

SANs 中一种基于有限跳数的单反应节点的选择算法

符琦^{1,2} 蒋云霞³ 徐振阳² 窦文华²

(湖南科技大学计算机学院 湘潭 411201)¹

(国防科技大学计算机学院 长沙 410073)² (湖南科技大学网络信息中心 湘潭 411201)³

摘要 无线传感器反应网络是一种从无线传感器网络衍生出来的新型网络模型。本文首先对无线传感器反应网络中单个反应节点的选择模式进行了介绍,接着提出一种基于有限跳数和能量约束条件的单个反应节点选择算法,最后给出了该算法的性能对比结果。

关键词 无线传感器反应网络,实时通信,有限跳数,能量有效

A Single-Actor-Selection Algorithm Based on Hop-Bounded in Wireless Sensor and Actor Networks

FU Qi^{1,2} JIANG Yun-Xia³ XU Zhen-Yang² DOU Wen-Hua²

(Computer Institute, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201)¹

(Computer Institute, National University of Defense Technology, Changsha 410073)²

(Center of Networks Information, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201)³

Abstract Wireless Sensor and Actor Networks(WSANs)is a new networks model derived from Wireless Sensor Networks(WSNs). In this paper, the single-actor-selection model in WSANs is introduced firstly. Then an algorithm based on hop-bounded and energy constraints of the single-actor-selection for WSANs is addressed and it's performance contrast is given finally.

Keywords Wireless sensor and actor networks, Real-time communications, Hop-bounded, Energy efficiency

1 概述

无线传感器反应网络(WSANs)是从无线传感器网络(WSNs)衍变而来的一种新型网络模型,它一方面既有传感网络的传感检测功能,另一方面又具有快速对检测到事件的反应能力,具有很强的军事、商业应用背景。WSANs 涉及到一组经无线介质连接到一起的传感节点(Sensor)和反应节点(Actor)。文[1]中, Sensor 用于侦测事件的发生,并将采集到的相关事件信息发送给 Actor。而 Actor 因为具备较高的处理和通信能力,且能量充足(具有更长的电池时间或可配置恒定的电源),可以主动地处理事件信息,并对现实环境中发生的事件做出适当的反应。与 WSNs 中的汇聚节点(Sink)相比, Actor 可以离事件区域的传感节点更近,从而减少数据传送的延迟,更容易满足应用的实时需求。

在 WSANs 中,由于 Actor 的存在,需要 Sensor 对单个或多个 Actor 作出选择,以决定事件信息的传送对象。如图 1 所示,在我们所讨论的单个反应节点选择(Single-Actor-Selection, SAS)的模式中,传感节点只将数据传送给一个反应节点。SAS 中最大的挑战在于确定由哪个反应节点来接收传感节点发送的数据。为选出一个反应节点,需要传感节点相互协调。反应节点可以依据事件区到反应节点的距离、传感节点的能量消耗、反应节点的作用范围和当前能力等因素来选择。在 SAS 中,不需要反应节点相互协调,并且从检测到数据至做出反应的时间延迟也短。特别是在多个事件同时发

生或者事件频繁发生且反应节点个数少的时候,SAS 模式能够实现更有效的操作。但另一方面,由于事件区中所有传感节点需要进行复杂的分布式协调,从而消耗能量较大,导致资源受限的传感节点更容易失效。考虑上述相关特点,下面我们就具体算法及相关实现环境进行阐述。

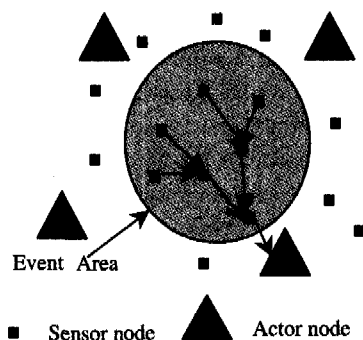


图 1 单个反应节点的选择

2 网络模型及相关假设

为了更好地讨论我们所提出的算法,在此先对研究环境做出以下假设:1)每个传感节点通过配备 GPS 接收装置或其他定位技术^[9]来确定自身的位置;2)每个传感节点通过周期性地发送自身的位置给邻居节点来决定它的邻居节点的位置信息;3)每个反应节点通过周期性地向事件区域发送信标

