

基于前缀路由策略的无线传感器网络任播路由协议

顾云丽^{1,2} 徐昕^{1,2} 杜杰²

(南京信息工程大学江苏省网络监控中心 南京 210044)¹

(南京信息工程大学计算机与软件学院 南京 210044)²

摘要 无线传感器网络经常出现节点、链路暂时性失效的现象,而重新建立通信树需要消耗大量资源。针对这一问题,提出一种基于前缀路由策略的无线传感器网络任播路由协议。该协议采用一个轻量级的路由发现过程以构建新的任播路径,并采用基于前缀标签的单播查询方法。与广播相比,单播查询可以避免在网络中充斥大量路由消息包;前缀标签可以帮助协议快速找到路径较短的新的任播路径。与传统标签方法相比,该协议的前缀标签开销(存储大小)有所增加,但增加幅度不大(不超过 $\log_2 3$ 倍)。实验证明,相比于传统的基于通信树的任播路由协议,当查找新的替代任播路径时,该协议具有较低的路由查询开销(消息包数量)、较强的路由查询能力和较优的端对端传输时延性能。

关键词 无线传感器网络,任播,路由算法,前缀路由

中图分类号 TP393 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.12.012

Prefix-based Anycast Routing Protocol for Wireless Sensor Networks

GU Yun-li^{1,2} XU Xin^{1,2} DU Jie²

(Jiangsu Engineering Center of Network Monitoring, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)¹

(College of Computer and Software, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)²

Abstract In wireless sensor networks, nodes and links often suffer temporary failures, and this needs to consume a lot of resources for re-building communication tree. For this problem, a prefix-based anycast routing protocol for wireless sensor networks was proposed. The protocol applies a lightweight routing discovery process to build new anycast paths, and applies unicast method based on prefix labels. Compared with broadcast, unicast method can avoid flooding a large number of routing packets in the network. Prefix routing can help to find new anycast paths with fewer path length quickly. Compared with the traditional label methods, the cost (label size) of prefix label increases, but the increasing amount is very small (not more than $\log_2 3$ times). In comparison with traditional tree-based anycast routing protocol, simulation experiments results show that the performance of the proposed algorithm is better in terms of routing query overhead (information packets number), routing query capability and end-to-end transmission delay while searching for a new alternative anycast path.

Keywords Wireless sensor networks, Anycast, Routing protocol, Prefix-based routing

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)往往部署在森林、战场等大范围区域。为了节能并均衡能耗, WSN 中往往部署着多个基站,节点可以根据情况将监测数据信息任播(anycast)至一基站处。

由于 WSN 节点的能量有限且难于补充,同时其通信、存储和计算能力较弱,传统的表驱动路由协议如 OSPF(Open Shortest Path First)等不适合 WSN,而按需驱动路由协议(如泛洪)的路由查询开销极大。因此,设计一个能耗较少的任播路由协议是 WSN 任播路由领域的一个重要研究目标。

任播路由领域还比较新颖,尤其是 WSN 任播路由协议

的研究成果目前还相对较少。Lenders 等^[1]提出一种基于基站密度场理论的任播路由协议;Kim 等^[2-3]将周期性的休眠-唤醒机制引入到 WSN 任播路由协议中;Yerra 等^[4]观察任播路由协议的中继节点的传输效率、传输时延等关键性能指标;Dinh 等^[5]基于智能天线的有向传输能力,设计了一种新颖的面向角色(Actor-oriented)的有向 WSN 任播路由协议;Wang 等^[6]提出了一种分布式地理 WSN 的 k -任播路由协议(GKAR);Kostin 等^[7]研究了基于移动传感器和移动多 Sink 的任播路由,该方案基于信息树等算法思想;Gao 等^[8]提出了一种基于任播通信树策略的 k -任播路由协议,其利用 WSN 的广播特点来节省路径能耗(即 k 条路径尽量共用相同链路算法思想);Flury 等^[9]证明了在 WSN 中指定任播组和源

