

基于相继干扰消除和跨层并发传输的物联网 数据聚合调度

焦贤龙, 郭松涛, 黎 勇, 李艳涛, 向朝参
(重庆大学计算机学院, 重庆 400044)

摘 要: 近年来物联网在许多军事和民用领域(灾后恢复、环境监控和军事对抗等)展现出蓬勃的应用前景,而在实际应用中,为了维护终端数据的新鲜度,必须以尽可能低的时延来完成数据聚合调度,从而为用户提供及时准确的数据服务.但是,受信号干扰的影响,最低时延数据聚合调度问题已被证明是 NP(Non-deterministic Polynomial) 难问题,而如何设计低时延的数据聚合调度算法是物联网领域的研究热点.现有面向传统物联网(如无线传感网)的解决方案通常采用逐层调度方法和干扰避免技术来实现,减少了可并发传输的链路数目,不利于降低数据聚合时延.值得关注的是,相继干扰消除(Successive Interference Cancellation, SIC)技术作为一种简单而强大的多包接收技术,是研究者近年来取得的重大突破,而如何结合 SIC 技术来设计物联网低时延数据聚合调度算法具有非常重要的理论研究意义.因此,本文以最大程度地增加可并发传输的链路数目为目标,利用跨层并发传输的思想来进行数据聚合调度,并结合 SIC 技术来实现链路调度,提出了一种新颖的低时延数据聚合调度算法.实验结果表明,与现有算法相比,本文所提算法在数据聚合时延优化方面最多可达 43.8%.

关键词: 相继干扰消除; 跨层并发传输; 数据聚合调度; 最短路径树; 物联网

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2021)10-1982-11

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.12263/DZXB.20201348

SIC-Based Data Aggregation Scheduling with Cross-Layer Concurrent Transmission for Internet of Things

JIAO Xian-long, GUO Song-tao, LI Yong, LI Yan-tao, XIANG Chao-can
(School of Computer Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Recent years have witnessed booming application of Internet of Things to many military and civilian fields (disaster recovery, environmental monitoring, military confrontation, and so on). In practical application, in order to maintain the freshness of terminal data, data aggregation scheduling must be completed with the lowest possible delay, so as to provide users with timely and accurate data services. However, affected by signal interference, the minimum-delay data aggregation scheduling problem has been proved to be NP-hard, and how to design a low-delay data aggregation scheduling algorithm is a hot topic in the field of Internet of Things. Most of existing solutions for traditional Internet of Things (such as wireless sensor networks) usually adopt the layer-by-layer scheduling method and the interference-avoidance technology, which is not conducive to improve data aggregation delay due to the reduced number of concurrent transmission links. It is worth noting that successive interference cancellation (SIC) technology, as a kind of simple and powerful multi-packet receiving technology, is a major breakthrough made by researchers in recent years. How to combine SIC technology to design low-delay data aggregation scheduling algorithms for Internet of Things has very important theoretical research significance. Therefore, this paper utilizes the idea of cross-layer concurrent transmission to schedule the data aggregation process, incorporates the SIC technology to schedule the data aggregation links, and proposes a novel delay-efficient data aggregation scheduling algorithm, with the aim of increasing the number of concurrent transmission links to the most extent. Simulation results show that, our algorithm can improve the data aggregation delay by at most 43.8% compared with the existing

收稿日期: 2020-11-30; 修回日期: 2021-03-16; 责任编辑: 王天慧

基金项目: 国家自然科学基金(No.62072064, No.61872447, No.61771081, No.62072061); 重庆市自然科学基金重点项目(No. cstc2020jcyj-zdxmX0026); 之江实验室课题开放基金(No.2021LC0AB01); 重庆市自然科学基金面上项目(No.cstc2019jcyj-msxmX0110)

algorithm.

Key words: successive interference cancellation; cross-layer concurrent transmission; data aggregation scheduling; shortest path tree; Internet of Things

1 引言

物联网通常由规模庞大的终端设备组成,能够为用户实时收集现实世界的重要数据,近年来在许多军事和民用领域(如灾后恢复、环境监控和军事对抗等)展现出蓬勃的应用前景^[1-7]. 物联网主要采用无线通信模式来实现数据传输,而无线信号衰减和干扰信号多样等网络特征使得物联网在满足实际应用需求中仍然面临诸多挑战,其中如何快速地收集终端设备的数据为用户提供及时准确的数据服务是物联网面临的主要挑战之一.

数据聚合是物联网实现数据收集采用的重要操作. 首先,用户通常只关心某个特定区域感知数据的最大值、最小值或平均值,而受无线通信距离的限制,物联网设备感知的数据一般通过多跳转发方式传输给用户. 转发终端执行数据聚合可以减少传输数据量,因而可以降低传输时延. 其次,数据聚合可以移除数据异常值,从而改进感知数据的准确性. 最后,通过设置不同的数据聚合函数,可以降低数据冗余度,从而满足不同的实际应用需求.

在物联网的许多应用中,为了维护终端数据的新鲜度,必须以尽可能低的时延来完成数据聚合调度. 例如,在环境监控应用中,及时收集并检测出环境异常数据能够为监控用户进行应急处理提供有效支撑. 然而,由于无线信号之间的干扰,物联网中的最低时延数据聚合调度问题已被证明是 NP(Non-deterministic Polynomial) 难问题^[8]. 近年来研究者高度关注该问题,并且提出了许多低时延的近似数据聚合算法^[9-19]. 但是,已有算法通常都是采用逐层调度方法和干扰避免技术来实现,减少了可并发传输的链路数目,不利于降低数据聚合时延. 因此,如何有效地降低物联网的数据聚合时延值得深入研究.

值得关注的是,相继干扰消除技术(Successive Interference Cancellation, SIC)可以从同时传输的干扰信号中解码出数据报文,是一种简单而强大的多包接收技术,在应用到物联网时能显著改进网络性能^[20-27]. 与传统传感器不同,物联网终端设备具有更强的信号处理和计算能力,从而能够有效地支持 SIC 技术. SIC 技术的引入为降低数据聚合时延提供了新的途径. 因此,如何结合 SIC 技术来设计物联网的低时延数据聚合调度算法具有非常重要的理论研究意义.

本文研究物理干扰模型下物联网的最低时延数据

聚合(Minimum-delay Data Aggregation, MDA)问题,提出了一种新颖的低时延数据聚合调度算法,称为 SDASC (SIC-based Data Aggregation Scheduling with Cross-layer concurrent transmission). SDASC 算法以最大限度地增加可并发传输的链路数目为目标,利用跨层并发传输的思想来调度数据聚合过程,并结合 SIC 技术来实现数据聚合链路调度.

