

无线传感网络中机会性的组播路由

聂燕柳

(郑州工业应用技术学院 河南 新郑 451100)

摘要 为了迎合紧急数据驱动型应用要求,低功率无线传感网络 WSNs 技术需具有一定的扩展性。WSNs 在考虑传统的多对一的数据收集流量模型时,需支持组播通信。然而,面向 WSNs 的有效组播存在挑战。为此,引用机会性转发概念,提出机会性组播路由 OMR (Opportunistic Multicasting routing)。OMR 协议由转发节点集和目的节点委派两步构成。转发节点集指给发送节点构建下一跳转发节点集。一旦转发节点集内的节点唤醒,发送节点就给该转发节点委派目的节点,此过程称为目的节点委派。发送节点再将消息副本转发至委派的目的节点,此转发过程一直重复,直到所有目的节点都被委派。仿真结果表明,相比于现存的组播路由,OMR 路由能有效地降低能效,并控制时延。

关键词 无线传感网络 路由 机会性组播 转发节点集 消息副本

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI**:10.3969/j.issn.1000-386x.2019.02.056

OPPORTUNISTIC MULTICASTING ROUTING FOR WIRELESS SENSOR NETWORKS

Nie Yanliu

(Zhengzhou University of Industrial Technology, Xinzheng 451100, Henan, China)

Abstract To meet the requirements of emergency data-driven applications, low-power wireless sensor network technology needs to be scalable. WSNs need to support multicast communication when considering the traditional multi-to-one data collection traffic model. However, efficient multicasting in WSNs is a challenge. Therefore, we introduced the concept of opportunistic forwarding and proposed opportunistic multicasting routing. OMR protocol consisted of forwarding node set and destination node delegation. The forwarding node set constructed the next group of forwarding nodes for the sending node. Once the node in the forwarding node setting was awakened, the sending node delegated the destination node to the forwarding node, which was called the destination node delegation. The sending node forwarded a copy of the message to the delegated destination node, and the forwarding process was repeated until all the destination nodes have been delegated. Simulation results show that the proposed routing provides significant reductions in energy efficiency and control delay compared to current multicasting methods.

Keywords Wireless sensor network Routing Opportunistic multicasting Forwarder node set Message copy

0 引言

传统的基于数据收集的无线传感网络 WSNs^[1-2]能够支持多对一 (Many-to-one) 的流量模型。多个源节点向单个目的节点 (信宿) 传输数据,如以信宿为根的数据收集树。而一些数据收集协议也支持沿着根向叶的数据传输,即形成一对多 (One-to-Many) 流量模型。此外,一些数据收集协议具有一定扩展性,对它们

进行修剪,它们也能支持多个源节点向潜在多目的节点中任意一个节点传输数据,即多对任意 (Many-to-any) 节点。

然而,目前缺乏多对多 (Many-to-Many) 的数据收集协议,即组播协议^[3]。设计有效的组播协议的挑战之一: WSNs 中无线电常采用值日周期 DC (Duty-Cycled) 策略,即周期性或事件触发型地关掉、开启无线电,进而保存节点能量。但当一个节点要接收数据包时,发送节点的无线电和接收节点的无线电都必须

开启。因此,如何给发送节点和接收节点安排一个短暂的同时开启无线电的时间成为 WSNs 的关键^[4]。发送节点等待接收节点开启无线电的时间越长,发送节点所消耗的能量也就越多。若发送节点需要等待多个接收节点,如组播,则发送节点将消耗更多能量,这些因素加剧了设计组播协议的难度。而机会模型能够有效地提高数据收集的能效、时延和可靠性。机会模型允许节点依据网络条件和事件动态选择转发节点,这就增加了发送节点在选择转发节点的空间。

若采用单一转发节点,发送节点需等待预选的转发节点唤醒,这必然增加时延和能耗。而相比于单一转发节点,构建转发节点集(多个转发节点),可以有效地降低转发时延。一旦构建了转发节点集,发送节点能够机会性将数据传输转发节点集内第一个唤醒的节点。一方面,降低了转发时延,另一方面,也增加链路的强健性,提高数据传输的稳定性,降低能耗。

为此,本文提出基于机会性组播路由 OMR (Opportunistic Multicasting routing)。OMR 路由考虑多个目的节点,先构建转发节点集,再从转发节点集内选择一个转发节点,通过此转发节点向目的节点传输数据包复本,直到所有目的节点均接收到数据包。仿真结果表明,提出的 OMR 路由能够有效地提高能效,并降低传输时延。

