]同样为非占空比无线传感器网络提出了一个分布式数据聚集调度算法, 该算法将数据聚集的时间延迟上界降低至  $16R + \Delta - 14$ 。文献[27]提出了一个基于分簇的数据聚集树构建算法, 并基于该数据聚集树分布式地生成网

络的数据聚集调度, 证明了该数据聚集调度的时间延迟上界为  $4R' + 2\Delta - 2$  ( $R'$  为网络中心节点与其他节点的最远距离)。不同于上述研究工作, 文献[28]并行地构建数据聚集树和分配传感器节点的传输时间, 分布式地生成网络的数据聚集调度, 并证明了该调度的时间延迟上界为  $(\lfloor 2\pi/\arccos(1/(1+\varepsilon)) \rfloor + 3)R + \Delta - 4$ 。

在占空比无线传感器网络中, 传感器节点由电池供能。为了节省能量消耗、延长生命周期, 传感器节点在活动状态和休眠状态之间轮换, 并且只能在活动状态下接收数据。文献[29]证明了在占空比无线传感器网络中, 最小化时间延迟的数据聚集调度问题是 NP 难的, 并提出了一个时间延迟上界为  $(15R(G, s) + \Delta - 3)T$  的数据聚集调度算法。其中,  $R(G, s)$  是网络拓扑图  $G$ , 以汇聚节点  $s$  为中心的网络半径,  $T$  为一个工作周期内, 节点处于活动状态的时间单位总和。文献[30]为协议干扰模型下的占空比无线传感器网络, 提出了两个数据聚集调度算法, 其生成的数据聚集调度的时间延迟上界分别为  $3\beta^2 |T| (15R_s + \Delta - 1)$  和  $(45\beta^2 + 1) |T| R + 3\beta^2 |T| (\Delta - 3)$ 。其中,  $\beta = \lceil 2/3(\alpha + 2) \rceil$ , 而  $\alpha$  为干扰半径与传输半径的比值,  $R_s$  是以汇聚节点  $s$  为根的广度优先搜索树的最大深度。文献[31]考虑了一个特殊的占空比无线传感器网络, 在一个工作周期, 每个传感器节点只能在一个时间单位接收数据。作者基于平衡最短路径树, 构造了数据聚集树, 并提出了一个数据聚集调度算法。文献[32]研究了在物理干扰模型下的占空比无线传感器网络中, 最小化时间延迟的数据聚集调度问题, 提出了两个算法, 并证明了这两个算法生成的数据聚集调度的时间延迟上界。文献[33]同样研究了在物理干扰模型下的占空比无线传感器网络中, 最小化时间延迟的数据聚集调度问题, 提出了一个近似算法, 并证明了当网络的最大度有界时, 该算法的近似比至多为占空比网络工作周期的常数倍。文献[34]为占空比无线传感器网络提出了一个无结构的最小化时间延迟的分布式数据聚集调度算法, 该算法并行地构建数据聚集树和调度传感器节点的传输, 并证明了该算法生成的数据聚集调度的时间延迟上界。