本文的主要贡献包括:

(1) 构建了应用于智慧城市空气质量数据收集的物联网模型,给出了物理干扰模型下物联网 MDA 问题的形式化定义;

(2) 提出了一种低时延的数据聚合调度算法 SDASC. 该算法充分利用跨层并发传输和 SIC 技术的优良特点来实现数据聚合调度,显著增加可并发传输的数据聚合链路数目;

(3) 通过理论分析证明了 SDASC 算法的正确性和时间复杂度;

(4) 仿真实验结果表明,与已有算法相比,SDASC 算法在数据聚合时延优化方面最多可达 43.8%.

本文第 2 节介绍低时延数据聚合调度算法和 SIC 技术的相关工作. 第 3 节介绍面向智慧城市应用的物联网系统模型,并给出最低时延数据聚合问题的形式化定义. 第 4 节提出 SDASC 算法,并分析算法的正确性和时间复杂度. 第 5 节实验验证 SDASC 算法的性能,并对实验结果进行对比分析. 最后,总结本文的研究工作.

2 相关工作

数据聚合能够显著减少数据传输量,已成为物联网领域的研究热点之一. 现有工作从优化数据聚合的时延^[8-19]、复杂度^[28]、聚合函数准确性^[29]、安全性^[30-32]、冗余度^[33]和质量^[34]等多个方面做了有益的探索,并取得了一定的研究成果. 本文重点关注数据聚合时延优化问题,因而主要介绍此方面的研究工作. 研究者近年来提出了许多低时延数据聚合调度算法,而信号干扰模型是算法设计必须考虑的重要因素. 现有的信号干扰模型包括图干扰模型、协议干扰模型和物理干扰模型. 因此,本文将分别基于不同的信号干扰模型来介绍相关数据聚合调度算法. 此外,本文所提算法采用 SIC 技术来实现数据聚合链路调度,因而也将介绍 SIC 技术的相关工作.

2.1 数据聚合调度算法

2.1.1 图干扰模型

图干扰模型下,终端设备的信号干扰范围等于其传输范围,通常建模为以设备为圆心且以设备最大传输距离为半径的圆.当接收终端处于其他发送终端的干扰范围时,该接收终端无法接收其发送终端的数据.针对此信号干扰模型,Chen 等人^[8]证明了传统物联网下的 MDA 问题为 NP 难问题,并提出了一种近似比为最大设备度的贪婪算法.在此基础上,研究者利用连通支配集、最大独立集和节点调度等方法来设计低时延数据聚合调度算法^[9,13,14],理论近似比得到不断改进.文献[15]和文献[16]主要关注能量采集物联网,通过分析这类网络的特征来设计图干扰模型下的低时延数据聚合算法.文献[18]和文献[19]从优化数据聚合树的角度来降低数据聚合时延,并且确保数据聚合调度不产生信号干扰.图干扰模型下,信号干扰主要来源于局部邻居范围,因而处理相对比较简单.

2.1.2 协议干扰模型

现有研究发现,终端设备的干扰范围通常要大于其传输范围.因此,研究者提出了协议干扰模型来刻画无线信号之间的干扰,将干扰范围和传输范围建模为以设备为圆心的同心圆,半径分别为设备的最大干扰距离和最大传输距离.与图干扰模型相比,协议干扰模型下设备之间的信号干扰关系更加复杂,因而需要精心设计干扰处理方法来避免信号干扰.针对协议干扰模型,文献[10]以单信道异步睡眠传感网为研究对象,采用六边形着色方法和最小覆盖策略来设计低时延的近似算法,而文献[17]考虑多信道通信场景,采用逐层调度方法、干扰避免技术和活跃冲突图等提出了低时延的数据聚合调度算法.

2.1.3 物理干扰模型

图干扰模型和协议干扰模型都认定干扰范围外的信号传输不会产生信号干扰,然而实际应用中发现,无线信号干扰具有累积效应,因而研究者又提出了物理干扰模型,以更准确地刻画无线信号之间的真实干扰效果.因为图干扰模型和协议干扰模型都不能刻画无线信号的累积干扰效应,所以基于这两种信号干扰模型设计的数据聚合调度算法都未能真正实现干扰避免调度.物理干扰模型下,接收终端的信号干扰噪声比大于特定阈值时才能正确解码发送终端的数据.针对物理干扰模型,Xu 等人^[11]利用最大独立集的几何特性和分块着色方法来设计无干扰的低时延数据聚合调度算法,而 Tang 等人^[12]基于连通图和图着色方法提出了两种低时延的近似算法.

2.1.4 现有算法总结

值得关注的是,上述算法都是遵循逐层调度的方

式来实现数据聚合,即所有终端设备根据到汇聚设备的跳数距离进行分层,数据从最远层以多跳转发方式传输到最近层.此外,现有算法都是采用干扰避免的思想来实现链路调度,即认定为相互干扰的链路分配到不同的时间片进行调度.然而,上述调度方法减少了可并发传输的链路数目,不利于降低数据聚合时延.

2.2 SIC 技术

SIC 技术最早是在码分多址系统中用于消除多址信号干扰^[35].该技术支持接收端从多个发送端的混合信号中根据信号强度从强到弱迭代地解码出干扰信号和数据信号,在物理层实现多包接收,从而有效地提升系统的性能.此外,该技术属于接收端干扰管理机制,不需要发送端的复杂协同,因而在物联网中易于实现.文献[20~24]将 SIC 技术应用到非正交多址访问系统中,分别用于优化系统的安全性能、能量效率、吞吐量、用户公平性和位错率等. Yang 等人^[25]考虑基站和用户之间支持 SIC 的无线网络,提高了用户的报文传输成功率. Jiang 等人^[26]为无线多跳网络提出了一种 SIC 跨层优化框架,综合考虑物理层、链路层和网络层的信息,以优化网络吞吐量.文献[27]研究了非累积干扰模型与有序累积干扰模型下支持 SIC 的无线网络链路调度算法,链路调度的网络吞吐量得以提升.文献[36]考虑如何应用 SIC 技术消除互相关噪声,分析和测试该技术的性能受接收端带宽的影响. Grabner 等人^[37]在 MIMO 系统中应用 SIC 技术来降低系统的运行时间复杂度.

但是,前期 SIC 相关研究主要面向如何优化网络吞吐量、报文传输成功率和能耗等,对于如何降低物联网数据聚合时延的研究则较少涉及.因此,本文将结合 SIC 技术来设计数据聚合调度算法,以增加可并发传输的链路数目,降低数据聚合时延.