1 OMR 路由

OMR 路由是基于 DC 的异步 MAC 协议。每个节点周期地广播 beacon 包,节点通过交互 beacon 包,获取邻居节点信息。在广播 beacon 间隔 T_F 内,所有的潜在转发节点进入休眠状态^[6],休眠时间从 $[0.5T_w, 1.5T_w]$ 中内随机选择,其中 T_w 由网络设定的唤醒间隔,即节点的期望休眠时间。

OMR 模型主要由转发节点集的构建 FSS (Forwarder set selection)、目的节点代表的委派 DD (Destination Delegation) 两个阶段构成。在 FSS 阶段,源节点决定哪些邻居节点可以作为数据包的下一跳转发节点。当构建转发集后,发送节点再从转发集中选择一个能向目的节点传输数据包的节点作为转发节点,这个过程称为 DD 阶段。

1.1 FSS 阶段

所谓组播,就是数据包有多个目的节点,这样的数据包称为组播数据包。假定数据包的目的地址集为 D ,发送节点必须决定哪些邻居节点能够转发数据包(成为转发节点)。

最初,将发送节点的邻居节点作为转发节点集。令节点 i 的转发节点集为 F_i^D 。 F_i^D 内的每个转发节点必须能够有效地传输数据包。

节点覆盖:若一个转发节点能够向目的节点 $d \in D$ 传递数据包,则说明该转发节点能够覆盖 d 。对于任意一个组播数据包,要求组播转发节点能够覆盖所有目的节点 $d \in D$ 。转发节点集内至少有一个节点覆盖每个目的节点。

尽管最初将邻居节点作为转发节点,但后期须从这些邻居节点选择一些合适的节点作为转发节点。为此,本文引用两个简单的启发式算法构建转发节点。这两个算法仅依据路由梯度内的信息选择转发节点。

(1) 并集(Union)算法:给定目的节点集 D ,节点 i 的转发集为 F_i^D 。如果 $k \in N_i$ 能够覆盖任意某一个目的节点 $d \in D$,则表明该节点 k 就可以作为转发节点。然后,将每个目的节点的转发集进行并集,进而构成 F_i^D ,其中 N_i 表示节点 i 的邻居节点集。

(2) 最小覆盖集 MCSs (Minimum Covering Sets): 转发集为 F_i^D 是所有最小覆盖集的交集,而最小覆盖集要求以最少的成员覆盖目的节点。通过减少转发节点集内的成员数,最小化数据包复本数。

接下来以图 1 为例,分析这两个算法的具体的实施过程。

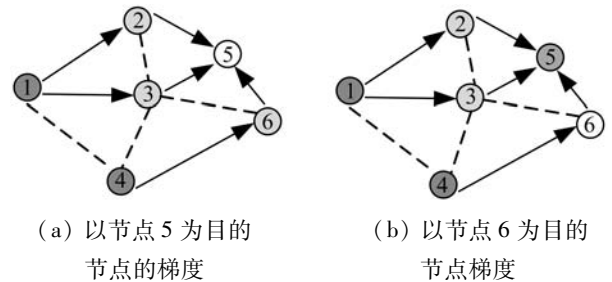


图 1 构建转发集示例

如图 1 所示,假定数据包的目的节点集 $D = \{5, 6\}$ 。图 1(a)、(b) 分别显示以节点 5、6 为目的节点的梯度。接下来,以构建节点 1 的转发节点集为例,说明 Union 算法和 MCS 算法构建转发节点集的过程。

若采用 Union 算法:对于目的节点 5,节点 2、3 能够覆盖节点 5。因此,节点 1 的转发集为 $D = \{2, 3\}$ 。类似地,对于目的节点 6,节点 1 的转发集为 $D = \{2, 3, 4\}$ 。对于目的节点集 $D = \{5, 6\}$ 的转发集,则为这两个转发集的并集,即 $F_1^{\{5,6\}} = \{2, 3\} \cup \{2, 3, 4\} = \{2, 3, 4\}$ 。

若采用 MCS 算法:MCS 算法以最小化成员数为目的,不像 Union 算法取并集,而是取交集。因此, $F_1^{\{5,6\}} = \{2, 3\} \cap \{2, 3, 4\} = \{2, 3\}$ 。表 1、表 2 分别显示了以 Union 算法、MCS 算法构成各节点的转发集结果。