### 4 结束语

通信调度问题是无线传感器网络中最基础且重要的研究问题。文中对现有的无线传感器网络中的广播调度算法、无融合的数据收集调度算法、以及有

融合的数据聚集调度算法进行了基本概括,并对相应的性能进行了简单分析。

## 参考文献

- [1] ZAGALJ M, HUBAUX J, ENZ CC. Minimum-energy broadcast in all-wireless networks: NP-completeness and distribution issues [C] // AKYILDIZ I F, LIN JY, JAIN R, et al. Proceedings of the Eighth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MOBICOM 2002, Atlanta, Georgia, USA, September 23-28, 2002. [S.l.]: ACM, 2002: 172-182.
- [2] WANG S, KIM S M, LIU Y, et al. CorLayer: A Transparent Link Correlation Layer for Energy-Efficient Broadcast [C] // . 2015: 1970-1983.
- [3] WANG S, TAN G, LIU Y, et al. Coding Opportunity Aware Backbone Metrics for Broadcast in Wireless Networks [J]. IEEE Trans. Parallel Distributed Syst., 2014, 25(8): 1999-2009.
- [4] GANDHI R, MISHRA A, PARTHASARATHY S. Minimizing broadcast latency and redundancy in ad hoc networks [J]. IEEE/ACM Trans. Netw., 2008, 16(4): 840-851.
- [5] HUANG S C, WAN P, JIA X, et al. Minimum-Latency Broadcast Scheduling in Wireless Ad Hoc Networks [C] // INFOCOM 2007. 26<sup>th</sup> IEEE International Conference on Computer Communications, Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, 6-12 May 2007, Anchorage, Alaska, USA. [S.l.]: IEEE, 2007: 733-739.
- [6] GANDHI R, KIM Y, LEE S, et al. Approximation Algorithms for Data Broadcast in Wireless Networks [J]. IEEE Trans. Mob. Comput., 2012, 11(7): 1237-1248.
- [7] HONG J, CAO J, LI W, et al. Sleeping Schedule-Aware Minimum Latency Broadcast in Wireless Ad Hoc Networks [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Communications, ICC 2009, Dresden, Germany, 14-18 June 2009. [S.l.]: IEEE, 2009: 1-5.
- [8] JIAO X, LOU W, MA J, et al. Minimum Latency Broadcast Scheduling in Duty-Cycled Multihop Wireless Networks [J]. IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst., 2012, 23(1): 110-117.
- [9] CHEN Q, GAO H, CHENG S, et al. Centralized and Distributed Delay-Bounded Scheduling Algorithms for Multicast in Duty-Cycled Wireless Sensor Networks [J]. IEEE/ACM Trans. Netw., 2017, 25(6): 3573-3586.
- [10] CHEN Q, CAI Z, CHENG L, et al. Low-Latency Concurrent Broadcast Scheduling in Duty-Cycled Multihop Wireless Networks [C] // 39<sup>th</sup> IEEE International Conference on Distributed Computing Systems, ICDCS 2019, Dallas, TX, USA, July 7-10, 2019. [S.l.]: IEEE, 2019: 851-860.
- [11] LE D T, DUC T L, ZALYUBOVSKIY VV, et al. Collision-tolerant broadcast scheduling in duty-cycled wireless sensor networks [J]. J. Parallel Distributed Comput., 2017, 100: 42-56.
- [12] CHOI H, WANG J, HUGHES E A. Scheduling for information gathering on sensor network [J]. Wirel. Networks, 2009, 15(1): 127-140.
- [13] FLORENS C, FRANCESCETTI M, MCELIECE R J. Lower bounds on data collection time in sensory networks [J]. IEEE J. Sel. Areas Commun., 2004, 22(6): 1110-1120.
- [14] GANDHAM S, ZHANG Y, HUANG Q. Distributed time-optimal scheduling for convergecast in wireless sensor networks [J]. Computer Networks, 2008, 52(3): 610-629.
- [15] CHEN S, WANG Y, LI X, et al. Order-Optimal Data Collection in Wireless Sensor Networks: Delay and Capacity [C] // Proceedings of the Sixth Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks, SECON 2009, June 22-26, 2009, Rome, Italy. [S.l.]: IEEE, 2009: 1-9.
- [16] CHEN S, HUANG M, TANG S, et al. Capacity of Data Collection in Arbitrary Wireless Sensor Networks [J]. IEEE Trans. Parallel Distributed Syst., 2012, 23(1): 52-60.
- [17] INCEL O D, GHOSH A A, KRISHNAMACHARI B, et al. Fast Data Collection in Tree-Based Wireless Sensor Networks [J]. IEEE Trans. Mob. Comput., 2012, 11(1): 86-99.
- [18] JI S, CAI Z. Distributed Data Collection in Large-Scale Asynchronous Wireless Sensor Networks Under the Generalized Physical Interference Model [J]. IEEE/ACM Trans. Netw., 2013, 21(4): 1270-1283.
- [19] JI S, HE J S, ULUAGAC A S, et al. Cell-based snapshot and continuous data collection in wireless sensor networks [J]. ACM Trans. Sens. Networks, 2013, 9(4): 47:1-47:29.
- [20] JI S, BEYAH R A, CAI Z. Snapshot and Continuous Data Collection in Probabilistic Wireless Sensor Networks [J]. IEEE Trans. Mob. Comput., 2014, 13(3): 626-637.
- [21] GONG D, YANG Y. Low-Latency SINR-Based Data Gathering in Wireless Sensor Networks [J]. IEEE Trans. Wirel. Commun., 2014, 13(6): 3207-3221.
- [22] CHEN X, HU X, ZHU J. Minimum Data Aggregation Time Problem in Wireless Sensor Networks [C] // Lecture Notes in Computer Science, Vol 3794: Mobile Ad-hoc and Sensor Networks, First International Conference, MSN 2005, Wuhan, China, December 13-15, 2005, Proceedings. [S.l.]: Springer, 2005: 133-142.
- [23] HUANG S C, WAN P, VU C T, et al. Nearly Constant Approximation for Data Aggregation Scheduling in Wireless Sensor Networks [J], 2007: 366-372.
- [24] WAN P, HUANG S C, WANG L, et al. Minimum-latency aggregation scheduling in multihop wireless networks [C] // KNIGHTLY E W, CHIASSERINI C, LIN X. Proceedings of the 10<sup>th</sup> ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, MobiHoc 2009, New Orleans, LA, USA, May 18-21, 2009. [S.l.]: ACM, 2009: 185-194.
- [25] YU B, LI J, LI Y. Distributed Data Aggregation Scheduling in Wireless Sensor Networks [C] // INFOCOM 2009. 28<sup>th</sup> IEEE International Conference on Computer Communications, Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, 19-25 April 2009, Rio de Janeiro, Brazil. [S.l.]: IEEE, 2009: 2159-2167.
- [26] XU X H, LI X Y, MAO X F, et al. A Delay-Efficient Algorithm for Data Aggregation in Multihop Wireless Sensor Networks [J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems, 2010, 22(1): 163-175.
- [27] LI Y, GUO L, PRASAD SK. An Energy-Efficient Distributed Algorithm for Minimum-Latency Aggregation Scheduling in Wireless Sensor Networks [C] // 2010 International Conference on Distributed Computing Systems, ICDCS 2010, Genova, Italy, June 21-25, 2010. [S.l.]: IEEE Computer Society, 2010: 827-836.