

文章编号: 2095-4980(2021)05-0929-05

一种新的无线传感网络的时隙分配策略

刘小强^{1,2}

(1.河南科技大学 应用工程学院, 河南 三门峡 472000; 2.三门峡职业技术学院, 河南 三门峡 472000)

摘要: 时隙分配是时分多址(TDMA)接入的核心。TMDA 将时间划分为若干个固定时隙, 使 2 个干扰的节点在不同时隙内传输数据, 进而降低接入碰撞率。为此, 提出基于分布式 TDMA 的时隙分配算法。该算法以 Drand 算法为基础, 对其进行改进。利用路由信息分配时隙, 降低通信时延和传输的消息数。仿真结果表明, 与 Drand 算法相比, 提出的算法传输时延降低了约 8%, 传输的消息数约下降了 24%。

关键词: 无线传感网络; 时分多址接入; 时隙分配; 路由信息; 传输时延

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020184

A novel TDMA slot allocation algorithm in Wireless Sensor Networks

LIU Xiaoqiang^{1,2}

(1.College of Applied Engineering, Henan University of Science and Technology, Sanmenxia Henan 472000, China;
2.Sanmenxia Polytechnic, Sanmenxia Henan 472000, China)

Abstract: Slot assignment is the core component of Time Division Multiple Access(TDMA) protocols in wireless networks. By dividing the time into several fixed time slots, TMDA enables the two interfering nodes to transmit data in different time slots, thereby reducing the access collision rate. Therefore, a distributed TDMA slot allocation algorithm is proposed in this paper. Based on the Drand algorithm, the proposed algorithm is improved. Routing information is utilized to allocate time slots to reduce communication delay and the number of transmitted messages. The experiment results show better performance in comparison to referenced distributed channel allocation approaches. The latency is improved by 8%, and the messages complexity is reduced by 24% respectively.

Keywords: Wireless Sensor Networks(WSNs); Time Division Multiple Access; slot allocation; routing information; communication delay

随着电子通信技术的发展, 基于无线传感网络(WSNs)^[1-2]的物联网已在多个领域内使用, 如康复医疗、环境监测、智慧农业等。光照传感器、温湿度传感器等成为WSNs的节点, 这些节点属微型、具有感知能力的节点, 它们感测环境数据, 再进行相应的处理, 然后传输至控制中心或者信宿, 进而实现对环境监测的目的。节点采用5层的协议栈完成通信。在数据链路层, 采用接入控制协议(Medium Access Control, MAC)^[3]接入通信信道。目前, 研究人员针对MAC协议进行了大量研究, 旨在提高资源分配, 降低数据传输时延, 延长网络寿命。

能耗^[4]或节点移动、信号干扰等其他因素, 会导致节点故障, 进而引起拓扑的动态变化。这些因素对信道分配有重要影响。最优的信道分配能够减少碰撞, 缓解彼此干扰。合理地给节点分配时隙^[5]是优化信道分配的有效技术。传统的时隙分配算法通常采用集中分配方式, 即由信宿分配时隙, 再将分配方案传输至网络内每个节点。在集中分配方式中, 信宿需掌握网络节点彼此间的干扰信息, 通过这些信息推演的时隙分配策略接近于最佳方案, 但集中分配策略并不适用于拓扑频繁变化的网络。

为应对网络拓扑的动态变化, 时隙分配算法应随拓扑变化进行调整, 这需采用分布式时隙分配算法。在分布式MAC策略中, 每个节点依据自己的局部信息分配时隙, 能够依据具体要求合理分配资源, 进而提高信道资源利用率以及时隙的复用。文献[6]提出分布式随机化的时隙分配(Distributed Randomized Slot Schedule, Drand)算法。Drand算法以概率方式分配时隙。当节点分配时隙时, 向邻居节点广播请求消息, 并等待邻居节点授予消

息。一旦收到授予消息，节点就可选择一个时隙为自己所用。Drand算法解决了节点间的碰撞问题，但其在分配时隙过程中交互的消息过多，增加了网络负担，加大了节点的能量消耗。