表 1 以 Union 算法构建转发集

i	$F_i^{[5]}$	$F_i^{[6]}$	$F_i^{[5,6]}$
1	{2,3}	{2,3,4}	{2,3,4}
2	{5}	{5}	{5}
3	{5}	{5,6}	{5,6}
4	{3,6}	{6}	{3,6}
5	{}	{6}	{6}
6	{5}	{}	{5}

表 2 以 MCS 算法构建转发集

i	MCS_i	$F_i^{[5,6]}$
1	{2}, {3}	{2,3}
2	{5}	{5}
3	{5}	{5}
4	{6}	{6}
5	{6}	{6}
6	{5}	{5}

1.2 DD 阶段

一旦构建了转发集后,源节点 i 先向 F_i^D 内第一个唤醒的节点传输数据包。假定最早唤醒的节点为 $j \in F_i^D$ 。

接下来,进行目的节点代表的委派工作。所谓目的节点代表就是将部分目的节点作为节点 j 的目的节点^[7]。假定指定给节点 j 的目的节点集为 D_j 。对于任意一个目的节点 $d \in D$,如果满足下式,则将节点 d 加入 D_j 。

$$\exists d \in D \text{ if } j \in F_i^d \text{ then } D_j \leftarrow d \quad (1)$$

仍以图 1 为例,分析 DD 构建过程。假定传输至目的节点(节点 5、节点 6)的数据包到达节点 1,依据 Union 算法构建转发集,即 $F_1^{[5,6]} = \{2,3,4\}$ 。假定节点 4 最先唤醒。由于 $4 \notin F_1^5, 4 \in F_1^6$,则 $D_4 = \{6\}$ 。因此,将目的节点 6 作为节点 4 的目的节点,即将节点 6 委派给节点 4,随后,节点 1 将数据包分裂至节点 4,如图 2 所示。

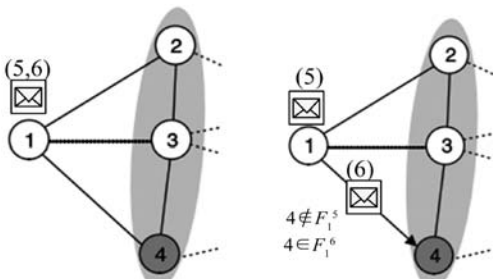


图 2 构建 DD 阶段示例

1.3 OMR 路由流程

首先,依据 1.1 节,源节点 i 先构建转发节点集 F_i^D ,然后监听转发集是否有节点唤醒。一旦有节点唤醒(假定节点 j),就给节点 j 指定委派目的节点,即构建 D_j 。同时,将数据包分裂至节点 j 。

随后,等待 D_j 内的目的节点唤醒。一旦 D_j 内有目的节点唤醒(假定节点 d),节点 j 将就数据包传输至 d ,并将 d 从 D_j 中删除。再判断 D_j 是否为空,若为空,则结束。否则,再等待 D_j 的其余节点唤醒,重复上述过程,直到 D_j 为空。整个路由流程如图 3 所示。