符琦 硕士研究生,讲师,主要研究领域有传感器网络和传感反应网络;蒋云霞 讲师,主要研究领域有网络通信与安全;徐振阳 博士研究生,主要研究领域有传感器网络和传感反应网络;窦文华 博士生导师,主要研究领域有传感器网络、传感反应网络、高速网络、多媒体网络和网络安全。

(Beacons)来提供其位置信息。另外,所有的传感节点均具有相同的通信范围、能量和传感范围等能力,而且传感节点和反应节点都假设为固定的、不能移动的节点。

在此基础上,我们给出 WSAWs 的以下网络模型描述。对于 WSAWs,我们可以用一个定向图 $G(V,E)$ 来描述。在这里, V 是一个有限维数空间内的传感节点和反应节点的有限集合 ($v \in V$), 弧线集合 E 表示有效的通信链路。假定 A 表示反应节点的集合 ($m = |A|$), N 表示传感节点的集合 ($n = |N|$)。考虑作为接收者的反应节点需要从一个或多个源节点接收数据,我们假定 S 为源节点的集合 ($s \in S$), 该集合中的传感节点用于侦测事件的发生, 比如位于事件区域内的传感节点就是该集合中的成员。由上述定义,我们可以得到如下一些关系: $v = n + m, V = N \cup A, S \subset N, N \cap A = \phi$ 等等。

3 有限跳数最小能量代价树算法

正如我们所知道的,实时性要求是 WSAWs 应用的一个重要考量因素。为此,我们先引入一个概念——有限跳数阈值 H , 用于刻画实时性需求。另外,传感节点的有限能量约束也是 WSAWs 应用要考虑的一个重要因素。考虑上述因素,我们提出了一个有限跳数最小能量树算法 (Hop-Bounded and Minimum Energy Cost Tree, HBMECT), 用于解决单个反应节点的选择问题。在 HBMECT 中,传感节点试图找到一个合适的反应节点, 以便构造一条从事件区域内的传感节点到该反应节点的最小能量路径, 且满足有限跳数的约束条件。这样,事件信息便可以以一种能量有效的方式进行传送。

为了得到基于有限跳数和能量约束的单个反应节点选择的最优策略,我们通过整数线性规划 (Integer Linear Programming, ILP) 方法对 HBMECT 算法进行公式化,以求得最优解。下面,我们先介绍一些公式化中用到的相关符号:

- C_{ij} : 节点 i 和 j 之间的链路的能量代价。我们采用如下能量模型: $C_{ij} = \kappa d_{ij} + \tau^{[12]}$ (在这里, α 是一个路径丢失指数, $2 \leq \alpha \leq 5$; d_{ij} 是节点 i 和 j 之间的几何距离; $\kappa, \tau \in \mathbb{R}$, 均为实数)。

- h_i : 表示第 i 个反应节点的二元变量, 当且仅当第 i 个反应节点被选作接收者时, 该变量为 1, 否则为 0。

- H : 有限跳数的阈值。

- p_{ik}^a : 表示路径矩阵中的某个元素。考虑从传感节点 a 到反应节点 j 的路径 $L(i, a)$, 如果连通节点 j 和 k 的链路也位于路径 L 上, 则该元素所在位置 1, 否则为 0。

在此基础上,我们给出 HBMECT 的 ILP 描述:

$$\text{给定决策变量: } H, C_{ij} \quad (1)$$

$$\text{寻找目标变量: } h_i, p_{ik}^a \quad (2)$$

使目标函数最小:

$$\min_{a \in A, i \in S, j \in V, k \in V} \sum_{a \in A} \sum_{i \in S} \sum_{j \in V} p_{ik}^a O_{ik}^a \quad (3)$$