文献[7]对Drand算法进行了改进，并提出基于能量拓扑的Drand算法(Energy-Topology Drand, ET-Drand)。ET-Drand算法在分配时隙时考虑了节点的能量因子，当节点接收到多个节点发送的请求消息时，优先给能量低的节点分配时隙。该算法提高了能量利用率，但并没有改变Drand算法交互消息过多的困境。

为此，本文提出基于Drand的优化(Improved-Drand, I-Drand)算法。I-Drand算法利用路由树信息和节点度分配时隙。为减少消息尺寸，将这些信息嵌入请求消息。仿真结果表明，提出的I-Drand算法有效降低了传输时延，并控制了产生的消息数。

1 系统模型及Drand算法的不足

1.1 系统模型

通常，采用无向图 $G=(V,E)$ 表述网络，其中 V 为传感节点集， E 为边集，即节点间的通信链路。用 $N_i(v)$ 表示节点 $v \in V$ 的 i 跳邻居集，如，若 $i=2$ ， $N_2(v)$ 表示节点 v 的二跳邻居集。令 $N(v)$ 表示节点 v 的直接邻居，即一跳邻居。

令 $Deg(v)=|N(v)|$ 表示节点度，即节点一跳邻居数； S_v 表示给节点 v 分配的时隙。引用经典的单位圆盘图(Unit Disk Graph, UDG)^[7]，UDG模型假定节点部署在无障碍的平面环境，且节点以全向天线收/发通信^[8]，并且当2个节点在彼此的通信范围内时，它们能够通信。

令 $Link_{x,y}$ 表示节点 x 与 y 能够通信的链路。如果两节点 x,y 的距离 d_{xy} 不大于 R ，即满足式(1)，则 $Link_{x,y}$ 存在。

$$\exists Link_{xy}, \text{if } d_{xy} \leq R \tag{1}$$

式中 R 表示节点的通信范围。

1.2 Drand算法的不足

Drand算法采用分布式的随机化时隙分配策略。当节点需要分配时隙，则广播请求消息。然后等待所有节点邻居回复确认消息，再选择一个不会与邻居节点产生干扰的时隙作为自己的时隙。但当节点收到多个请求消息时，节点则随机选择一个请求消息回复确认，其他的请求消息回复拒绝。一方面，传输请求消息，确认消息或者拒绝消息消耗了网络资源，即传输的消息数太多；另一方面，不考虑节点或网络信息，随机选择请求消息进行回复，降低了网络性能。为此，提出I-Drand算法，利用路由树信息和节点度分配时隙，计算节点的优先级，并优先给具有高优先级节点回复确认消息，而不是随机回复。

2 I-Drand算法

为了减少传输的消息数，并降低通信时延，I-Drand算法利用路由树和节点度信息分配时隙。

2.1 节点状态

I-Drand算法以轮方式实施，每轮由多个时隙构成。同时，每个节点维持2个时隙列表：一跳邻居节点所用的时隙和两跳邻居节点所用的时隙。且每个节点有4个状态：空闲(Idle)、授予(Grant)、请求(Request)、释放(Release)。

如图1所示，最初节点处于Idle状态。若节点想分配一个时隙(为了方便描述，假定为节点 x)，节点 x 就计算 D_x ：

$$D_x = \left\lfloor \frac{k}{N} \right\rfloor, k = \{y | y \in N(x) \vee N_1(x) \vee N_2(x) \wedge S_y \neq \emptyset\} \tag{2}$$

式中： k 表示节点 x 的两跳邻居节点内未分配时隙的节点数； N 表示两跳邻居节点内拥有的节点数。

若 D_x 小于阈值 α ，则节点 x 继续保持Idle状态；否则，向一跳邻居节点广播请求消息 $Request_x$ ，与这些邻居节点协商^[9]，给自己选择一个时隙。从而，进入请求状态Request。若节点 y 接收到请求消息 $Request_x$ ，如果节点 y 处于Idle状态或Release状态，则节点 y 进入Grant状态，并向节点 x 回复授予消息 $Grant_{y \rightarrow x}$ 。