收到日期:2017-11-30 返修日期:2018-02-30 本文受国家自然科学基金项目(61403206)资助。

顾云丽(1978-),女,博士,讲师,主要研究方向为无线传感器网络,E-mail: guyunli@nuist.edu.cn(通信作者);徐昕(1975-),男,博士,副教授,主要研究方向为无线传感器网络,E-mail: xuxin@nuist.edu.cn(通信作者);杜杰(1978-),男,博士,副教授,主要研究方向为数据挖掘,E-mail: dujie@nuist.edu.cn。

的标签字符串 $\lambda(v)$,即保存节点 v 的前缀标签到 $\lambda(v)$ 中。如图 1 所示,节点 n_{13} 的地址前缀标签为 322。 $\lambda(v)$ 的长度记为 l_v ,由此可知, $\lambda(v)$ 的第 l_v 个字符即节点标识 s_v 。显然,节点 v 在信息树的第 l_v 层高度。 $\lambda(v)$ 的第 k 个字符记为 $\lambda^{k^{th}}(v)$,即源节点的第 k 代子孙; $\lambda(v)$ 的前 k 个字符构成的字符串记为 $prep^k(\lambda(v))$; $x(u,v)$ 为节点 u 和节点 v 的前缀标签的最大共同前缀,其长度记为 $l(u,v)$ 。

在本文协议中,节点需保存并时常更新其相邻邻居节点信息表。邻居节点表中每个表项需保存邻居节点的前缀标签、邻居节点的 MAC 地址、邻居状态等信息,其结构如图 2 所示。其中,邻居状态信息用来保存该邻居节点是否已被其他任播路径所占用。

Prefix Label	MAC Address	Neighbor State	...
--------------	-------------	----------------	-----

图 2 邻居节点信息表

Fig. 2 Neighbor node information table

通过前缀标签,可以计算出当前节点与邻居节点在信息树中的关系类型(计算关系时不考虑源节点)。关系类型包括父子节点、兄弟节点、叔侄节点、堂兄弟节点、同族节点(拥有共同祖先)等类型。

1) 父子关系:节点 u 是节点 v 的父节点,需满足 $x(u,v) = \lambda(u)$ 。

2) 叔侄关系:节点 u 是节点 v 的叔伯节点,需满足 $x(u,v) = prep^{l_u-1}(\lambda(u)) = prep^{l_v-2}(\lambda(v))$ 。

3) 兄弟关系:节点 u 是节点 v 的兄弟节点,需满足 $x(u,v) = prep^{l_u-1}(\lambda(u)) = prep^{l_v-1}(\lambda(v))$ 。

4) 堂兄弟关系:节点 u 是节点 v 的堂兄弟节点,需满足 $x(u,v) = prep^{l_u-2}(\lambda(u)) = prep^{l_v-2}(\lambda(v))$,并且 $prep^{l_u-1}(\lambda(u)) \neq prep^{l_v-1}(\lambda(v))$ 。

5) 同族节点:节点 u 是节点 v 的同族节点,需满足 $l(u,v) \geq 1$ 。

以往查询路由时往往采用 AODV 的广播机制。为节省查询能耗,本文采用单播机制的路由查询。当有任播路径失效时,由断裂处节点 t 的子孙节点(依次查询)通过发送 ExploreMsg 消息探测路由。ExploreMsg 需携带节点 t 的前缀标签。

以断裂处节点 t 的孩子节点 s 为例,其在选择下一站节点 v 时,如果在邻居节点中有多个候选节点可供选择,则可以利用邻居关系类型帮助选择,以尽快查询到较优(路径长度较短)的任播路径。按照以下顺序选择下一站节点:

1) 叔伯节点、堂兄弟节点、堂侄节点、拥有共同祖父或祖先的节点(如堂祖父),选择时,辈份高者优先,即信息树中 l_v 值较小者优先;

2) 无亲缘关系节点(l_v 较小者优先);

3) 兄弟节点;