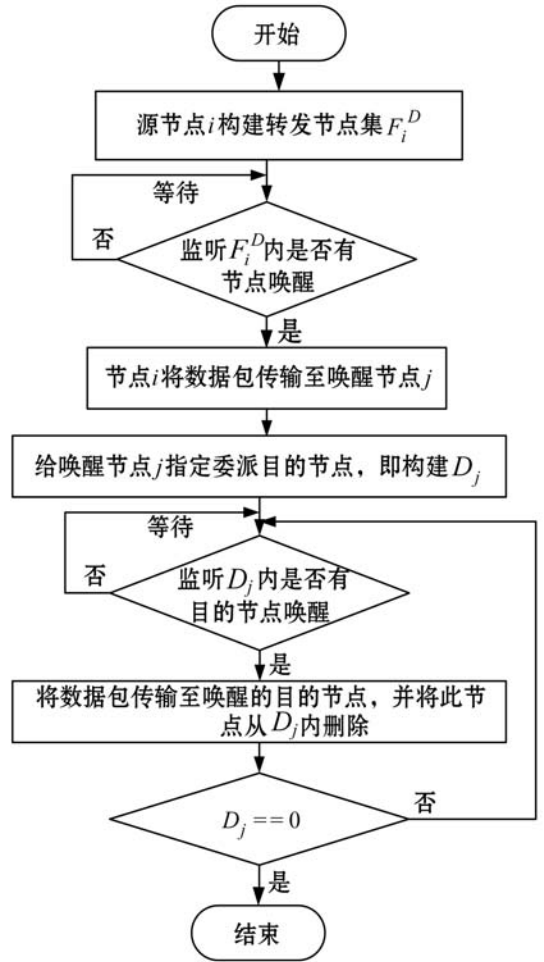


图 3 OMR 算法流程图

以图 1 为例,需传输至目的节点 5、6 的数据包到达节点 1,如图 4(a) 所示,然后以 MCS 算法构建转发集,即 $F_1^{[5,6]} = \{2,3\}$,再等待 $F_1^{[5,6]}$ 内节点唤醒。假定节点 3 唤醒,即 $j=3$ 。然后,节点 1 就将数据包传输至节点 3,如图 4(b) 所示。

节点 3 等待目的节点唤醒,一旦有唤醒,就将数据包传输至唤醒它的目的节点^[8]。如图 4(c) 所示,目的节点 6 先唤醒。随后,再等待目的节点 5 唤醒,一旦唤醒,就将数据包传输至节点 5,如图 4(d) 所示。

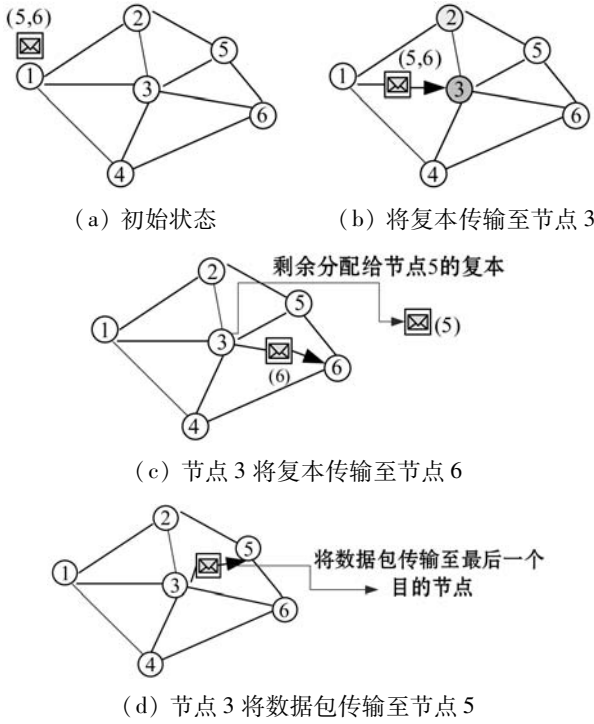


图 4 OMR 路由示例

2 性能仿真

2.1 仿真环境

利用 MATLAB 软件建立仿真平台。引用文献[9]的 RI-MAC 机会模型作为仿真模型的链路层。仿真参数如表 3 所示。

表 3 仿真参数

仿真参数	值
节点部署区域	100 m × 100 m
传感节点数	50 ~ 200
源节点数	5 ~ 10
目的节点数	10 ~ 30
数据包传输间隔	60 s
唤醒间隔	500 ms
唤醒时长	1 ms
帧时延	3 ms

系统中总共部署 K 个源节点, 优先在区域的四个角部署 4 个节点, 并在区域中心部署一个节点。剩余的源节点随机部署于区域内。 M 个目的节点也随机部署于仿真区域内。 在每个拓扑环境下, 每个源节点以特定间隔产生 100 个数据包。 以下的实验数据是基于 50 个拓扑结构下所获取的实验数据的平均值。

为了更好地分析 OMR 路由性能, 选择文献[10]的 DownTree-Opp 和文献[11]的 FROMS 进行比较, 并分析它们的转发数据包所消耗能量(转发能耗)、传输

时延和数据包复本数。其中转发能耗表示 TX/RX 因实施组播方案, 额外消耗能量的单位为单元(Units), 它表示无线电开启一毫秒所消耗的能量。而传输时延表示从源节点将数据包传输至所有组播的目的节点所消耗的时间。数据包复本数是指数据包的分裂次数, 次数越低, 性能越好。

2.2 数据分析

2.2.1 目的节点数对算法性能的影响

首先分析目的节点数对路由性能的影响, 本次实验参数: 100 个传感节点、5 个源节点, 目的节点数从 1 变化至 10, 步长为 1。仿真数据如图 5 - 图 7 所示。