3 系统模型与问题定义

3.1 网络模型

本文考虑物联网在智慧城市中的应用,如图 1 所示, $n-1$ 个终端设备部署于城市特定区域监测空气质量,1 个网关设备周期性地收集所有终端设备的空气质量数据.数据在传输过程中可以在转发终端进行聚合,以减少数据传输量.

网络可建模为图 $G=(V, E)$,其中 V 是设备集合,包含网关设备和所有终端设备; E 是边集,当两个终端设备 u 和 v 的欧氏距离 $d(u, v)$ 不超过传输半径 r 时,两个设备之间存在一条边.假设链路 l_{uv} 包含一个传输设备 u 和一个接收设备 v .

时分多址(Time Division Multiple Address, TDMA)协议可有效处理信号冲突,因而本文采用 TDMA 协议作为多址接入信道(Multiple Access Channel, MAC)协

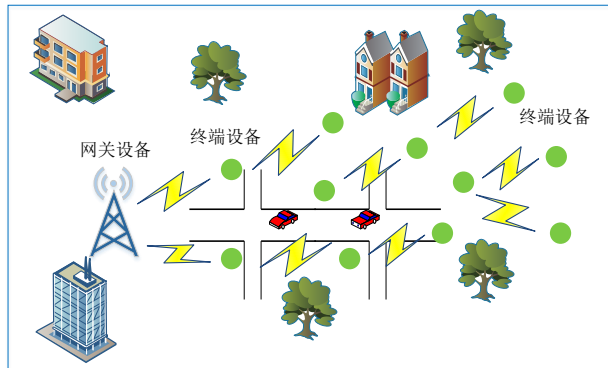


图1 应用于智慧城市的物联网模型

议. 调度周期划分为若干时间片. 每个设备可以在一个时间片内完成数据传输或接收,但不能同时进行数据传输和接收.

3.2 信号干扰模型

物理干扰模型考虑信号干扰的累积效应,更符合干扰信号的实际情况,因而本文假设信号干扰模型为物理干扰模型. 在物理干扰模型下,设备 v 的信号干扰噪声比(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)需要满足以下条件才能解码设备 u 的数据:

$$\text{SINR}_v^u = \frac{P_u/d^\alpha(u,v)}{\sum_{w \in U \setminus \{u\}} P_w/d^\alpha(w,v) + N_0} \geq \beta \quad (1)$$

其中, P_u 和 P_w 分别表示设备 u 和 w 的传输功率. U 表示与设备 u 同时传输数据的设备集合. N_0 、 α 和 β 分别表示噪声功率、信号衰减系数和阈值.

3.3 问题定义

本文研究物联网数据聚合调度问题,其中网关设备 g 需要收集所有终端设备的数据. 数据聚合调度任务负责让网关设备 g 收集到所有终端设备的聚合数据. 本文将数据聚合调度问题建模为每个终端设备的接收设备和传输时间片分配问题,即定义数据聚合调度函数 S 如下.

定义 1 数据聚合调度 $S: V \rightarrow (V, N_1)$, 其中 N_1 表示非负整数集合.

数据聚合调度的目标是在确保所有数据传输链路相互不干扰的情况下最优化数据聚合时延. 因此,可以将MDA问题形式化地定义如下.

定义 2 MDA问题: 给定物联网模型 $G(V, E)$ 和网关设备 g , 计算出一种数据聚合调度, 满足所有数据传输链路互不干扰, 并且数据聚合时延最低.

物理干扰模型比图干扰模型和协议干扰模型更加复杂. 文献[11]已证明物理干扰模型下MDA问题是NP难的, 因而本文将设计一种低时延的近似数据聚合算法.

4 算法设计与性能分析

4.1 算法基本思想

SDASC算法包括以下三个步骤. 第一步是构造数据聚合树, 以确定每个设备的接收设备. 第二步是调度数据聚合过程, 从而确定数据传输的顺序. 与逐层调度方法不同, SDASC算法将利用跨层并发传输的思想来实现该步骤. 最后一步是完成所有链路的调度. SIC技术将应用于该步骤, 以增加可并发传输的链路数目. SDASC算法的伪代码如算法1所示. 下面分别介绍这些步骤的实现方法.

4.2 数据聚合树构造

本节介绍数据聚合树的构造方法. 根据到网关设备的跳数距离, 将所有设备分到不同的层 L_0, L_1, \dots, L_K 中, 其中 K 是所有设备到网关设备的最大跳数. 为了减小数据聚合树的高度, 本文采用最短路径树算法来构造数据聚合树. 此外, 遵循子设备数最少优先规则来确定父设备, 即每个设备分析上一层邻居设备的子设备数目来决定其父设备.

算法1 SDASC算法

输入: $G = (V, E), g, r, \alpha, \beta$

输出: 数据聚合调度 S

1. 根据到网关设备的跳数距离将所有设备划分到不同的层 L_0, L_1, \dots, L_K 中, 每个设备遵循子设备数最少优先规则选择上层的邻居设备作为其父设备;
2. $t \leftarrow 0$;
3. **WHILE** 存在未调度的链路 **DO**
4. $\text{LinkSet} \leftarrow \{l_{uv} | \text{设备 } u \text{ 未分配传输时间片且其子设备都已分配传输时间片}\}$;
5. 基于SIC技术分析得到LinkSet的子集LinkSubset, 使得LinkSubset中的所有链路可并发传输且相互之间不存在信号干扰;
6. **FOR** LinkSubset中的每条链路 l_{uv} **DO**
7. $S(u) \leftarrow (v, t)$;
8. **END**
9. $t \leftarrow t + 1$;
10. **END**
11. **RETURN** 数据聚合调度 S

举例来说, 如图2所示, 所有设备被划分到三层 L_0, L_1 和 L_2 中. 每个设备按照子设备数最少优先规则选择上一层的邻居设备作为其父设备. 例如, L_2 层中, 设备 u_1 选择 L_1 层中的设备 v_1 作为其父设备. 设备 u_2 分析出邻居设备 v_2 的子设备数目少于邻居设备 v_1 , 因而选择设备 v_2 作为其父设备. 最终构造的数据聚合树如图2所示, 其中虚线表示邻居关系, 而实线表示父子关系.

