



研究与开发

一种基于 SDN 的物联网数据聚合方案

王博伟, 谭劲, 蒋文斌

(中国计量大学信息工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 物联网设备产生和发送的数据中存在许多重复冗余的部分, 传输这些数据降低了网络寿命和带宽。针对这个问题提出了聚合网关层, 设计了一种基于 SDN 的物联网数据聚合体系结构和算法。仿真分析表明, 设计的体系结构与普通网关和 OF-GW 的体系结构相比, 网络寿命提高了约 32.6%, 感知层发送到网络层中的数据分组量减少了 6.1%~55.1%, 设计的规则算法与 LEACH 算法相比, 数据聚合的平均时延降低了约 24.1%, 同时避免了数据缺失, 提高了数据聚合的准确性。

关键词: 物联网; SDN; 数据聚合; 体系结构; LEACH; 灰色预测模型

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019028

Data aggregation scheme based on SDN for internet of things

WANG Bowei, TAN Jin, JIANG Wenbin

College of Information Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China

Abstract: There are many redundant parts in the data generated and transmitted by IoT devices. Transmitting this data reduces network lifetime and bandwidth. Aiming at the problem, the aggregation gateway layer was proposed, and a SDN-based IoT data aggregation architecture and algorithm were designed. The simulation analysis shows that compared with the architecture of the ordinary gateway and OF-GW, the network lifetime is improved by about 32.6%, and the amount of data packets sent by the sensing layer to the network layer is reduced by 6.1% to 55.1%. Compared with the LEACH algorithm, the designed rule algorithm reduces the average delay of data aggregation by about 24.1%, while avoiding data loss and improving the accuracy of data aggregation.

Key words: internet of things, SDN, data aggregation, architecture, LEACH, grey prediction model

1 引言

传统互联网和物联网架构与网络能力存在着

对资源调度和配置的灵活性不足、对新业务和应用的开通部署慢、对网络运营维护的要求高等问题, 需要引入新的技术和架构以保持通信网络持

收稿日期: 2018-11-12; 修回日期: 2019-01-22

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目 (No.LY16F020013)

Foundation Item: The Natural Science Foundation of Zhejiang Province of China (No.LY16F020013)



续发展的动力^[1]。SDN (software defined networking, 软件定义网络) 是一种新型网络技术和架构, 它提供了水平集成、控制与转发分离及软硬件解耦、网络虚拟化、集中逻辑控制和开放性的软件编程接口等诸多功能, 完美地结合了快速、高效、基于分组的本地决策机制和整体的、基于流的集中控制决策机制^[2]。

物联网 (internet of things, IoT) 是生产大数据的主要来源之一, 到 2020 年, 将有超过 500 亿台设备相互连接, 它们将会产生大量的数据, 如何管理和传输如此庞大的数据量是一个很大的难题^[3]。数据聚合是解决物联网大数据问题的重要方法, LEACH 算法^[4]是一种基于簇的数据聚合算法, 但是它在选择簇头的时候没有考虑节点的剩余能量和节点到网关的距离, 这样会导致节点能量很快耗尽, 降低网络寿命, 而且它没有考虑数据聚合的等待时间和数据缺失的问题, 这样会给网络带来较大的时延, 降低数据聚合的准确性。在物联网中引入 SDN 不仅可以提高物联网的灵活性和可扩展性, 而且还能为物联网提供一种更灵活的数据聚合机制。

物联网中的设备种类繁多, 不仅包括能量受限的设备, 如无线传感器, 还有能量不受限的设备, 如智能家电, 这些设备产生和发送的数据中存在许多重复冗余的部分。此外, 物联网中还存在大量的执行器。大多数情况下, 执行器并不需要所有传感器的数据, 它往往只需要这些传感器数据的聚合结果, 如取平均值、最大值等。在不考虑数据聚合的情况下传输这些重复冗余的数据不仅会降低能量受限设备的寿命, 而且会降低网络的带宽。对于物联网中的数据聚合而言, 无线传感网络中通常所考虑的单个汇聚节点已不适用, 物联网感知层数据聚合的结果需要在多个汇聚节点中选择对应设备类型的汇聚节点发送^[5], 而这一点可以通过 SDN 技术有效解决。