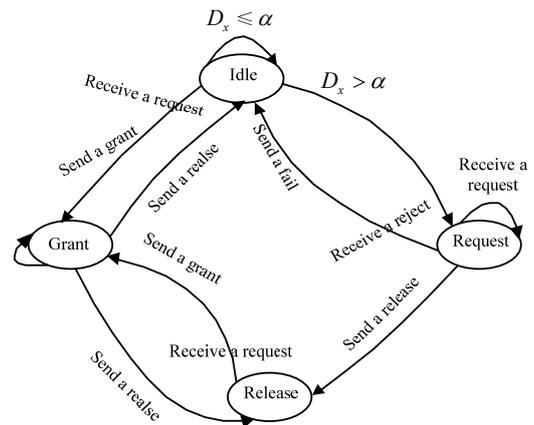


Fig.1 State transition
图1 状态转换

当节点 y 在Request状态或Grant状态收到 $Request_x$ ，则节点 y 向节点 x 发送拒绝消息 $Reject_{y \rightarrow x}$ 。当节点 x 收到任何节点发送的拒绝消息 $Reject_{y \rightarrow x}$ ，表明节点 x 预存时隙失败。因此，节点 x 向一跳邻居节点广播失败消息 $fail_x$ ，并将自己状态修改成Idle状态^[10]。图2为节点 x 预存时隙失败的示例，由于在节点 x 向节点 y 发送请求前，节点 y 已经给其一跳邻居的其他节点发送过授予消息，因此，节点 y 向节点 x 传输拒绝消息。

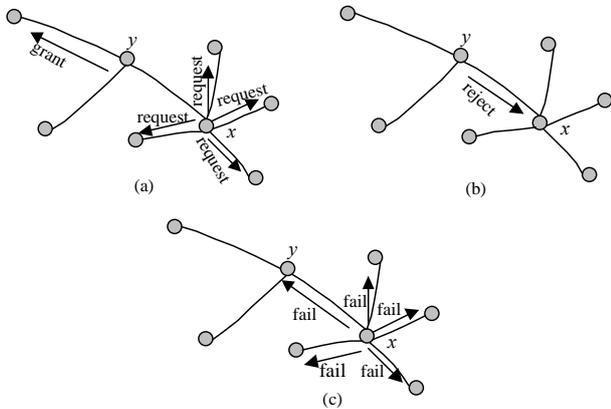


Fig.2 Failure examples
图 2 失败示例

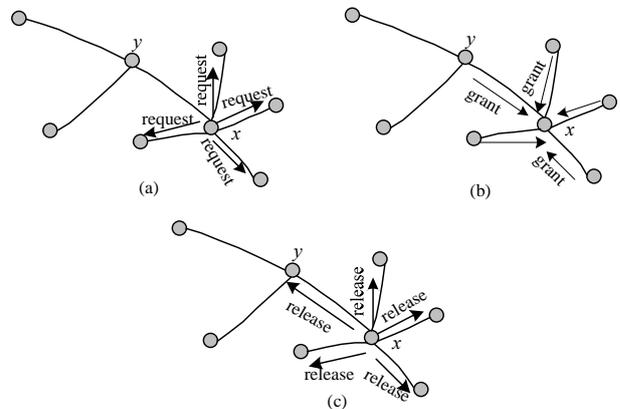


Fig.3 Successful examples
图 3 成功示例

当节点 x 收到任何授予消息，表明分配时隙成功，进入Release状态，并向邻居节点广播 $Release_x$ 消息。图3为预存时隙成功的示例。

若在一轮内节点 x 未收到授予或拒绝消息，节点 x 向邻居节点重新广播请求消息。

2.2 基于优先级的时隙分配

当收到多条请求消息时，节点依据优先级给节点发送Grant消息，优先给同条路由的节点分配时隙。该策略可以降低链路时延^[11]。原因在于：在同一条链路上的节点所分配的时隙相近。因此，可以减少总体的传输时延。此外，优先给同条路由的节点分配时隙也可减少传输消息的次数，能够降低能量消耗。