4) 子女节点;

5) 已被其他任播路径占用的节点。

由于是当前节点的父节点故障造成的原任播路径失效,在搜索新的任播路径时,选择下一站的策略是:优先选择叔伯

节点、堂兄弟节点、堂侄节点、拥有共同祖父或祖先的节点等,检查其信息树的路径是否可以到达祖父(祖先)节点(避开父节点),并按原任播路径至根节点。如图 1 所示,由于节点 n_7 故障导致信息树中的任播路径 $p(A_2)$ 不可用,因此子女节点 n_{12} 应首先选择其叔伯节点 n_8 ,此时可以找到新的任播路径 $p'(A_2) = (s, n_3, n_8, n_{12}, A_2)$ 。在叔伯节点、堂兄弟节点、堂侄节点或同族节点中选择时,辈分高者优先,即信息树中 l_v 较小的节点优先。如图 1 所示,通过堂侄节点的新路径 $p''(A_2) = (s, n_3, n_8, n_{17}, n_{15}, n_{12}, A_2)$ 显然劣于 $p'(A_2)$ 。

兄弟节点的优先权低于无亲缘关系节点,这是由于兄弟节点与当前节点拥有共同的父亲,即兄弟节点至根节点的通信树路径也不可用。

已被其他任播路径占用的节点的优先度最低,这是由于,选用被占用节点时将会出现交叉任播路径。

下一站节点 u 到 ExploreMsg 后,首先检查是否存在可用信息树路径 $p(u)$ 。如果存在,节点 u 则沿路转发 ExploreMsg;反之,根据其携带的节点 t 的前缀标签,按照上述选择策略转发 ExploreMsg 至相应邻居节点。最终,原路返回 ResponseMsg 消息并通知节点 s 任播路径可以(或不可)创建。

4 前缀标签的开销分析

传统方法(Traditional Scheme, TS)为 G 中网络节点(共计 N 个)设置标签,只需保证标识唯一即可。而本文的标签设置策略除上述目标以外,还需要表达该节点在信息树中的层次等信息,因此本文节点的标签开销(平均存储大小)要高于 TS。本节以 TS 为对照方法,讨论本文前缀标签的开销。

TS 中,只需保证各节点标识唯一即可,因此每个节点标签的开销 $C(T)$ 为:

$$C(T) = \log_2 N \quad (2)$$

节点 $v \in V$ 的前缀标签在 WSN 中保存(或传递)时可以采用两种策略:定长策略(Fixed-length Scheme, FS)和变长策略(Variable-length Scheme, VS)。FS 是指所有节点的前缀标签长度相等(按照最大标签长度设置);VS 是指根据当前节点的实际标签长度来保存。显然,VS 中节点标签的平均开销低于 FS。

如前文所述,信息树为 ω -叉树,即一个节点最多有 ω 个孩子。字符表 $\Gamma = \{s_i, i=1, \dots, \omega+1\}$,即 Γ 需要 $\omega+1$ 个字符来表示 ω 个孩子,以及一个用来表示前缀标签结束的符号(VS 需要,如图 1 信息中 n_6 的前缀标签可标记为 22#,其中 # 用来标记结果)或者一个用来填充标签至最大长度的符号(FS 需要,如图 1 信息树中节点标签固定长度为 4, n_6 的前缀标签可标记为 22&&&,其中 & 用来填充标签至最大长度)。因此,一个 Γ 中的字符需要 $\lceil \log_2(\omega+1) \rceil$ bit 来表示。

当信息树为完全 ω -叉树时,可得树的高度 H 为(忽略源节点):

$$H = \lfloor \log_{\omega} N \rfloor \quad (3)$$

1) VS 标签开销 $C(V)$

在 VS 情况下,设节点 $u(u \in V)$ 处于信息树的第 d 层,即节点 u 的前缀标签长度 $L_V(u) = d$,可得其标签所需存储空间 $S_V(u)$ 为:

$$S_V(u) = \lceil \log_2(\omega+1) \rceil d \quad (4)$$

完全 w -叉树的前 $H-1$ 层是满 w -叉树, 共有 $N_i = w^{H-1} - 1$ 个节点。因此, 信息树中 N 个节点共需开销(存储空间) C_V' , 计算如下:

$$C_V' = \lceil \log_2(w+1) \rceil \times ((N - (w^{H-1} - 1)) \times H + \sum_{i=1}^{H-1} (i \times w^i)) \quad (5)$$