针对上述问题, 提出了聚合网关层, 设计了

一种基于 SDN 的物联网数据聚合体系结构和规则算法, 旨在提高物联网能量受限设备的网络寿命, 减少感知层发送到网络层中的数据量, 降低数据聚合的时延, 提高数据聚合的准确性。

2 相关工作

在物联网中应用 SDN 技术的好处已经越来越多地在各个领域中显露出来。Qin 等人^[6]提出了一种基于物联网多项式的 SDN 控制器设计方案, 它的主要工作是缩小抽象的高级别任务和特定的低级别网络与设备资源之间的差距, 该工作采用分层 SDN 方法, 弥补抽象物联网任务描述与底层网络和设备规范之间的语义鸿沟, 它能够灵活、有效和高效地管理任务、流程、网络和资源。

参考文献[7]设计了一种基于 SDN 的物联网体系结构来解决大数据问题, 所提出的体系结构主要由感知层、OF-GW (OpenFlow gateway) 层、网络层和应用层组成。在传统的物联网体系结构中, 网关将来自感知层的数据分组直接发送到网络层。然而, 由于大量物联网设备的存在, 将所有数据分组发送到网络层会使网络变得非常拥挤, 同时也会导致设备执行器产生较高的时延, 降低网络的性能。因此, 该体系结构考虑了网关层中的数据转发问题, 在网络层中增加了控制器服务层, 由控制器服务层制定数据分组匹配规则并下发到 OF-GW, 然后 OF-GW 根据匹配规则决定数据分组是否转发到网络层, 这样就避免了不必要的数据发送到网络层。但是 OF-GW 没有考虑到数据聚合, 规则匹配后的数据中仍然存在大量重复冗余的数据。

数据聚合减少了数据的传输次数, 从而减少了网络功耗、时延、流量, 增加了网络寿命, 也提高了数据的准确性。参考文献[8]对物联网中现有的数据聚合机制进行了研究和评述, 介绍了当前最先进的数据聚合机制以及它们的差异、优点和缺点, 主要包括基于树、基于簇和集中式这 3 种聚合机制。其中, 基于簇的数据聚合机制具有低流

量负载、高可扩展性和高容错率的优点,缺点是高时延和网络寿命较短。

Hafizur 等人^[9]提出了一种混合服务质量感知数据聚合(QADA)的方案,该方案结合了基于树和基于簇的数据聚合技术,它将原始数据处理成一个有效的高质量信息,能够显著地减少传输数据的冗余,从而降低了网络能耗,延长了网络寿命。但这种方案只适用于无线传感网络,而且没有考虑数据聚合的时延和数据缺失问题。

参考文献[10]分析了 LEACH 和 LEACH-C 聚合协议的性能,并对它们的性能进行了比较。LEACH-C 协议的分簇比 LEACH 更均匀,拓扑更为合理,但是能耗也较大。这两种算法都没有考虑数据聚合的时延和数据缺失问题。

3 相关技术

3.1 SDN 架构

SDN 以控制逻辑与数据转发分离为核心思想,将控制逻辑层面从传统网络设备中分离出来作为单独的控制器,网络设备根据控制器下发的规则只执行数据转发的操作,其架构如图1所示^[11]。

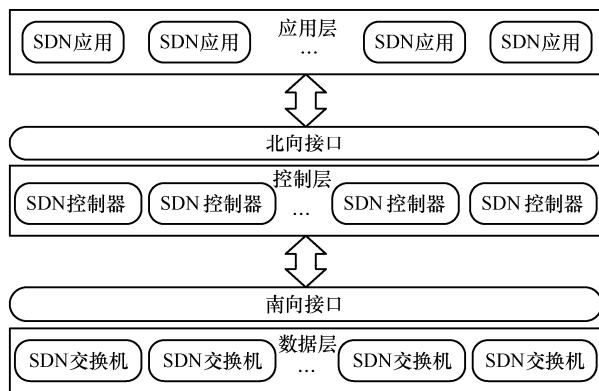


图1 SDN 架构

在 SDN 架构中,应用层通过北向接口(northbound interface, NBI)与控制层进行交互,调整网络数据转发的规则,数据层通过南向接口(southbound interface, SBI)与控制层进行交互,控制层将高层制定的规则通过南向接口下发至数据

层,数据层根据此规则执行数据的转发操作^[11-12]。

3.2 基于簇的数据聚合机制

在基于簇的数据聚合机制中,资源节点被划分为不同的簇,每个簇选举出一个簇头,簇内节点将数据发送到簇头节点进行数据聚合,最后由簇头节点将聚合后的数据发送到网关节点,其聚合结构如图2所示^[8]。