约束条件如下:

$$\sum_{j \in N \cup A} p_{ik}^a \leq H \quad \forall i \in S, \forall a \in A \quad (4)$$

$$\sum_{a \in A \cup V} p_{ik}^a = 1 \quad \forall i \in S \quad (5)$$

$$\sum_{k \in V} p_{ik}^a - \sum_{k \in V} p_{ki}^a = 0 \quad \forall i \in S, \forall a \in A, \forall j \in N - S \quad (6)$$

$$\sum_{k \in V - A} p_{ik}^a = h_i \quad \forall i \in S, \forall a \in A \quad (7)$$

$$\sum_{a \in A} h_a = 1 \quad (8)$$

其中,目标函数(3)使网络的总能耗最小。约束条件(4)表示从事件区域内的传感节点到被选作接收者的反应节点间的每一条路径的跳数均小于有限跳数阈值 H 。约束条件(5~7)

表示网络的流量守恒。约束条件(7,8)确保只有一个反应节点被选作事件信息的接收者。

由于 ILP 属于 NP-Hard 问题的子问题,即使我们用 CPLEX^[6] 这样的专业软件也难以对其求解。因此,我们提出了 HBMECT 的一个分布式近似算法的解决方案,如下所述。

4 HBMECT 的分布式近似算法

我们知道,从事件中心到被选中的反应节点间的距离越短,反应节点对事件作出反应的速度就越快。而且,如果所有的反应节点都有相同的作用范围,则事件区域就越可能被最近的反应节点的作用范围所覆盖。即使不同的反应节点拥有不同的作用范围,被选择的反应节点仍然靠近那些事件区域附近的反应节点,这样做将有助于反应节点减少操作的延时。因此,在分布式近似式算法中,离事件区域中心最近的反应节点被选作传感数据的收集者,事件区域内的传感节点则通过地理路由算法 (Geographic Routing) 将数据包发送给被选中的反应节点。

当某个传感节点感应到某个事件时,它通过一跳信息的交换,并采用多边 (Multi-Lateration) 定位技术^[9] 计算出事件源的坐标。然后,传感节点计算出事件源与每个反应节点的距离,并选择距离最近的反应节点作为数据的收集者。

为了满足有限跳数的阈值 H ,我们修改了地理路由算法,使其可以确保被传送的数据包的每一跳长度都大于 D_{sd}/H 。其中, D_{sd} 表示源节点 s 和目标反应节点 d 之间的距离。当节点 i 收到一个数据包时,它首先决定目的节点 d 是否为邻居节点。如果是,则将数据包发送给节点 d , 否则,计算到目的节点的距离 D_{sd} 并保留跳数 H_i 的信息。然后,节点 i 测定在以反应节点 d 为中心,以 $(H_i - 1) * D_{sd}/H$ 为半径的区域内是否有邻居节点集 T 。如果存在,节点 i 将选择满足条件 $D_{id} < D_{id}$ 且 $D_{ij} < D_{ik}, \forall k \in T, k \neq j$ 的邻居节点 j 作为转播节点; 否则选择距离目标节点 d 最近的节点 j 作为转播节点。在此,我们假定传感节点的密度足够大,不需要考虑“空区域”(Void Area)的问题。

5 性能评估

在对 HBMECT 的分布式近似算法的性能进行评估前,先介绍两个考量因素:

- 平均跳数 (Average Hops): 在没有冲突和重传的情况下,平均跳数反映了数据包的传送时间。平均跳数越小,数据传送的延时就越小。

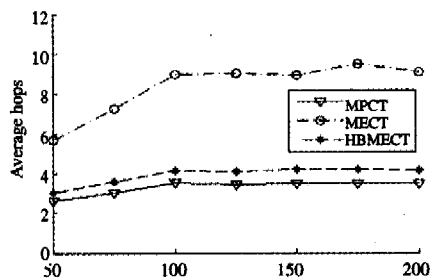
- 每位数据总能耗: 从网络生存时间的角度考虑,网络中每位数据传送的总能耗越少,网络的生存时间就越长。