由此, 可得 VS 中节点的平均开销 $C(V)$ 为:

$$C(V) = C_V' / N \quad (6)$$

2) FS 标签开销 $C(F)$

在 FS 情况下, 节点前缀标签长度 $L_F = H$, 其节点开销 $C(F)$ 为:

$$C(F) = \lceil \log_2(w+1) \rceil L_F \quad (7)$$

以下以 TS 为对照方法, 分析 FS 的节点平均开销:

$$r = \frac{C(F)}{C(T)} = \frac{\lceil \log_2(w+1) \rceil \times \lfloor \log_w N \rfloor}{\log_2 N} \quad (8)$$

为简化讨论, 在式(8)中, $\lfloor \log_w N \rfloor \approx \log_w N$, $\lceil \log_2(w+1) \rceil \approx \log_2(w+1)$, 则有:

$$r = \log_w(w+1) \quad (9)$$

其中, 由于 $w \geq 2$, 可得 $1 < \log_w(w+1) < \log_2 3$ 。由此可得, $1 < r < \log_2 3$ 。

又由前文描述易知, 在节点标签开销方面, VS 优于 FS; TS 优于 VS 及 FS。综上分析, 可得:

$$C(T) < C(F) < C(V) < \log_2 3 \times C(T) \quad (10)$$

由此得出结论: 相比于传统标签方法, 本文采用的前缀标签方法(FS 和 VS)增加了相应开销(节点标签平均存储大小), 但开销增加的幅度不大(不超过 $\log_2 3$ 倍)。

5 仿真实验及分析

随机产生 $N(25 \sim 150)$ 个节点, 基站随机分散布置, 其数目 M 根据节点数目相应设置为 $2 \sim 12$ 。节点随机均匀分布在一个矩形区域范围内; 每个节点与周围节点的相邻距离为 $8 \sim 12$ m; 节点可以根据实际需求调节传输半径, 最大传输半径 $R=10$ m; 节点汇报至基站的数据包大小为 80 Byte, 传输速率为 40 kb/s; 信息树 w 设置为 3。

以文献[7]基于通信树的任播路由协议(做相应简化或改变, 如采用 AODV 策略的 RREQ 和 RREP 机制查询路由、各任播路径中链路不共享优先策略等)为对照路由协议(简称为 ARP), 并通过实验评价文中路由协议(简称为 ARP-PL)的性能。

WSN 中路由协议的一个重要指标是能耗。我们通过实验分析 ARP-PL 路由的查询能力及开销, 不考虑初始阶段信息树的构造开销。观察不同网络规模下各协议路由的开销(路由消息包数量), 结果如图 3 所示。

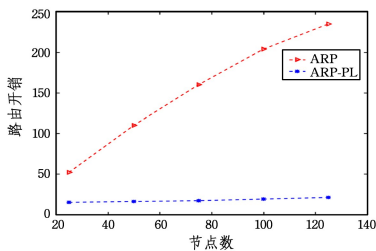


图 3 节点数与路由开销的关系

Fig. 3 Relationship between number of nodes and routing overhead

由图 3 可以看出, ARP 协议的开销(控制消息 RREQ 和 RREP 数量)要大于 ARP-PL (ExploreMsg 和 ResponseMsg 数量)的开销。这是由于 ARP 中的 AODV 采用的是广播机制进行路由查询, 相比于 ARP-PL 的单播查询机制, ARP 的控制消息的数量要大大超过 ARP-PL; 而且随着网络规模的增大, ARP-PL 的开销增长得更加明显; 另外, ARP-PL 的标签前缀设置使得其路由消息包的大小有额外的增加, 但增加幅度相对较小 ($N=150$ 时, FS 中的节点前缀标签大小约为 9.1 bit)。对比 APL 和 APL-PL 的路由消息数量可知, ARP-PL 的开销仍然具有优势。