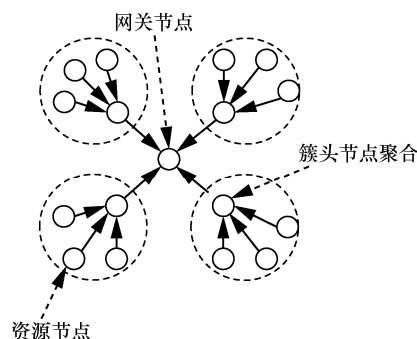


图2 基于簇的数据聚合结构

3.3 灰色预测模型

灰色预测模型 GM(1,1)是邓聚龙^[13]在灰色系统理论中提出的一种数学预测模型,现已被广泛应用于数据预测领域,用来预测事物未来的发展情况。GM(1,1)建模过程如下。

步骤 1 设原始数据序列为 $X^{(0)} = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(n)\}$, n 为原始序列个数。

步骤 2 对原始序列进行累加得到 AGO 序列 $X^{(1)} = \{X^{(1)}(1), X^{(1)}(2), \dots, X^{(1)}(n)\}$, 其中, $X^{(1)}(K) = \sum_{m=1}^K X^{(0)}(m)$, $k=1, 2, \dots, n$ 。

步骤 3 GM(1,1)的白化模型为 $\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b$, 记 GM(1,1)的一级参数包 $P_1 = (a, b)^T$, 由最小二乘法可得: $P_1 = (B^T B)^{-1} B^T y_N$ 。其中,

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}[X^1(1) + X^1(2)] & 1 \\ -\frac{1}{2}[X^1(2) + X^1(3)] & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}[X^1(n-1) + X^1(n)] & 1 \end{bmatrix}, \quad y_N = \begin{bmatrix} X^0(2) \\ X^0(3) \\ \vdots \\ X^0(n) \end{bmatrix}。$$



步骤 4 GM(1,1)白化模型响应式为:

$\hat{X}^{(1)}(k+1) = (X^{(0)}(1) - \frac{b}{a})e^{-ak} + \frac{b}{a}$, $\hat{X}^{(0)}(k+1) = (\hat{X}^{(1)}(k+1) - \hat{X}^{(1)}(k))$, 于是可以通过前 k 个原始数据序列得到第 $k+1$ 个数据预测值 $\hat{X}^{(0)}(k+1)$, 其中 $k \geq 4$ 。

传统 GM(1,1)模型使用 $\hat{X}^{(1)}(k) = X^{(0)}(1)$ 作为已知条件求解模型参数, 这一条件带来了较大的误差, 因此使用改进的无偏灰色预测模型^[14], 它在传统灰色预测模型的基础上改进了模型的参数求解, 令 $a' = \ln \frac{2-a}{2+b}$, $b' = \ln \frac{2b}{2+a}$, 于是可得原始序列模型: $\hat{X}^{(0)}(1) = X^{(0)}(1)$, $\hat{X}^{(0)}(k) = b'e^{a'(k-1)}$ 。

4 基于 SDN 的物联网数据聚合方案

4.1 体系结构

传统物联网体系结构中感知层产生的数据直接发送到网络层, 在大量物联网设备接入的情况下导致网络层中的数据量异常庞大。参考文献[7]在感知层和网络层之间加入 OF-GW 层, 在网络层中增加了控制器服务层作为子层, OF-GW 层根据从控制器服务层下发的匹配规则决定是否将感知层的数据转发到网络层, 这样就减少了感知层发送到网络层的数据量。但是它没有考虑数据聚合, 也没有考虑感知层传感器节点发送数据到网关节点的能耗, 这将使大量重复冗余的数据发送到网络层, 也缩短了传感器节点的寿命。

所以提出了 AG-GW (aggregate gateway, 聚合网关), 增加聚合层作为其子层, 它根据控制器服务层下发的规则算法对感知层发送的数据进行聚合处理。设计的基于 SDN 的物联网数据聚合体系结构共有 4 层, 包括感知层、聚合网关层 (包括作为其子层的聚合层)、网络层和应用层, 如图 3 所示。