4.3 基于跨层并发传输的数据聚合调度

本节介绍数据聚合调度步骤的实现方法, 伪代码为算法1的第2行至第10行. 调度时间片 t 从时间片0

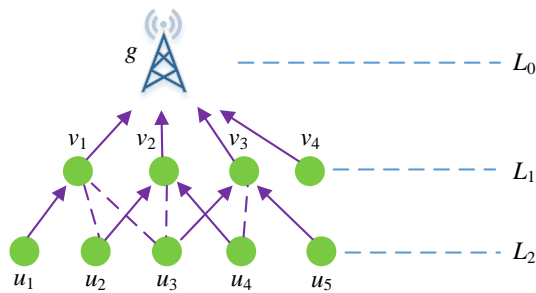


图2 数据聚合树构造示例

开始. 基于跨层并发传输的思想, SDASC 算法选择每条满足以下条件的链路加入到链路集合 LinkSet 中: 设备 u 未分配传输时间片, 并且其子设备都已经分配传输时间片. 然后, SDASC 算法基于 SIC 技术计算出互不干扰可并发传输的链路子集 LinkSubset, 计算方法将在下一节介绍. 最后, SDASC 算法为链路子集 LinkSubset 的所有链路分配传输时间片 t . 其余链路将采用类似的方法在下一个时间片 $t+1$ 进行调度, 直到所有链路调度完毕.

以图2为例来解释该步骤. LinkSet 初始包含6条链路 $l_{u_1v_1}, l_{u_2v_2}, l_{u_3v_3}, l_{u_4v_4}, l_{u_5v_5}$ 和 l_{v_4g} . 假设基于 SIC 技术分析得到, LinkSubset 包含3条链路 $l_{u_1v_1}, l_{u_3v_3}$ 和 l_{v_4g} , 从而给这3条链路分配传输时间片0. 下一时间片, LinkSet 包含4条链路 $l_{u_2v_2}, l_{u_4v_4}, l_{u_5v_5}$ 和 l_{v_1g} , 然后再通过分析获得可并发传输的链路子集 LinkSubset, 包含2条链路 $l_{u_2v_2}$ 和 $l_{u_5v_5}$. 此过程持续到所有链路都被调度完毕.

4.4 基于 SIC 的数据聚合链路调度

假设需要调度 m 条数据聚合链路 $l_{u_1v_1}, l_{u_2v_2}, \dots, l_{u_mv_m}$. 值得关注的是, SIC 技术支持接收设备从混合信号中分离出所有发送设备的信号. 因此, 基于 SIC 技术, 每个接收设备 $v_i (1 \leq i \leq m)$ 能否解码其发送设备 u_i 的数据存在以下三种情况.

(1) 直接解码 在此情况下, 设备 v_i 可以直接解码出设备 u_i 的数据. 设备 v_i 接收到设备 u_i 的信号强度是接收到所有设备信号强度中最大的, 并且满足以下条件.

$$\text{SINR}_{v_i}^{u_i} = \frac{P_{u_i} / d^\alpha(u_i, v_i)}{\sum_{j=1, j \neq i}^m P_{u_j} / d^\alpha(u_j, v_i) + N_0} \geq \beta \quad (2)$$

(2) 间接解码 在此情况下, 设备 v_i 首先解码出其他设备的数据, 然后再解码出设备 u_i 的数据. 设备 v_i 接收到设备 u_i 的信号强度不是接收到所有设备信号强度中最大的. 根据设备 v_i 的接收信号强度从大到小, 可以将所有传输设备进行排序, 并标记为 w_1, w_2, \dots, w_m , 其中设备 u_i 标记为设备 $w_j, 1 \leq i, j \leq m$. 所有的接收信号强度满足以下两个条件.

$$\frac{P_{w_1}}{d^\alpha(w_1, v_i)} \geq \frac{P_{w_2}}{d^\alpha(w_2, v_i)} \geq \dots \geq \frac{P_{w_m}}{d^\alpha(w_m, v_i)} \quad (3)$$

$$\text{SINR}_{v_i}^{w_k} = \frac{P_{w_k} / d^\alpha(w_k, v_i)}{\sum_{k_1=k+1}^m P_{w_{k_1}} / d^\alpha(w_{k_1}, v_i) + N_0} \geq \beta \quad (4)$$

其中, $1 \leq k \leq j$. 设备 v_i 可先解码出传输设备 w_1, w_2, \dots, w_{j-1} 的信号, 然后从混合信号中移除这些信号, 最后解码出传输设备 w_j (即设备 u_i) 的数据.

(3) 无法解码 对所有传输设备按照接收信号强度大小进行排序后, 至少存在一个排在传输设备 w_j 之前的设备不满足式(4)所示的解码条件. 在此情况下, 设备 v_i 无法解码出设备 u_i 的数据.

基于以上三种情况, 可以判断多条数据聚合链路相互之间是否存在信号干扰. 链路调度的任务是使得链路的每个接收设备都能正确解码其传输设备的数据, 而直接解码和间接解码都能满足此条件. 因此, 通过链路信号干扰关系的分析可以得到以下定理.

定理1 如果所有数据聚合链路的每个接收设备都可以直接解码或间接解码其传输设备的数据, 则所有链路可以分配在同一时间片传输, 且相互之间不存在信号干扰.

传统链路调度方法只支持直接解码, 而结合 SIC 技术实现的链路调度方法可同时支持直接解码和间接解码, 从而可增加并发传输的链路数目. 此外, 传统链路调度方法认为冲突的链路也可并发传输且相互之间不产生信号干扰. 举例来说, 如图3所示, 两条链路 $l_{u_1v_1}$ 和 $l_{u_2v_1}$ 具有相同的接收设备, 传统链路调度方法通常给两条链路分配不同的传输时间片. 结合 SIC 技术后, 两个设备 u_1 和 u_2 在设备 v_1 满足间接解码条件时可以同时传输数据, 而设备 v_1 可先解码出 u_1 的数据然后再解码出 u_2 的数据.

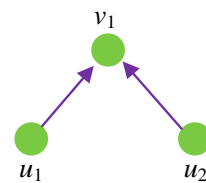


图3 基于 SIC 的链路调度示例

4.5 算法性能分析

定理2 SDASC 算法调度的所有数据聚合链路相互之间不存在信号干扰.

证明 SDASC 算法采用跨层并发传输方法和 SIC 技术来实现数据聚合链路调度. 链路集合 LinkSet 的构造方法确保每个设备在其所有子设备传输完数据后才开始传输数据. 链路子集 LinkSubset 所有链路的接收

设备都可以直接解码或间接解码其传输设备的数据,因而可以同时进行数据传输.此外,相互干扰的链路被分配到不同的时间片进行数据传输.因此,基于定理1的结论可以得到,本定理成立.

定理3 SDASC算法的时间复杂度最多为 $O(n^3)$.

证明 SDASC算法第一步是构造数据聚合树,需要遍历每个设备及其邻居设备,因而最多需要 $O(n^2)$ 时间完成.第二步和第三步的伪代码为算法1的第2行至第10行.假设每次WHILE循环需要调度 m 条链路,则每次WHILE循环最多需要 $O(m^2)$ 时间完成.因为最多需调度 $n-1$ 条链路,所以WHILE循环次数最多为 $n-1$.因此,第二步和第三步最多需要 $O(n^3)$ 时间完成.组合所有步骤的时间开销后,可以得到本定理成立.