实验观察各协议路由的查询能力。以 ARP 和 ARP-PL 寻找到的节点不相交任播路径数量为观察目标。显然, 任播路径的数量不仅与网络节点数有关, 还取决于网络链路的数量。当节点最大传输距离 R 增大时, 网络链路数随之增加。设置 R 为 10 m 和 14 m, 观察不同网络规模下各协议寻找到的任播路径数目, 结果如图 4 所示。

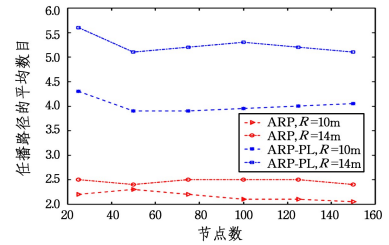


图 4 节点数与任播路径平均数目的关系

Fig. 4 Relationship between number of nodes and average number of anycast paths

由图 4 可以看出, 随着 R 的增加, G 中的无线链路也相应增加, 各协议查询到的任播路径的平均数量也随之增加; 在不同网络规模下, 相比于 ARP, ARP-PL 寻找到的任播路径数量较多, 这是由于 ARP-PL 可以借助节点的邻居信息表查找其他路径, 而 ARP 只在通信树的链路中查找路径, 路由查询能力低于 ARP-PL。

观察不同网络规模下各协议寻找到的任播路径的平均长度(跳数), 结果如图 5 所示。

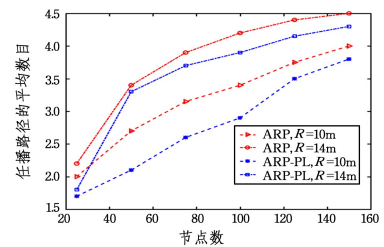


图 5 节点数与任播路径平均跳数的关系

Fig. 5 Relationship between number of nodes and average anycast paths hops

由图 5 可知, 当网络规模增加、 R 增加(链路增加)时, 各协议查询到的任播路径的平均跳数也相应增加。但可以看出, ARP-PL 寻找到的任播路径的平均跳数要少于 ARP, 这是由于 ARP 只在通信树的链路中寻找任播路径, 而 ARP-PL 可以借助节点的邻居信息表查找其他路径, 以选择出最优路径, 因此得到其任播路径的平均跳数较小。

相比于 ARP, ARP-PL 寻找到的任播路径的长度较短,因此 ARP-PL 的端对端传输时延性能也同时优于 ARP, 其实实验结果曲线与图 5 相同(只讨论节点各跳的传输时延,不讨论其他时延)。

结束语 针对在 WSN 中重建通信树需要消耗大量资源的问题,文中提出一种轻量级的路由发现过程来构建新的任播路径。在路由发现过程中,本文协议采用基于前缀路由策略的单播寻路方法,从而能够避免在网络中充斥大量的路由消息包。相比于传统标签方法,该协议的前缀标签开销有所增加,但增加幅度不大。实验数据表明,相比于传统的基于通信树的任播路由协议,当查找新的替代任播路径时,该协议具有较低的路由查询开销(路由查询消息包数量)、较强的路由查询能力和较优的端对端传输时延性能。