4.2 规则算法

(1) 将感知层分为能量受限和能量不受限的设备, 感知层在 SDN 控制器下根据设备类型将数据发送到不同的聚合层。

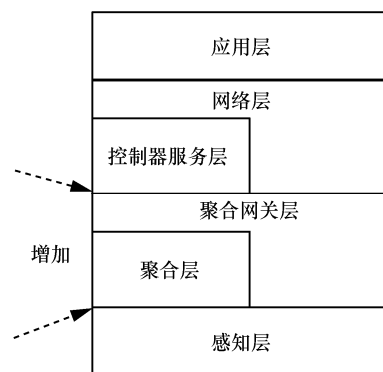


图 3 物联网数据聚合体系结构

(2) 对于能量受限的传感器节点, 采用基于簇的数据聚合结构。LEACH 算法^[4]是一种基于簇的数据聚合算法, 它在选择簇头时没有考虑节点的剩余能量和节点到网关的距离, 也没有考虑数据聚合的时延和数据缺失的问题。因此对它进行改进。首先, 在综合考虑节点的剩余能量 E 和它到网关的距离 S 后, 修改簇头选举阈值参数计算式如下:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p \cdot \left(r \bmod \left(\frac{1}{p} \right) \right)} \cdot \left(\omega_1 \cdot \frac{E}{E_0} + \omega_2 \cdot \frac{1}{S} \right), & n \in G \\ 0, & n \notin G \end{cases} \quad (1)$$

其中, p 为预设节点当选簇头的比例, r 为当前簇头选举轮次, E 和 E_0 为节点的剩余能量和初始能量, S 为节点到网关节点的距离, ω_1 和 ω_2 为权重系数, 满足 $\omega_1, \omega_2 \in [0, 1]$, 且 $\omega_1 + \omega_2 = 1$, G 为最近的 $1/p$ 轮没有当选过簇头的节点集合。簇头选举时, 每个节点产生一个 0~1 的随机数, 如果小于 $T(n)$ 就当选为簇头, 在这里称为聚合节点。

(3) 在第 $r+1$ 轮次中, 簇内节点将数据发送到聚合节点, SDN 控制器设置一个等待时间 T , 在 T 时间内聚合节点等待簇内节点发送的数据, 然后根据聚合函数 (如求和、取平均值等) 对这些数据进行聚合, 丢弃其余分组, 再将聚合后的数据发送到网关节点。如果等待时间超过 T 仍未收到簇内节点的数据, 聚合节点就通过无偏灰色预测模型计算

出这一轮超时节点的预测数据 $\hat{X}^{(i)}(r+1)$ ，对预测数据进行聚合后再发送到网关节点。

(4) 对于能量不受限的智能设备，用 SDN 控制一个聚合时间 T ，聚合网关对同一设备在 T 时间内发送的重复冗余的数据根据聚合函数进行聚合，丢弃其余分组，然后再发送到网络层。

算法流程如图 4 所示，算法的主要工作集中于流程图左边部分。

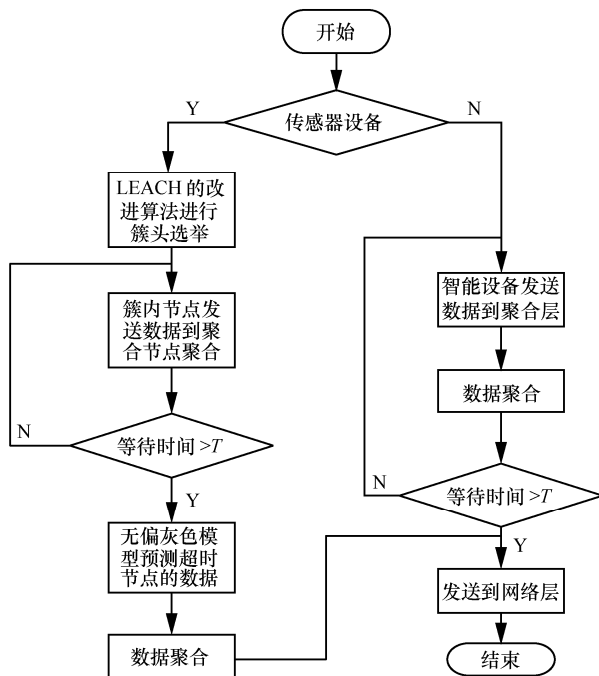


图4 数据聚合规则算法流程

5 仿真分析

仿真在 MATLAB 软件环境下进行，根据感知层是能量受限的传感器节点还是能量不受限的智能设备，将仿真分为仿真 1 和仿真 2，通过 MATLAB 语言脚本编程的循环控制模拟传感器节点和智能设备每个轮次的通信网络环境。仿真分析表明，基于 SDN 的物联网数据聚合体系结构与普通网关和 OF-GW 的体系结构相比，网络寿命提高了约 32.6%，感知层发送到网络层中的数据分组量减少了 6.1%~55.1%，本文提出的规则算法与 LEACH 算法相比，数据聚合的平均时延