为了对比 HBMECT 的分布式近似算法,我们引入了两个算法: 最小能量代价树 (MECT) 和最小路径代价树 (MPCT)。在 MECT 中,传感节点试图寻找到某个合适的反应节点, 以便可以构造一条从事件区域中的传感节点到该反应节点的能量消耗最小的路径。这样,事件数据便可以以一种能量有效的方式传送。在 MPCT 中,传感节点试图找到某个合适的反应节点, 以便构造一条从事件区域内的传感节点到该反应节点的最短路径。这两个算法均通过全局网络状态来实现。

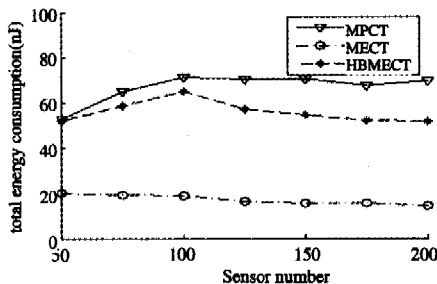
为了评估算法的性能,我们可用 Matlab 来实现^[13] 上述三种算法。在 Matlab 中,我们考虑两种不同场景,并对每一种场景都设计了一个 $100m \times 100m$ 平方的区域,圆形事件区

域的半径为 20m, 圆心坐标为(50, 50)。有四个反应节点随机地分布在场景四个不角落的 10m×10m 区域里。不同的是: 对于第一种场景, 我们假定传感节点数量的变化范围是 [50, 200], 变化的步长为 25; 对于第二种场景, 我们将 150 个传感节点随机地分布在整个区域内。为了测试分布式近似算法, 我们将有限跳数阈值 H 的范围设为 [3, 5]。此外, 对于两种不同的场景, 我们还假设了如下仿真参数: $\tau=50\text{nJ/bit}$, $\kappa=100\text{pJ/bit/m}\alpha$, $\alpha=4$, 传感节点的通信范围为 25m, 并且对每种场景都进行了至少 100 次的仿真。

对于第一种场景, 我们主要研究传感节点的密度 (Sensor Density) 对不同算法的影响。其中, 场景的有限跳数阈值 H 为 4, 仿真结果如图 2 所示。从图 2(a) 中, 我们可以看见 MECT 的平均跳数最大, 当超过 100 个节点时, 它的平均跳数达到了 9 跳。而 MPCT 的平均跳数是最小的, 几乎小于 3 跳。同时, 我们也可以看到, 由于有限跳数阈值为 4, 因此 HBMECT 的平均跳数几乎小 4 跳。而从图 2(b) 中, 我们则可以看到, 对于 HBMECT 和 MPCT 算法, 网络的总能耗在最初是增加的, 当传感节点的数量超过 100 时, HBMECT 的总能耗逐渐下降, MPCT 的总能耗保持稳定, 而 MECT 的总能耗则是平稳地下降, 虽然下降幅度不大。



(a) Sensor Density vs. Average Hops



(b) Sensor Density vs. Total Energy Consumption

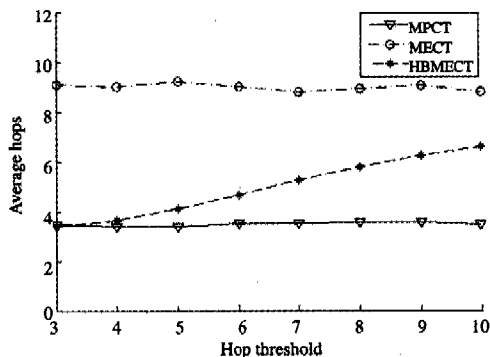
图 2 传感节点密度分析图

对于第二种场景, 我们主要研究有限跳数阈值 H 对分布式近似算法的影响。为了方便地比较分布式近似算法, 我们也相应地列出了相同考量因素对 MPCT 和 MECT 的影响。从图 3 可以看出, 对于 HBMECT, 当 H 增加时, 网络的总能耗下降得较慢。当 H 为 3 时, HBMECT 的总能耗大于 MPCT 的总能耗。这主要是因为不同的算法可以选择不同的反应节点的结果。