参 考 文 献

- [1] LENDERS V, MAY M, PLATTNER B. Density-based anycast: a robust routing strategy for wireless Ad Hoc networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2008, 16(4): 852-863.
- [2] KIM J, LIN X, SHROFF N B. Optimal anycast technique for delay-sensitive energy-constrained asynchronous sensor networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2011, 19(2): 484-497.
- [3] KIM J, LIN X, SHROFF N B, et al. Minimizing delay and maximizing lifetime for wireless sensor networks with anycast[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2010, 18(2): 515-528.
- [4] YERRA R, MALYALA K, PACHAMUTHU R. Reliability and delay analysis of slotted anycast multi-hop wireless network targeting dense traffic IoT applications[J]. *IEEE Communications Letters*, 2015, 19(5): 727-730.
- [5] DINH T, KIM Y. Actor-oriented directional anycast routing in wireless sensor and actor networks with smart antennas[J]. *Wireless Networks*, 2016, 23(5): 1467-1478.
- [6] WANG X, WANG J, LU K, et al. GKAR: A novel geographic k-anycast routing for wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2013, 24(5): 916-925.
- [7] KOSTIN A E, FANAEIAN Y, AL-WATTAR H. Anycast tree-based routing in mobile wireless sensor networks with multiple sinks[J]. *Wireless Networks*, 2016, 22(2): 579-598.
- [8] GAO D, LIN H, LIU X. Routing protocol for k-anycast communication in rechargeable wireless sensor networks[J]. *Computer Standards & Interfaces*, 2016(43): 12-20.
- [9] FLURY R, WATTENHOFER R. Routing, Anycast, and Multicast for Mesh and Sensor Networks[C]// *IEEE Inforcom-IEEE International Conference on Computer Communications*. IEEE, 2007: 946-954.
- [10] XUAN D, JIA W, ZHAO W, et al. A routing protocol for anycast messages[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2000, 11(6): 571-588.
- [11] BAKKER E M, VAN LEEUWEN J, TAN R B. Prefix routing schemes in dynamic networks[J]. *Computer Networks and ISDN Systems*, 1993, 26(4): 403-421.
- [12] WU J, SHENG L. Deadlock-free multicasting in irregular networks using prefix routing[J]. *Journal of Supercomputing*, 2005, 31(1): 63-78.
- [13] LEE S W, HA J S, KO Y B. A lightweight prefix-based routing for content-centric networking[C]// *Fifth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*. IEEE Press, 2013: 656-660.
- [14] XU G, REN K, GU N. Stochastic Prefix-based fault tolerant source routing algorithm for network on chip[C]// *International Conference on Computer & Information Science (ICIS)*. IEEE, 2012: 712-717.
- [15] 郭东岳, 刘林峰. 一种基于区域朋友关系的机会路由算法[J]. *计算机科学*, 2017, 44(3): 105-109.
- [13] SANJAY K, DHURANDHER D, KUMAR S, et al. Shruti Bhati HBPR: History Based Prediction for Routing in Infrastructure-less Opportunistic Networks[C]// *2013 IEEE 27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA)*. 2013: 931-936.
- [14] LI F, WU J. Local Com: A Community-based Epidemic Forwarding Scheme in Disruption-tolerant Networks[C]// *6th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks*. 2009: 1-9.
- [15] CHEN K, SHEN H Y. Smart: Lightweight distributed social map based routing in delay tolerant networks[C]// *Proc. of the IEEEICNP 2012*. 2012: 1-10.
- [16] BULUT E, SZYMANSKI B. Exploiting friendship relations for efficient routing in mobile social networks[J]. *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, 2012, 23(12): 2254-2265.
- [17] YUAN S T, SUN J. Ontology-Based Structured Cosine Similarity in Speech Document Summarization[C]// *Proc. of IEEE/WIC/ACM Conference on Web Intelligence*. 2004.
- [18] OH S. An advanced taxi movement model in the working day movement for delay tolerate networks[J]. *Cluster Computing*, 2014, 17(3): 751-756.
- [19] RUBIN I, CHOI C. Impact of the location area structure on the performance of signaling channels in wireless cellular networks[C]// *IEEE International Conference on Communications*. IEEE, 1996: 1761-1765.
- [20] GONOOZI M, DASSANAYAKE P. User mobility modeling and characterization of mobility pattern[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1997, 15(7): 1239-1252.

(上接第 65 页)