5 实验验证与结果分析

本文通过实验来评估和分析所提算法的性能.现有算法^[8-19]都是遵循逐层调度方式并采用干扰避免技术来实现数据聚合调度,因而为了分别测试跨层并发传输方法和SIC技术带来的性能优化效果,本文实现两种基准算法,并将所提算法与这两种基准算法进行对比.两种基准算法分别称为LDAS(Layer-by-layer Data Aggregation Scheduling)和DASC(Data Aggregation Scheduling with Cross-layer concurrent transmission),都采用最短路径树和最小子设备优先规则来构造数据聚合树.LDAS算法遵循逐层调度的方式来实现数据聚合,而DASC算法基于跨层并发传输来进行数据聚合调度,并且两种算法都采用干扰避免技术来实现链路调度.DASC算法与本文所提SDASC算法的主要区别在于其链路调度过程中未采用SIC技术.

5.1 实验参数设置

实验参数设置如表1所示.100~400个物联网设备随机部署在大小为200m×200m的正方形区域.不失一般性,假设设备的传输功率相同,都为 P .设备的传输半径 r 为理想条件下(即不存在信号干扰时)满足解码条件的最大传输距离,因而根据式(1)可以得到 $r = \sqrt{P/(\beta N_0)}$.因此,为了测试传输半径对算法性能的影响,实验中当阈值 β 和噪声功率 N_0 固定时,通过设置不同的传输功率 P 来调整设备的传输半径变化范围为40~100m.实验还测试了不同阈值和噪声功率对算法性能的影响,取值范围分别设定为0.8~2和1~4W.根据文献[11],信号衰减系数通常不小于2,因而实验中的取值范围设定为2~3.2.最大设备度 Δ 为物联网设备的最大邻居设备数目,可以用来控制设备在部署区域的密度,从而降低物联网设备的部署成本,实验中的变化范围设定为30~42.

每次实验通过改变一个参数而固定其他参数来完

成,以分析每个实验参数对算法性能的影响. Matlab中的复杂网络工具包(Complex Networks Package)能够根据不同实际应用案例的需求提供高效、可扩展的网络拓扑框架,因而为了测试不同网络拓扑对算法性能的影响,实验采用该工具包随机生成20个网络拓扑,并在每个网络拓扑上执行10次.实验中随机选择一个设备为网关设备,实验结果为所有算法的平均性能和标准误差.

表1 实验参数设置

实验参数	取值范围
部署区域大小	200m×200m
网络规模 n	100~400
传输半径 r	40~100m
阈值 β	0.8~2
噪声功率 N_0	1~4W
信号衰减系数 α	2~3.2
最大设备度 Δ	30~42

实验测试算法的数据聚合时延和唯一链路调度时间片数目两种性能指标.数据聚合时延为网关设备收集到所有设备聚合数据所需要的时间片数目.唯一链路调度时间片数目指的是,数据聚合过程中一个时间片内只调度一条链路的时间片数目,该性能指标能够反映出可并发传输的链路数目,即唯一链路调度时间片数目越少,算法调度的并发传输链路数目越多.

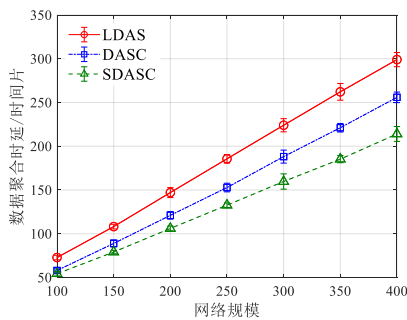
5.2 网络规模的影响

实验中设置 $r = 50\text{m}$ 、 $\beta = 1$ 、 $N_0 = 1$ 、 $\alpha = 2$,评估不同网络规模 n (100~400)对算法性能的影响,实验结果如图4所示.从图4(a)可以观察到,随着网络规模的增加,更多的设备需要将数据传输给网关设备,因而三种算法的数据聚合时延不断上升.与LDAS算法相比,DASC和SDASC两种算法在数据聚合时延优化方面最高可达14.4%和28.4%.主要原因可以通过图4(b)显示的结果来说明:DASC和SDASC两种算法的唯一链路调度时间片数目都要少于LDAS算法,网络规模越大时性能差异越明显,由于总的链路数目都为 $n-1$,因而两种算法都能增加可并发传输的链路数目.图4描述的结果表明,跨层并发传输方法和SIC技术都能显著增加可并发传输的链路数目,从而有效地降低数据聚合时延.此外,从图4(a)和图4(b)显示的结果可以观察到,三种算法性能的标准误差不大,因而平均性能在统计上没有显著差异.

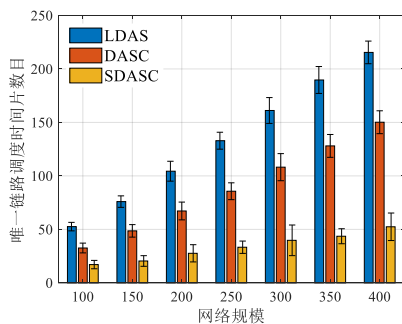
5.3 传输半径的影响

实验中设置 $n = 200$ 、 $\beta = 1$ 、 $N_0 = 1$ 、 $\alpha = 2$,评估不同传输半径 r (40~100m)对算法性能的影响,实验结果如图5所示.