图 5 显示了三个协议的转发能耗随目的节点数的变化情况。由图 5 可知, 三个协议的转发能耗随目的节点数增加呈增长趋势。这正是所预期的, 目的节点数越多, 转发的数据包数次数也越多, 所消耗的转发能量也越多。相比于 DownTree-Opp 和 FROMS 协议, 提出的 OMR 路由的转发能耗最低。

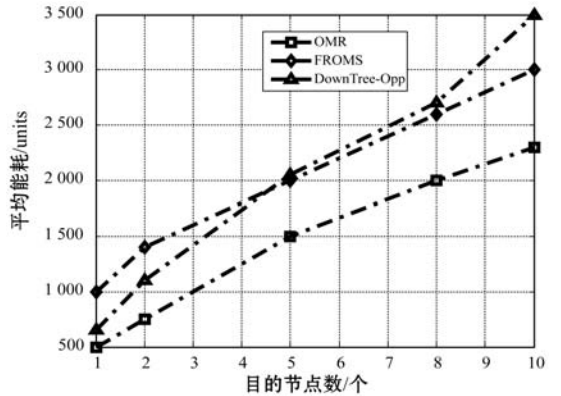


图 5 转发能耗

图 6 显示了三个协议的传输时延。由图 6 可知, 目的节点数的增加, 传输时延也增加。原因在于: 目的节点数越多, 离源节点距离远的概率也就越大, 就增加了传输时延。此外, FROMS 协议的传输时延性能最差, 这主要是因为 FROMS 是依据最优结构树传输数据包, 因此, 发送节点必须等待特定的转发节点唤醒, 这增加了传输时延。

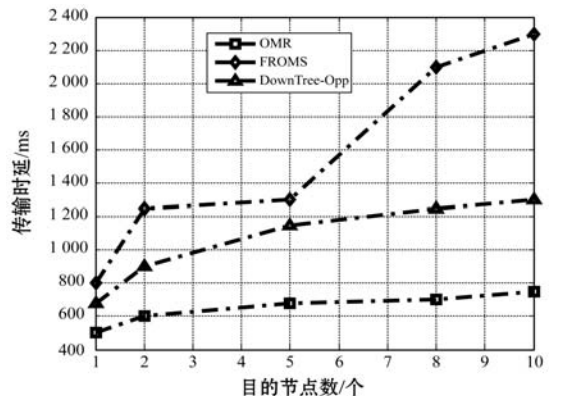


图 6 传输时延

图 7 显示了三个协议的消息复本数。由图 7 可知,OMR 路由的复本数远低于 DownTree-Opp 协议,但它的复本数高于 FROMS 协议。这说明了 OMR 算法是通过高的复本数换取低能耗、低时延。

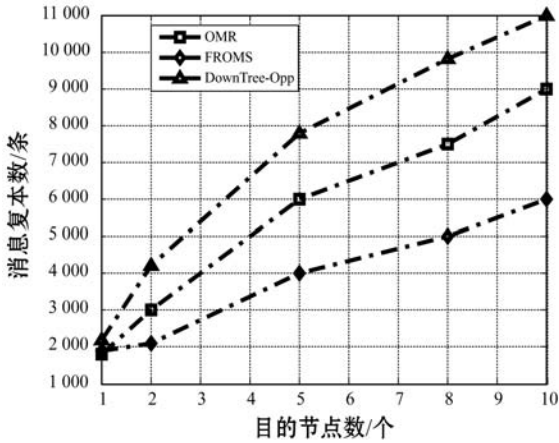


图 7 消息复本数

2.2.2 传感节点数对算法性能的影响

本次实验分析传感节点数性能的影响,实验参数如下:传感节点数从 50 至 200 变化,步长为 50;源节点数为 5,目的节点为 10。

先分析节点数对转发能耗的影响。由图 8 可知,提出 OMR 路由的转发能耗性能优于 DownTree-Opp 和 FROMS 路由。并且,OMR 路由的转发能耗随节点数的增加而下降,原因在于:节点数越多,转发节点集内节点数也越多,可选择的下一跳转发节点的概率就越大。