降低了约 24.1%，同时避免了数据缺失，提高了数据聚合的准确性。

5.1 仿真 1

对于能量受限的传感器节点，选择经典的凯泽曼模型^[15]作为网络的能耗模型。该模型设置 1 个阈值 d_0 ，当通信节点间距离 $d < d_0$ 时，数据传输采用自由空间信道模型，发送节点能耗与 d^2 成正比；当通信节点间距离 $d \geq d_0$ 时，数据传输采用多径衰落信道模型，发送节点能耗与 d^4 成正比。

于是，发送节点发送 k bit 数据能耗如下：

$$ETX = \begin{cases} k \cdot E_{\text{elec}} + k \cdot E_{\text{fs}} \cdot d^2, & d < d_0 \\ k \cdot E_{\text{elec}} + k \cdot E_{\text{amp}} \cdot d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (2)$$

接收节点接收 k bit 数据能耗为：

$$ERX = k \cdot E_{\text{elec}} \quad (3)$$

其中， E_{elec} 表示发射电路和接收电路处理 1 bit 数据的能耗， E_{fs} 和 E_{amp} 分别为自由空间信道模型和多径衰落信道模型下功率放大器对数据处理的能耗， $d_0 = \sqrt{\frac{E_{\text{fs}}}{E_{\text{amp}}}}$ ，数据聚合消耗的能量记为 E_{da} ，

所有传感器节点初始能量记为 E_0 。本部分仿真参数见表 1。

表 1 仿真 1 参数

参数	取值
网络区域大小	100 m×200 m
传感器节点数量 n	100
网关节点坐标 sink	(50 m, 200 m)
传感器节点通信范围 C	210 m
E_0	0.5 J
E_{elec}	50 nJ/bit
E_{fs}	10 pJ/(bit·m ²)
E_{amp}	0.001 3 pJ/(bit·m ⁴)
d_0	87 m
E_{da}	5 nJ/bit
节点当选簇头比例 p	0.1
ω_1	0.8
ω_2	0.2
T	0.5 s
OF-GW 匹配比例 q	0.8
数据分组大小 k	4 000 bit
运行轮次 r_{max}	1 500



仿真分别从传感器死亡节点数、存活节点数和传感器节点发送到网络层的数据分组量随轮次的变化这几个方面进行了对比。另外,假定前 50 轮 AG-GW 的传感器节点以小于时间 T 的时延正常发送数据,最后得到 LEACH 算法和 AG-GW 规则算法数据聚合的平均时延随轮次的变化情况。仿真结果如图 5~图 8 所示。