具体地，节点 x 先依式(1)计算 D_x ，再判断是否大于阈值。如果大于阈值，则向其所有邻居节点 $N(x)$ 广播请求消息 $Request_x$ 。

在每轮结束后，邻居节点 y 可能收到多条来自不同节点发送的请求消息。如果邻居节点 y 在本轮结束之前，没有发送过请求或没有向任何节点发送过Grant消息，节点 y 则依据优先级，从多个请求者中选择一个节点，并向该节点发送Grant消息。同时，向其他节点传输拒绝消息。

当收到Grant消息，节点 x 从两跳邻居节点内选择还可用的最小时隙作为自己的时隙。然后，再将自己所选择的时隙 S_x 载入释放消息中，并向邻居节点广播释放消息 $Realse_x$ 。

如图4所示，假定在一轮内有 m 个时隙，第 m 个时隙表示为 T_{Sm} 。网格矩形方块表示不可用时隙，斜线黑色方块表示可用时隙。当节点收到Grant消息后，从所有可用时隙内选择最小时隙。假定可用的时隙只有 $\{T_{S1}, T_{S3}, T_{S7}\}$ ，则优先选择 T_{S1} 。

为此，每个节点保存一个可用时隙集 Ψ_A 。最初， Ψ_A 内有 m 个时隙，每次收到释放消息，从中提取发送节点已选用的时隙，再将该时隙从可用时隙集 Ψ_A 删除。

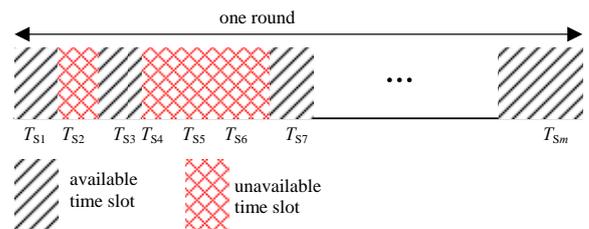


Fig.4 Example of slot allocation
图 4 时隙分配示例

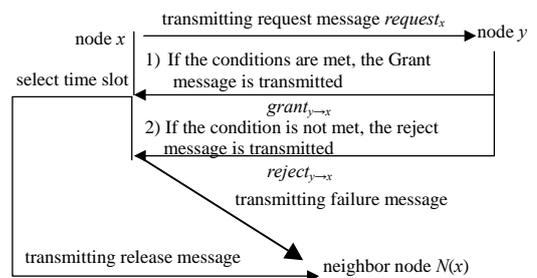


Fig.5 Process of allocating time slots
图 5 分配时隙流程

一旦收到释放消息，节点y就更新一跳邻居节点，将节点x所选择的时隙 S_x 从可用时隙集 Ψ_A 中删除，即 Ψ_A/S_x 。然后，节点y再向自己的邻居节点广播此释放消息，使邻居节点能够更新自己的可用时隙集。

若收到来自节点y的拒绝消息，节点x就向它的邻居广播失败消息，并启动重新分配时隙的工作。图5为节点x与节点y消息传输过程。

3 性能分析

3.1 仿真环境

利用NS-3^[12]仿真软件建立平台。作为开源的离散事件网络仿真工具，NS-3广泛用于科学研究。与NS-2相比，NS-3进行模块化。图6为NS-3软件模块。

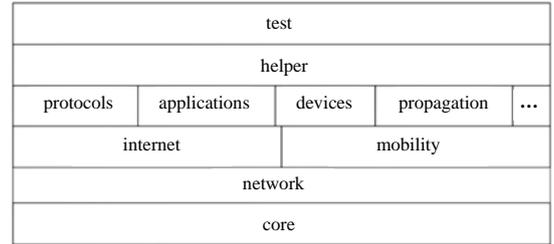


Fig.6 Ns-3 software organization
图 6 NS-3 软件组织

在200 m×200 m区域内部署n个传感节点，每个节点的通信范围R=30 m。引用节点密度 δ 作为仿真变量。节点密度是指在通信节点内的节点数，其定义如式(3)所示：

$$\delta = \frac{\pi R^2 n}{200 \times 200} \tag{3}$$

为更好地分析I-Drand算法的性能，选择同类文献[6]提出的Drand算法和文献[7]提出的ET-Drand算法作为参照，并与I-Drand算法对比分析产生的消息数(Number of Generated Message, NGM)、传输时延和调度尺寸性能。NGM是指节点在分配时隙前，每个节点所产生的消息数；传输时延是指将数据包传输至信宿所消耗的平均时间；调度尺寸是指算法所用的时隙数。