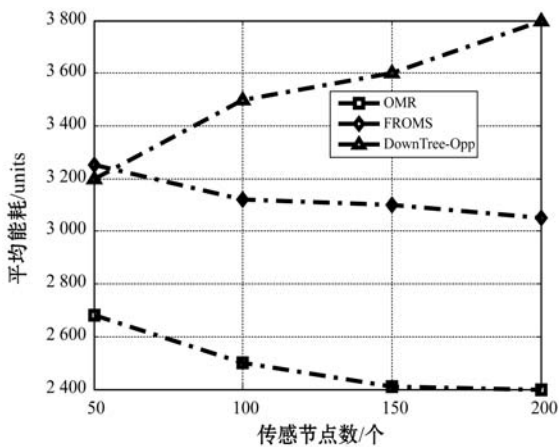


图 8 转发能耗

图 9 的传输时延数据也再次证实了 OMR 路由的性能。由图 9 可知,相比于 FROMS 和 DownTree-Opp 路由,OMR 路由的传输时延得到有效的控制。例如,当传感节点数为 200 时,OMR 算法的传输时延约 790 ms,而 FROMS 路由、DownTree-Opp 路由的传输时延分别达到 2 200 ms、1 200 ms。

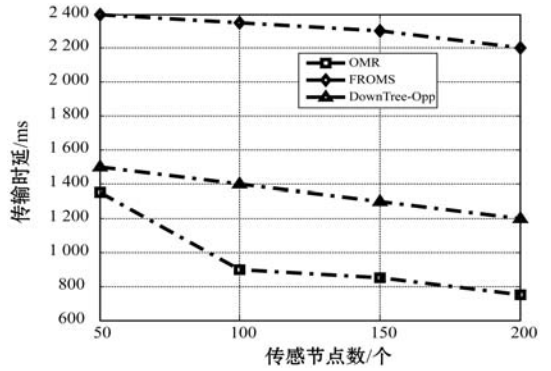


图 9 传输时延

最后,分析了三个协议的消息复本数。由图 10 可知,OMR 路由的消息复本数仍介于 DownTree-Opp 和 FROMS 路由性能之间。DownTree-Opp 路由的消息复本数最高,原因在于:数据包是依据 DownTree 协议传输,这就存在树叶重叠,导致了更多的数据包复本数。

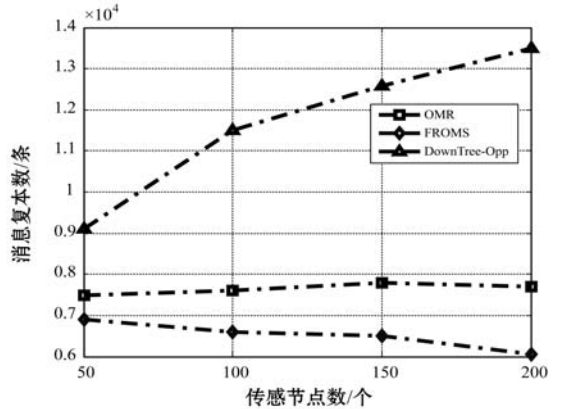


图 10 消息复本数

2.2.3 源节点数对算法性能的影响

本次实验分析源节点数对算法性能的影响。实验参数:传感节点数为 200,目的节点数为 30,源节点数分别为 5、7、9 和 10。

图 11 显示了三个协议的平均能耗,由图 11 可知,平均能耗源节点数增加呈增长趋势。原因在于:源节点数越多,所发送的数据包越多,消耗的能量肯定越多。对比图 8 不难发现,目的节点数和源节点数的增加,消耗了更多能量。这主要因为:目的节点数越多,数据包传输的次数也就越多。

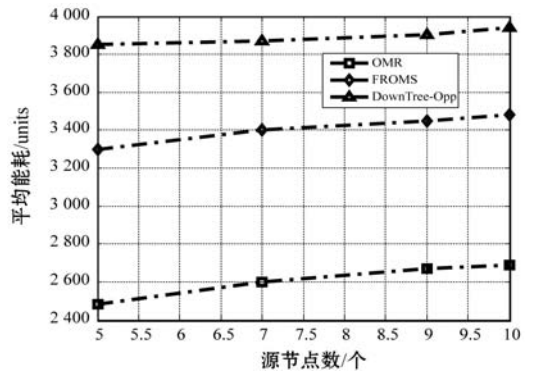


图 11 转发能耗

图 12 显示了 OMR、FROMS 和 DownTree-Opp 协议的消息复本数。结合图 10 和图 7 的数据,不难发现,目的节点数和源节点数的增加,快速地增加了消息复本数。这符合期望:目的节点越多数,源节点需要传输的数据包数就越多,每条消息的复本数就越多。