图5(a)的实验结果表明,随着传输半径的增大,

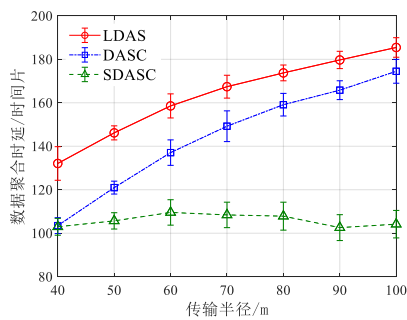


(a) 数据聚合时延

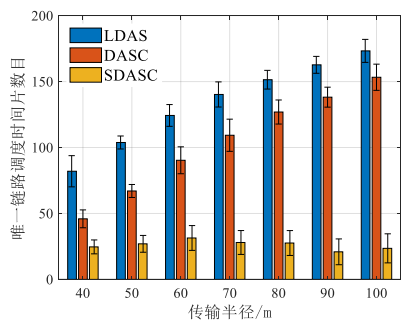


(b) 唯一链路调度时间片数目

图4 不同网络规模下三种算法的性能变化



(a) 数据聚合时延



(b) 唯一链路调度时间片数目

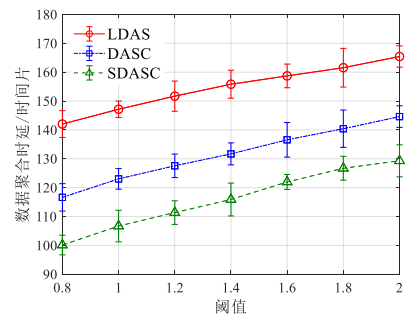
图5 不同传输半径下三种算法的性能变化

LDAS 和 DASC 两种算法的数据聚合时延都呈上升趋势, 而 SDASC 算法的性能基本上变化不大. 主要原因是, 传输半径的增大将导致每个设备拥有更多的子

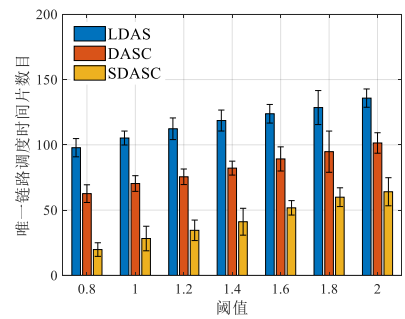
备, 干扰避免技术不支持具有相同接收设备的链路同时进行数据传输, 而 SIC 技术在满足间接解码条件情况下能够有效支持. 此外, 与 LDAS 算法相比, DASC 和 SDASC 两种算法分别最多可降低数据聚合时延 21.6% 和 43.8%. 从图 5(b) 可以观察到, DASC 和 SDASC 两种算法的唯一链路调度时间片数目都要少于 LDAS 算法, 从而表明跨层并发传输方法和 SIC 技术的应用能够优化可并发传输的数据聚合链路数目, 而 SIC 技术在传输半径较大的情况下性能优化效果更加显著. 两个实验图的标准误差结果表明, 三种算法的平均性能在统计上差异不显著.

5.4 阈值的影响

实验中设置 $n = 200, r = 50m, N_0 = 1, \alpha = 2$, 评估不同阈值 $\beta (0.8 \sim 2)$ 对算法性能的影响, 实验结果如图 6 所示.



(a) 数据聚合时延



(b) 唯一链路调度时间片数目

图6 不同阈值下三种算法的性能变化

图 6(a) 的实验结果表明, 所有三种算法的数据聚合时延都随着阈值的增大而呈上升趋势. 主要原因在于, 阈值的增大将导致接收设备的 SINR 更难以满足正确解码要求, 从而多条链路的信号干扰对数据传输的影响更大. 值得注意的是, 与 LDAS 算法相比, DASC 和 SDASC 两种算法在时延优化方面分别最高可达 17.9% 和 29.5%. 图 6(b) 的实验结果表明, 随着阈值的增大, 三种算法的唯一链路调度时间片数目都呈上升趋势, 而由于跨层并发传输方法和 SIC 技术带来的性能优势,

DASC 和 SDASC 两种算法的唯一链路调度时间片数目都要明显少于 LDAS 算法. 此外,从两个实验图中可以观察到,三种算法性能的标准误差都不大,因而平均性能在统计上没有显著差异.

5.5 信号衰减系数的影响

实验中设置 $n = 200, r = 50m, N_0 = 1, \beta = 1$, 评估不同信号衰减系数 $\alpha (2 \sim 3.2)$ 对算法性能的影响, 实验结果如图 7 所示.

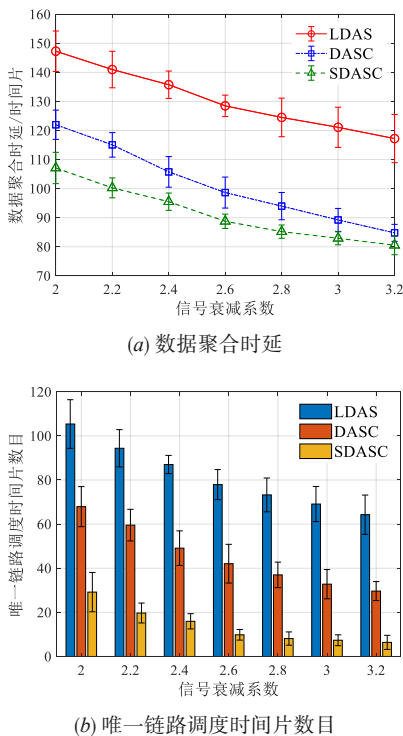


图 7 不同信号衰减系数下三种算法的性能变化

图 7(a) 的实验结果表明, 三种算法的数据聚合时延随着信号衰减系数的增大而呈下降趋势. 主要原因是, 当信号衰减系数增大时, 无线信号干扰对接收设备实现发送设备正确解码的影响不断减少. 得益于跨层并发传输和 SIC 技术的优良特点, 与 LDAS 算法相比, DASC 和 SDASC 两种算法的时延优化率分别可达 27.7% 和 31.3%. 通过图 7(b) 可以观察到, 三种算法的唯一链路调度时间片数目变化趋势与数据聚合时延的变化趋势相同, 而 DASC 和 SDASC 两种算法的唯一链路调度时间片数目都要优于 LDAS 算法, 在信号衰减系数比较小的情况下, 性能优化效果更加显著, 进一步验证了跨层并发传输方法和 SIC 技术能够增加可并发传输的链路数目. 从图 7(a) 和图 7(b) 中还可以观察到, 三种算法性能的平均误差都比较小, 其平均性能差异不显著.

5.6 噪声功率的影响

实验中设置 $n = 200, r = 50m, \alpha = 2, \beta = 1$, 评估不同噪声功率 $N_0 (1 \sim 4W)$ 对算法性能的影响, 实验结果如图 8 所示.

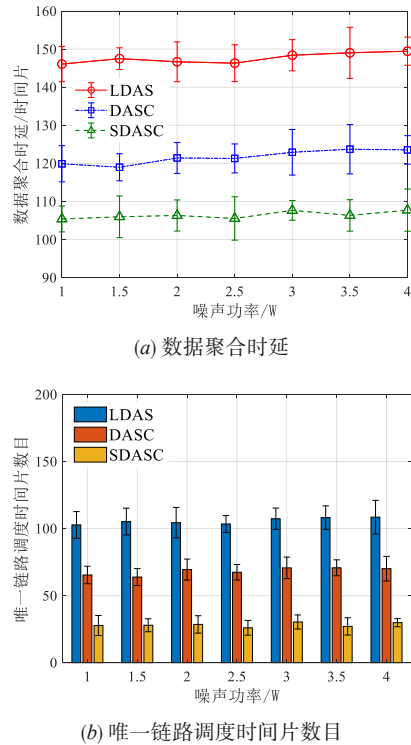


图 8 不同噪声功率下三种算法的性能变化

图 8(a) 的实验结果表明, 所有三种算法的数据聚合时延都随着噪声功率的增大而呈缓慢上升趋势. 主要原因在于, 噪声功率的增大将导致接收设备的 SINR 更难以满足正确解码要求, 对数据传输的影响更大. 与 LDAS 算法相比, DASC 和 SDASC 两种算法的时延优化率分别可达 17.9% 和 27.9%. 图 8(b) 的实验结果表明, DASC 和 SDASC 两种算法能够优化唯一链路调度时间片数目, 从而增加可并发传输的数据聚合链路数目. 此外, 算法性能标准误差结果表明, 三种算法的平均性能没有显著差异.