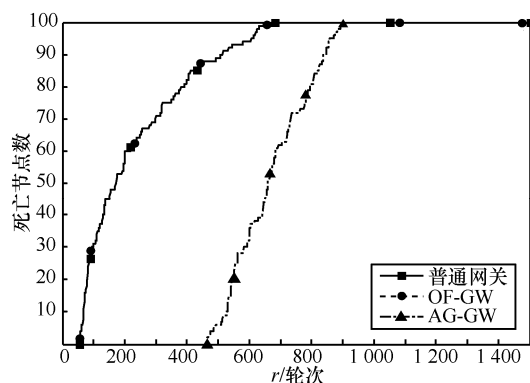


图 5 不同网关的传感器死亡节点数变化

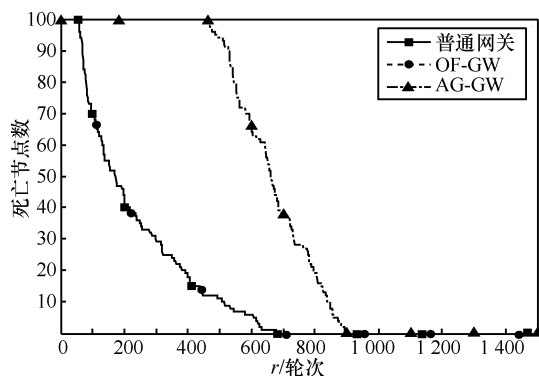


图 6 不同网关的传感器存活节点数变化

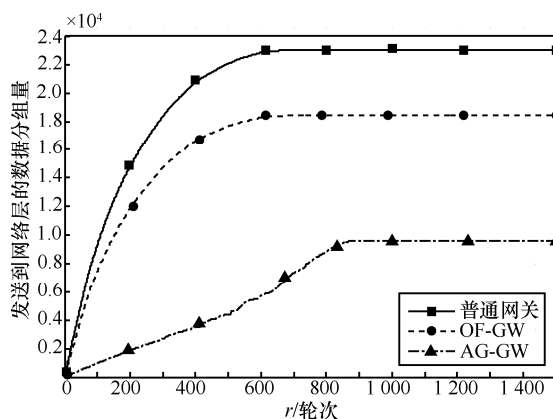


图 7 不同网关的传感器节点发送到网络层的数据分组量变化

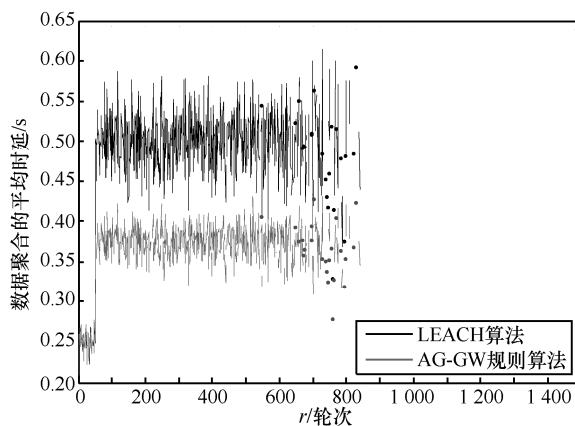


图 8 不同算法数据聚合的平均时延变化

图 5 和图 6 中,普通网关和 OF-GW 的传感器节点直接发送所有数据到网关节点,因此它们的曲线重合,而 AG-GW 的传感器节点先发送数据到聚合节点,再由聚合节点将聚合后的数据发送到上层网关,因此它的生存周期比普通网关和 OF-GW 提高了约 32.6%。图 7 中,AG-GW 的传感器节点的数据经过聚合后发送到网络层的数据分组量比普通网关减少了约 55.1%,比 OF-GW 减少了约 43.9%。图 8 中,AG-GW 规则算法考虑了数据聚合的等待时延,并使用无偏灰色预测模型对超时节点的数据进行预测,与 LEACH 算法相比,聚合等待的平均延迟降低了约 24.1%,同时避免了超时节点的数据缺失,提高了数据聚合的准确性。

5.2 仿真 2

对于能量不受限的智能设备,不必考虑设备能耗,主要对比普通网关、OF-GW 和 AG-GW 的智能设备发送到网络层的数据分组量,本部分仿真参数见表 2。

表 2 仿真 2 参数

参数	取值
智能设备数量 n	100
聚合周期轮次 T	2
设备重复发送概率 p	0.5
OF-GW 匹配比例 q	0.8
运行轮次 $r_{\max}$	1 500

仿真结果如图 9 所示, 不考虑智能设备的能量限制, 普通网关、OF-GW 和 AG-GW 发送到网络层的数据分组量随轮次呈线性增加。对每个智能设备而言, AG-GW 在 SDN 控制的 T 周期内对它发送的重复冗余数据进行聚合处理, 每个 T 周期内最少只发送 1 个数据分组, 所以发送到网络层的数据分组量比普通网关减少了约 24.9%, 比 OF-GW 减少了约 6.1%, 同时控制了聚合时延。