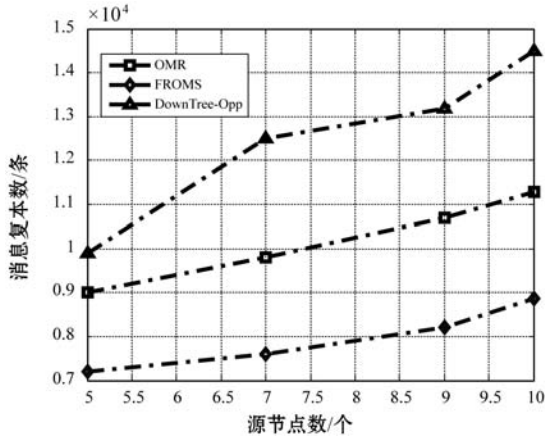


图 12 消息复本数

3 结 语

针对基于 DC 的 WSNs,提出机会性组播路由 OMR,使其具备可扩展、高能效和高可靠性。OMR 路由给每个给定的发送节点,通过简单的启发式算法构建转发节点集,一旦转发节点集内的节点唤醒,就将消息复本传输至此节点,再由此节点传输至目的节点。仿真数据表明,提出的 OMR 具有低能耗和低时延性能。

深度分析 OMR 路由的开销,并降低网络维持成本,将是后期研究工作的方向。

参 考 文 献

[1] 曹斌,刘栓. IEEE 802.15.4 传感网络一种降低 RDC 路由协议[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2016, 41(11):170-176.

[2] 全杰,杜治高,钱德沛. 基于 Inter-Flow 网络编码的多 Sink 无线传感网络 Anycast 路由[J]. 计算机研究与发展, 2014, 51(1):161-172.

[3] Buettner M, Yee G V, Anderson E, et al. X-MAC: a short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks[C]//Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems. New York: ACM, 2006: 307-320.

[4] Conti M, Kaliyar P, Lal C. REMI: a reliable and secure multicast routing protocol for IoT networks[C]//Proceedings of the 12th International Conference on Availability, Reliability and Security. New York: ACM, 2017.

[5] Lorente G G, Lemmens B, Carlier M, et al. BMRP: bidirectional multicast RPL forwarding[J]. Ad Hoc Networks,

2017, 54(6): 69-84.

[6] 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 Transactions on Networking, 2017, 25(6):3573-3586.

[7] Gong H, Fu L, Fu X, et al. Distributed multicast tree construction in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2017, 63(1):280-296.

[8] Han K, Luo J, Xiang L, et al. Achieving energy efficiency and reliability for data dissemination in duty-cycled WSNs[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2015, 23(4):1041-1052.

[9] Sun Y, Gurewitz O, Johnson D B. RI-MAC: a receiver-initiated asynchronous duty cycle MAC protocol for dynamic traffic loads in wireless sensor networks[C]//Proceedings of the 6th ACM conference on Embedded network sensor systems. New York: ACM, 2008.

[10] Duquenois S, Landsiedel O, Voigt T. Let the Tree Bloom: Scalable Opportunistic Routing with ORPL[C]//Proceedings of the 11th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM, 2013.

[11] Förster A, Murphy A L. Froms: A failure tolerant and mobility enabled multicast routing paradigm with reinforcement learning for WSNs[J]. Ad Hoc Networks, 2011, 9(5): 940-965.

(上接第 288 页)

[5] Roosz A, Halder E, Exner H E. Numerical calculation of microsegregation in coarsened dendritic microstructures[J]. Materials science and technology, 1986, 2(11): 1149-1155.

[6] Yeum K S, Laxmanan V, Poirier D R. Efficient estimation of diffusion during dendritic solidification[J]. Metallurgical Transactions A, 1989, 20(12): 2847-2856.

[7] Pustal B, Ludwig A, Sahm P R, et al. Simulation of macroscopic solidification with an incorporated one-dimensional microsegregation model coupled to thermodynamic software[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2003, 34(4): 411-419.

[8] Mortensen A. On the influence of coarsening on microsegregation[J]. Metallurgical Transactions A, 1989, 20(2): 247-253.

[9] Won Y M, Thomas B G. Simple model of microsegregation during solidification of steels[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2001, 32(7): 1755-1767.

[10] Matsumiya T. Mathematical analyses of segregations and chemical compositional changes of nonmetallic inclusions during solidification of steels[J]. Materials Transactions, JIM, 1992, 33(9): 783-794.