3.2 NGM性能

首先，分析Drand和ET-Drand算法、I-Drand算法的NGM性能。NGM值越大，表明算法所产生的消息数越多，算法越复杂。

图7为3个算法的NGM随 δ 变化情况。从图7可知，当 δ 值增加时，Drand算法的NGM值快速增加。原因在于：当时隙分配失败时，Drand算法产生的失败消息增加。相比之下，ET-Drand算法的NGM值随 δ 值增加而上升缓慢。这主要是因为：ET-Drand算法依据能量和拓扑信息构建优先级，并利用优先级分配时隙。与Drand算法相比，I-Drand算法的NGM值平均降低了27.4%。

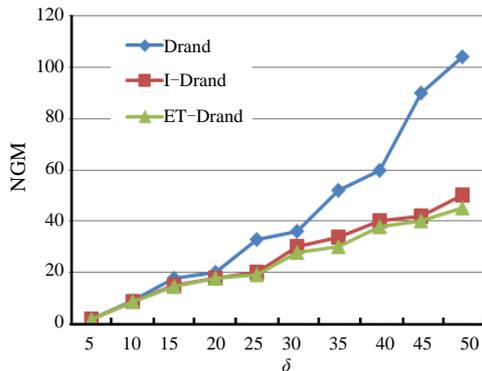


Fig.7 NGM
图 7 产生的消息数

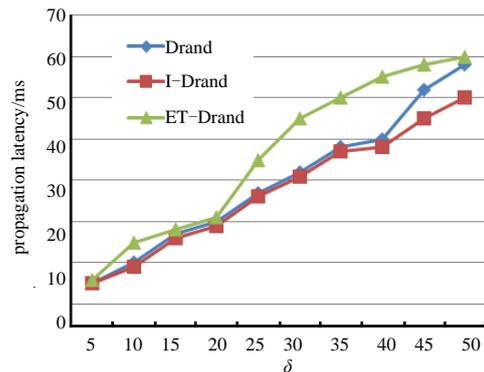


Fig.8 Propagation latency
图 8 传输时延

3.3 传输时延性能

接下来分析节点密度 δ 值对3个算法的传输时延性能的影响，如图8所示。从图8可知，3个算法的传输时延随 δ 值的增加而增加。原因在于：节点密度越高，节点数就越多，需要分配的时隙越多，加大了节点的分配时延。

此外，观察图8不难发现，相比于ET-Drand和Drand算法，提出的I-Drand算法有效地控制了时延，时延降低了约7.8%。这主要是因为：I-Drand算法依据路由信息分配时隙，缩短了节点在分配时隙的环节上的等待时间。路由树是以信宿为根节点，每个节点优先给同一个树中的父节点或子节点分配时隙。

3.4 调度尺寸性能

最后,分析I-Drand算法的调度尺寸性能。从图9可知,调度尺寸的值取决于节点密度。依据父节点或子节点关系分配时隙,可降低调度尺寸值。ET-Drand和Drand算法的调度尺寸性能几乎相同,而本文所提出的I-Drand算法的调度尺寸优于它们,平均下降了约24.2%。

4 结论

针对数据链路层的MAC协议的时隙分配问题展开分析,并提出分布式的TDMA的时隙分配算法。I-Drand算法利用树路由信息和节点度信息,并优先给同一路由的节点分配时隙,减少时延。仿真结果表明,提出的I-Drand算法有效地控制了传输的消息数,并减少了传输时延。