5.7 最大设备度的影响

实验中设置 $n = 200, r = 50m, N_0 = 1, \alpha = 2, \beta = 1$, 评估不同的最大设备度 $\Delta (30 \sim 42)$ 对算法性能的影响, 实验结果如图 9 所示. 图 9(a) 的实验结果表明, LDAS 和 DASC 两种算法的数据聚合时延都随着最大设备度的增大而呈上升趋势, 而 SDASC 算法的性能变化不大. 主要原因在于, 最大设备度的增大导致数据转发设备的子设备增多, 传统干扰避免调度方法需要更多的时间片来完成数据聚合, 而 SIC 技术的引入为多个子设备数据的并发传输提供了有效支撑. 与 LDAS 算法相比,

DASC 和 SDASC 两种算法在数据聚合时延方面的性能优化率最高可达 19.3% 和 26.5%。从图 9(b) 的实验结果可以分析出, DASC 和 SDASC 两种算法的唯一链路调度时间片数目都要少于 LDAS 算法, 从而验证了跨层并发传输方法和 SIC 技术能够增加可并发传输链路数目, 从而有效地降低数据聚合时延。此外, 从图 9(a) 和图 9(b) 中可以观察到, 三种算法性能的平均误差都不大, 因而其平均性能在统计上不存在显著差异。

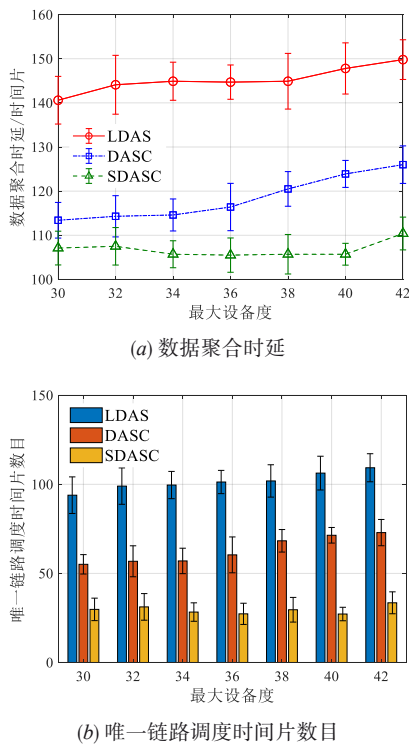


图9 不同最大设备度下三种算法的性能变化

6 结束语

本文研究物联网中的最低时延数据聚合调度问题, 并针对现有工作的不足, 结合跨层并发传输方法和 SIC 技术提出了一种新颖的数据聚合调度算法 SDASC, 目标是增加可并发传输的链路数目, 从而降低数据聚合时延。实验结果表明, 与现有采用逐层调度方法和干扰避免技术的数据聚合算法相比, 本文所提算法能够有效优化可并发传输链路数目和数据聚合时延, 在传输半径较大的情况下性能优化效果更加显著。

参考文献

[1] 李森森, 黄一才, 郁滨, 等. 基于 PUF 的低开销物联网安全通信方案[J]. 电子学报, 2019, 47(4): 812 – 817.
Li S S, Huang Y C, Yu B, et al. A PUF-based low cost se-

cure communication scheme for IoT[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(4): 812 – 817. (in Chinese)

- [2] 王巍, 赵继军, 彭力, 等. 基于 UAV 的移动物联网远距离通信节能策略研究[J]. 电子学报, 2018, 46(12): 2914 – 2921.
Wang W, Zhao J J, Peng L, et al. Research on the energy saving strategy for long distance communication of mobile internet of things based on UAVs[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(12): 2914 – 2921. (in Chinese)
- [3] Omoniwa B, Hussain R, Adil M, et al. An optimal relay scheme for outage minimization in fog-based Internet-of-Things (IoT) networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(2): 3044 – 3054.
- [4] Anser J A, Han G, Wang H, et al. A reliable energy efficient dynamic spectrum sensing for cognitive radio IoT networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(4): 6748 – 6759.
- [5] 黄美根, 郁滨. 软件定义 WSN 规则一致更新研究[J]. 电子学报, 2019, 47(9): 1965 – 1971.
Huang M G, Yu B. Research on consistent rule update in software-defined WSN[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(9): 1965 – 1971. (in Chinese)
- [6] 王巍, 彭力, 赵继军, 等. 移动物联网非完整约束中继的协同任务规划[J]. 电子学报, 2019, 47(6): 1251 – 1259.
Wang W, Peng L, Zhao J J, et al. Cooperative task planning of ground relay with nonholonomic constraints in mobile Internet of Things based on UAVs[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(6): 1251 – 1259. (in Chinese)
- [7] 张德干, 葛辉, 刘晓欢, 等. 一种基于 Q-Learning 策略的自适应移动物联网路由新算法[J]. 电子学报, 2018, 46(10): 2325 – 2332.
Zhang D G, Ge H, Liu X H, et al. A Kind of New Routing Algorithm with Adaptivity for Mobile IOT Based on Q-Learning[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(10): 2325 – 2332.
- [8] Chen X, Hu X, Zhu J. Minimum data aggregation time problem in wireless sensor networks[A]. Proceedings of Mobile Ad-Hoc Sensor Network (MSN) [C]. Berlin, Germany: Springer, 2005. 133 – 142.
- [9] Xu X, Li X, Mao X, et al. A delay-efficient algorithm for data aggregation in multihop wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2011, 22(1): 163 – 175.
- [10] Jiao X, Lou W, Wang X, et al. Data aggregation scheduling in uncoordinated duty-cycled wireless sensor networks under protocol interference model[J]. Ad Hoc & Sensor