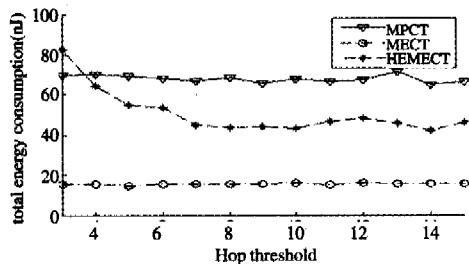
从上面的性能对比可以看出, 在满足实时需求的前提下, HBMECT 可以通过设定有限跳数的阈值 H 来减少网络的总能耗。

结束语 本文通过对单个反应节点选择的特点进行分析, 提出了从有限跳数和能量有效的角度, 利用整数线性规划方法来解决 WSNs 中单个反应节点选择算法的问题, 并给

出了 HBMECT 的分布式近似算法。通过仿真对比, 我们证明了 HBMECT 可以通过设定不同的有限跳数阈值 H 来满足不同应用程序对实时性的要求。同时, 它还能适合于多事件同时发生的情形。



(a) Hop Threshold vs. Average Hops



(b) Hop Threshold vs. Total Energy Consumption

图 3 有限跳数阈值 H 分析图

参考文献

- 1 Akyildiz I F, Kasimoglu I H. Wireless sensor and actor networks, Research challenges. *Ad Hoc Networks* (Elsevier), 2004, 2(4): 351~367
- 2 Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. Wireless sensor networks; a survey. *Computer Networks* (Elsevier) Journal, 2002, 38(4): 393~422
- 3 Melodia T, Pompili D, Gungor V C, Akyildiz I F. A Distributed Coordination Framework for Wireless Sensor and Actor Networks. *MobiHoc'05*, Urbana-Champaign, Illinois, USA, May 2005
- 4 He T, Stankovic J, Lu C, Abdelzaher T. SPEED: A real-time routing protocol for sensor networks. In: *Proceedings of IEEE ICDCS*, Providence, RI, USA, May 2003. 46~55
- 5 Felemban E, Lee C G, Ekici E, Boder R, Vural S. Probabilistic QoS Guarantee in Reliability and Timeliness Domains in Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of IEEE INFOCOM 2005*, Miami, FL, USA, Mar. 2005
- 6 Akkaya K, Younis M. An Energy-Aware QoS Routing Protocol for Wireless Sensor Networks. In: *Proc. of the IEEE Workshop on Mobile and Wireless Networks (MWN 2003)*, Providence, RI, May 2003
- 7 Kim H, Seok Y, Choi N, Choi Y, Kwon T. Optimal Multi-sink Positioning and Energy-efficient Routing in Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings, ICOIN 2005*, Jeju Island, Korea, January 31~February 2, 2005
- 8 CPLEX solver. Available at: <http://www.cplex.com>
- 9 He T, Huang C, Blum B, Stankovic J, Abdelzaher T. Range-Free Localization Schemes for Large Scale Sensor Networks. In: *Proceedings of Mobicom*, 2003
- 10 Li Jinyang, Jannotti J, De Couto D S J, Karger D R, Morris R. A Scalable Location Service for Geographic Ad Hoc Routing. In: *Proc. of ACM MobiCom*, August 2000
- 11 Oyman E I. Multiple Sink Location Problem and Energy Efficiency in Large Scale Wireless Sensor Networks. [doctor paper]. Bogazici University, 2004
- 12 Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2002, 1(4): 660~670
- 13 Matlab. <http://www.mathworks.com>