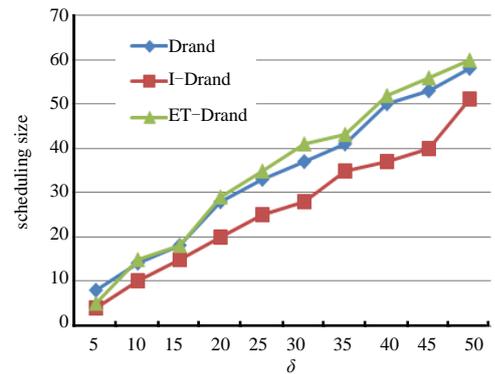


Fig.9 Scheduling size
图9 调度尺寸

参考文献:

- [1] 徐晶晶,张欣慧,许必宵,等. 无线传感器网络分簇算法综述[J]. 计算机科学, 2017,44(2):31-37. (XU Jingjing,ZHANG Xinhui,XU Bixiao,et al. Survey of clustering algorithm for Wireless Sensor Networks[J]. Computer Science, 2017,44(2): 31-37.)
- [2] 孙伟,赵心悦,张玉玺,等. 基于扩展集员滤波与信息几何的机动目标跟踪[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(5): 786-790. (SUN Wei,ZHAO Xinyue,ZHANG Yuxi,et al. Maneuvering target tracking with the extended set-membership filter and information geometry[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(5):786-790.)
- [3] 朱全继,慕福奇,冷永清. 基于TDMA的无线Ad Hoc网络MAC协议研究[J]. 微电子学与计算机, 2018,35(1):106-109. (ZHU Quanji,MU Fuqi,LENG Yongqing. Research on MAC protocol of Ad Hoc Network based on TDMA[J]. Microelectronics and Computer, 2018,35(1):106-109.)
- [4] 杜永文,练云翔,冯珂. 基于TinyOS的传感器节点能耗仿真研究[J]. 自动化仪表, 2018,39(1):96-98. (DU Yongwen, LIAN Yunxiang,FENG Ke. Research on the energy consumption simulation of sensor nodes based on TinyOS[J]. Process Automation Instrumentation, 2018,39(1):96-98.)
- [5] 臧景才,王自力,郑鑫. WSNs中数据融合树的时隙分配算法[J]. 传感技术学报, 2018,31(8):1282-1286. (ZANG Jingcai, WANG Zili,ZHENG Xin. Data aggregation slots scheduling algorithm for duty-cycled Wireless Sensor Networks[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2018,31(8):1282-1286.)
- [6] RHEE I,WARRIER A,MIN J,et al. Drand:distributed randomized TDMA scheduling for wireless Ad Hoc networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2019,8(10):1384-1396.
- [7] LI Y,ZHANG X,ZENG J,et al. A distributed TDMA scheduling algorithm based on energy-topology factor in internet of things[J]. IEEE Access, 2017,5(7):10757-10768.
- [8] SGORA A,VERGADOS D. A survey of TDMA scheduling schemes in wireless multihop networks[J]. ACM Computing Surveys, 2015,47(3):1-39.
- [9] DEXFOULI B,RADI M,WHITEHOUS K,et al. Shukor. Dicsa:distributed and concurrent link scheduling algorithm for data gathering in wireless sensor networks[J]. Ad Hoc Networks, 2015,25(7):54-71.
- [10] LI Y,ZHANG X,QIU T,et al. A distributed tdma scheduling algorithm based on exponential backoff rule and energy topology factor in internet of things[J]. IEEE Access, 2017,5(6):20866-20879.
- [11] NEGGAZI B,GUELLATI N,HADDAD M,et al. Efficient self-stabilizing algorithm for independent strong dominating sets in arbitrary graphs[J]. International Journal of Foundations of Computer Science, 2015,26(6):751-768.
- [12] 黎阳,王哲,张楚文,等. 面向车载自组织网络路由的轨迹预测算法[J]. 计算机研究与发展, 2017,54(11):2421-2433. (LI Yang,WANG Zhe,ZHANG Chuwen,et al. Trajectory prediction algorithm in VANET routing[J]. Journal of Computer Research and Development, 2017,54(11):2421-2433.)

作者简介:

刘小强(1982-),男,硕士,副教授,主要研究领域为无线传感网络路由、数据传输,V2X车联网及计算机应用.email:258484696@qq.com.