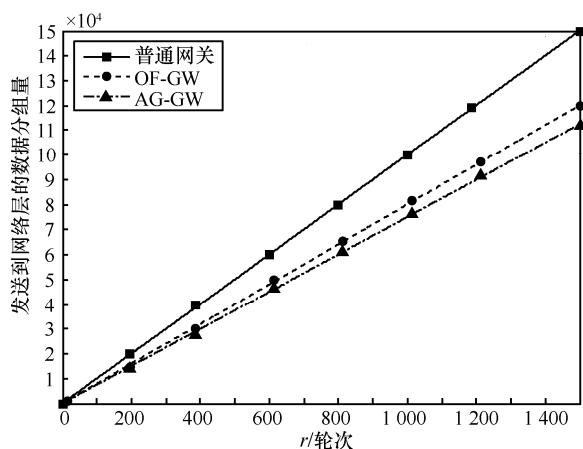


图 9 不同网关的智能设备发送到网络层的数据分组量变化

6 结束语

本文设计的基于 SDN 的物联网数据聚合方案可以有效提高物联网能量受限设备的网络寿命, 节约资源和成本, 减少感知层发送到网络层中的数据量, 提高网络的带宽, 降低数据聚合的时延, 提高数据聚合的准确性, 提升网络的性能。下一步准备对能量不受限的物联网设备的数据聚合继续展开深入研究, 寻找更加高效的数据聚合算法。

参考文献:

- [1] 赵慧玲, 史凡. SDN/NFV 的发展与挑战[J]. 电信科学, 2014, 30(8): 13-18.
ZHAO H L, SHI F. Development and challenge of SDN/NFV[J]. Telecommunications Science, 2014, 30(8): 13-18.
- [2] 韦乐平. SDN 的战略性思考[J]. 电信科学, 2015, 31(1): 7-12.
WEI L P. Strategic thinking on SDN [J]. Telecommunications

- Science, 2015, 31(1): 7-12.
- [3] EJAZ A, IBRAR Y, ABDULLAH G, et al. Internet of things based smart environments: state of the art, taxonomy and open research challenges[J]. IEEE Wireless Communications, 2016, 23(5): 10-16.
- [4] RABINER H W, CHANDRAKA AP, HARI B. Energy efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]//The 33rd Annual International Conference on System Sciences, Jan 7, 2000, Hawaii, USA. Piscataway: IEEE Press, 2000: 10.
- [5] EMMA F, MICHAL P, ARTUR T. Energy-optimal data aggregation and dissemination for the internet of things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(2): 955-969.
- [6] QIN Z J, GRIT D, CARLO G, et al. A software defined networking architecture for the internet-of-things[C]//IEEE Network Operations and Management Symposium(NOMS), May 5-9, 2014, Krakow, Poland. Piscataway: IEEE Press, 2014: 1-9.
- [7] TALHA K M, ERCUMENT O, TUGRUL C. A novel SDN-based IoT architecture for big data[C]//International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium(IDAP), Sept 16-17, 2017, Malatya, Turkey. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-5.
- [8] BEHROUZ P, JAFARI N N. Data aggregation mechanisms in the internet of things: a systematic review of the literature and recommendations for future research[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2017(97): 23-34.
- [9] HAFIZUR R, NURZAMAN A, IFTEKHAR H. A hybrid data aggregation scheme for provisioning quality of service (QoS) in internet of things(IoT)[C]//Cloudification of the Internet of Things(CIoT), Nov 23-25, 2016, Paris, France. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-5.
- [10] HAFIZUR R, NURZAMAN A, IFTEKHAR H. Comparison of data aggregation techniques in internet of things(IoT)[C]// International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET), March 23-25, 2016, Chennai, India. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1296-1300.
- [11] RAHIM M, ALI G. Software defined networks: a survey[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2016(67): 1-25.
- [12] MURAT K, ARJAN D. A survey: control plane scalability issues and approaches in software-defined networking (SDN)[J]. Computer Networks, 2017(112): 279-293.
- [13] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
DENG J L. Gray theory basis[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002.
- [14] 吉培荣, 黄巍松, 胡翔勇. 无偏灰色预测模型[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(6): 6-7, 80.



JI P R, HUANG W S, HU X Y. Unbiased grey prediction model[J]. Systems Engineering and Electronics, 2000, 22(6): 6-7, 80.

- [15] RABINER H W, CHANDRAKA A P, HARI B. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670.



谭劲(1962-), 男, 博士后, 中国计量大学信息工程学院副教授, 主要研究方向为无线网络与通信、多媒体技术。

[作者简介]



王博伟(1994-), 男, 中国计量大学信息工程学院硕士生, 主要研究方向为物联网、无线传感网。



蒋文斌(1997-), 男, 中国计量大学信息工程学院硕士生, 主要研究方向为无线体域网、无线传感网。