- Wireless Networks, 2012, 15(2): 315 – 338.
- [11] Xu X, Li X Y, Song M. Efficient aggregation scheduling in multihop wireless sensor networks with SINR constraints[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2013, 12(12): 2518 – 2528.
- [12] Tang J, Jiao X, Xiao W. Minimum-latency data aggregation in duty-cycled wireless sensor networks under physical interference model[A]. *Proceedings of IEEE Wireless and Optical Communication Conference[C]*. Washington, DC, USA: IEEE, 2013. 309 – 314.
- [13] Baga M, Younis M, Djenouri D, et al. Distributed low-latency data aggregation scheduling in wireless sensor networks[J]. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2015, 11(3): 1 – 36.
- [14] Yousefi H, Malekimajd M, Ashouri M, et al. Fast aggregation scheduling in wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(6): 3402 – 3414.
- [15] Chen Q, Gao H, Cai Z, et al. Energy-collision aware data aggregation scheduling for energy harvesting sensor networks[A]. *Proceedings of IEEE INFOCOM[C]*. Washington, DC, USA: IEEE, 2018. 117 – 125.
- [16] Chen K, Gao H, Cai Z, et al. Distributed energy-adaptive aggregation scheduling with coverage guarantee for battery-free wireless sensor networks[A]. *Proceedings of IEEE INFOCOM[C]*. Washington, DC, USA: IEEE, 2019. 1018 – 1026.
- [17] Jiao X, Lou W, Guo S, et al. Delay efficient scheduling algorithms for data aggregation in multi-channel asynchronous duty-cycled WSNs[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(9): 6179 – 6192.
- [18] Nguyen T D, Zalyubovskiy V, Le D T, et al. Break-and-join tree construction for latency-aware data aggregation in wireless sensor networks[J]. *Wireless Networks*, 2020, 26: 5255 – 5269.
- [19] Plotnikov R, Erzin A, Zalyubovskiy V. GLS and VNS based heuristics for conflict-free minimum-latency aggregation scheduling in WSN[J]. *Optimization Methods and Software*, 2020: 1 – 23.
- [20] Zheng B, Wen M, Wan C, et al. Secure NOMA based two-way relay networks using artificial noise and full duplex [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018, 36(7): 1426 – 1440.
- [21] Yue X, Liu Y, Kang S, et al. Modeling and analysis of two-way relay non-orthogonal multiple access systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, 66(9): 3784 – 3795.
- [22] Kilzi A, Farah J, Nour C A, et al. Mutual successive interference cancellation strategies in NOMA for enhancing the spectral efficiency of CoMP systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(2): 1213 – 1226.
- [23] Akhtar M W, Hassan S A, Saleem S, et al. STBC-Aided Cooperative NOMA with Timing Offsets, Imperfect Successive Interference Cancellation, and Imperfect Channel State Information[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(10): 11712 – 11727.
- [24] Aref M A, Jayaweera S K. Deep learning-aided successive interference cancellation for MIMO-NOMA[A]. *Proceedings of IEEE GLOBECOM[C]*. Washington, DC, USA: IEEE, 2020. 1 – 5.
- [25] Yang C, Wang X, Xia B, et al. Joint interference cancellation in cache-and SIC-enabled networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, 66(9): 4155 – 4169.
- [26] Jiang C, Qin X, Yuan X, et al. Cross-layer optimization for multi-hop wireless networks with successive interference cancellation[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(8): 5819 – 5831.
- [27] Lv S, Zhuang W, Xu M, et al. Understanding the scheduling performance in wireless networks with successive interference cancellation[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2013, 12(8): 1625 – 1639.
- [28] Amarlingam M, Prasad K, Rajalakshmi P, et al. A novel low-complexity compressed data aggregation method for energy-constrained IoT networks[J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2020, 4(3): 717 – 730.
- [29] Cui J, Boussetta K, Valois F. Classification of data aggregation functions in wireless sensor networks[J]. *Computer Networks*, 2020, 178: 107342.
- [30] Liu X, Yu J, Li F, et al. Data aggregation in wireless sensor networks: from the perspective of security[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(7): 6495 – 6512.
- [31] Zhou L, Ge C, Hu S, et al. Energy-efficient and privacy-preserving data aggregation algorithm for wireless sensor networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(5): 3948 – 3957.
- [32] Saleem A, Khan A, Malik S, et al. FESDA: Fog-enabled secure data aggregation in smart grid IoT network[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(7): 6132 – 6142.
- [33] Yang Y, Guo S, Liu G, et al. Joint source coding rate allocation and flow scheduling for data aggregation in collaborative sensing networks[J]. *Computer Networks*, 2020,

175: 107269.

- [34] 高云全. 物联网环境下数据聚合关键技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.

Gao Y Q. Research on Key Technologies of Data Aggregation in Internet of Things Environment[D]. Beijing, China: Beijing University of Post and Telecommunications, 2019. (in Chinese)

- [35] Patel P, Holtzman J. Analysis of a simple successive interference cancellation scheme in a DS/CDMA system[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1994, 12(5): 796 – 807.

- [36] Hrbek S J, Shivaramaiah N C, Akos D M. Filtering and quantization effects on GNSS successive interference cancellation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2020, 56(2):924 – 936.

- [37] Grabner M J, Li X, Fu S. An adaptive BLAST successive interference cancellation method for high data rate perfect space-time coded MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(2):1542 – 1553.

作者简介



焦贤龙 男, 1982年生, 江西丰城人, 博士. 分别于2003年、2005年和2011年在国防科技大学获得学士、硕士和博士学位. 现为重庆大学计算机学院助理研究员. 主要研究方向包括物联网和边缘计算.
E-mail:xljiao@cqu.edu.cn



郭松涛(通信作者) 男, 1975年生, 河南西平人, 博士. 分别于1999年、2003年和2008年在重庆大学获得学士、硕士和博士学位. 现为重庆大学计算机学院教授. 主要研究方向包括智能边缘计算、无线与移动网络、深度学习与图像处理.
E-mail:guosongtao@cqu.edu.cn



黎勇 男, 1982年生, 重庆酉阳人, 博士. 2012年12月获厦门大学工学博士学位. 现为重庆大学计算机学院副教授. 主要研究方向包括信息论与编码、计算机视觉、量子密钥分发、医学大数据.
E-mail:yongli@cqu.edu.cn



李艳涛 男, 1984年生, 河南济源人, 博士. 2012年12月获重庆大学工学博士学位. 现为重庆大学计算机学院研究员. 主要研究方向包括无线网络、传感器系统、移动计算安全.
E-mail:liyantao@cqu.edu.cn



向朝参 男, 1987年生, 四川达州人, 博士. 2014年6月获解放军理工大学博士学位. 现为重庆大学计算机学院副教授. 主要研究方向包括人工智能、城市计算、物联网、移动智能感知、大数据.
E-mail:xiangchaocan@cqu.edu.cn