

## 异构无线传感器网络的转发连通覆盖方法\*

温俊<sup>+</sup>, 蒋杰, 方力, 班冬松, 窦文华

(国防科学技术大学 计算机学院, 湖南 长沙 410073)

### Maintaining Relay-Connectivity and Coverage in Heterogeneous Wireless Sensor Networks

WEN Jun<sup>+</sup>, JIANG Jie, FANG Li, BAN Dong-Song, DOU Wen-Hua

(School of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

+ Corresponding author: E-mail: wenjun@nudt.edu.cn

Wen J, Jiang J, Fang L, Ban DS, Dou WH. Maintaining relay-connectivity and coverage in heterogeneous wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2010,21(9):2304–2319. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3623.htm>

**Abstract:** This paper proposes a relay-connecting coverage problem in heterogeneous wireless sensor networks. The aim is to find a minimum relay-connecting set cover (MRCSC) that satisfies the following: 1) Active nodes in a set cover fully sense the task area. Motivated by triangular lattice placement with asymptotic priority, a rule is designed to restrict abnormal spreading and to form an approximate triangular lattice; 2) Active nodes are relay-connecting, which means any active node connects at least one super node with a given success data forwarding rate. Relay-connecting prevents the interference of nodes that have low success data forwarding rates that are caused by the long path nodes take to the sink and radio channel. Theoretical analysis simulations show that the coverage of MRCSC nearly reaches that of OGCD, but relay-connectivity of active nodes is strongly reinforced with a limited number of additional nodes.

**Key words:** heterogeneous wireless sensor networks; minimum set cover; relay-connectivity

**摘要:** 提出了异构无线传感器网络的最小转发连通覆盖问题,其目标是寻找一个满足以下要求的最小转发连通覆盖集(minimum relay-connecting set cover,简称 MRCSC):1) 活跃节点完全覆盖任务区域.从三角点阵排列可以获得节点数量近似最优的结论出发,给出了节点随机部署策略下的位置点优化选取原则,该原则着重考虑了当出现相邻节点间距离偏离 $\sqrt{3}r_s$ 的情形时,能够限制不规则性的传播,最终构成近似规则的三角点阵排列.2) 所有活跃节点与转发骨干网连通.由于节点到达 sink 的路径可能较长,导致路径的数据成功转发率较低,因而不要求节点与 sink 的连通,而是至少存在一条到达骨干节点、较高数据转发率的路径,因此提出了转发连通验证和增强算法.理论分析和仿真实验表明,最小转发连通覆盖集的覆盖质量与 OGDC 算法接近,但在提高了转发连通率的同时也有效地控制了覆盖集的规模.

**关键词:** 异构无线传感器网络;最小覆盖集;转发连通

**中图法分类号:** TP393      **文献标识码:** A

\* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60603061, 60603064 (国家自然科学基金)

Received 2008-11-28; Accepted 2009-04-13

无线传感器网络正被广泛地研究,它可以应用于多个领域,例如环境保护、生物观测、灾难救援和军事监视等<sup>[1-3]</sup>。由大量廉价、功能受限和易于失效的传感器节点组成的无线传感器网络,随着网络规模的扩大,数据转发的跳步数增加,通信可靠性快速降低,导致大量的数据重传,加速了能量消耗,限制了网络的可扩展性,降低了网络生存期。目前,可以采用的解决方法有:1) 使用数据骡子<sup>[4-6]</sup>。数据骡子可以自主移动,具有足够大的存储空间。当数据骡子在网络中移动时,可以下载、缓存节点上的感知数据。这种方法虽然使得节点收集的数据不再长距离转发,避免了长距离转发时的能量开销,但是存在较大的数据传输延迟。此外,数据骡子的移动控制策略复杂;2) 使用骨干节点<sup>[7,8]</sup>。骨干节点与普通的传感器节点不同,它具有充足的能量、强大的通信和计算能力,但是价格较高,限制了部署的数量。若将有限数量的骨干节点部署在由普通传感器构成的网络中,由骨干节点组成基础通信骨干网,普通节点只需与骨干节点连接就可以有效地将数据汇集到 sink 了,从而增强了网络的扩展性。异构传感器网络中的骨干节点主要功能是组成通信骨干网,负责数据的聚合和转发,传感器节点主要承担感知和转发数据的任务。本文即是针对上述异构无线传感器网络,讨论和研究了其中的覆盖和转发连通问题。

覆盖是网络获取物理环境信息的能力<sup>[9,10]</sup>。为了有效地获取整个任务区域的信息,所有传感器节点应能够覆盖整个任务区域,本文将采用二元感知模型讨论异构传感器网络的覆盖问题。网络连通性是拓扑控制的度量<sup>[11,12]</sup>,是数据高效、可靠转发的基础。在 ad hoc 网络中,通常要求任意两个节点间都存在一条路径。但是,这样的连通性要求对于无线传感器网络是严格的,因为在大多数情况下,无线传感器网络中的节点若能将收集的信息汇集到 sink 或接收 sink 的控制指令以及能够与周围邻居节点交换信息就满足要求了,而任意两节点间的数据交换却比较少,因而不需要任意两节点间都存在一条可靠的路径。在异构网络环境下,骨干节点通过骨干网与 sink 可靠地通信,因而希望每个传感器节点至少存在一条到达其中一个骨干节点的路径。但是,无线通信链路具有不稳定性、时变性和较高的误码率,使得每个链路的数据成功发送率<sup>[1-15]</sup>都不大于 1,即接收节点以概率正确接收数据,而路径的数据成功转发率则是组成路径的各个链路数据成功发送率累积后的结果,当路径的成功转发率小于设定值时则认为路径不可达,因而传感器节点与骨干节点间仅存在一条图连通的路径是不够的,还需要路径的成功转发率大于设定值,即路径是转发连通的。综上所述,异构网络的转发连通性要求每个活跃节点至少存在一条连接任意一个骨干节点的可达路径。

若假设所有节点(传感器节点和骨干节点)活跃时,网络是完全覆盖和转发连通的,本文考虑的是异构传感器网络的最小转发连通覆盖集问题,目标是在保持网络覆盖和转发连通时让更多的节点进入低能耗的睡眠状态,以提高网络的能量效率。本文的主要研究工作有:1) 提出了异构传感器网络的最小转发连通覆盖问题;2) 从三角点阵排列可以获得节点数量渐近最少的理论结果出发,讨论了在随机部署时选取覆盖节点的原则以及判定覆盖集是否转发连通的依据;3) 分别给出了覆盖节点选取、转发连通验证和增强的分布式近似算法。

本文第 1 节是异构无线传感器网络、连通覆盖等问题的研究现状。第 2 节给出网络模型和问题描述。第 3 节讨论求解异构传感器网络的最小转发连通覆盖集问题的理论依据。第 4 节详细描述求解最小转发连通覆盖集问题的分布式近似算法,并且讨论了算法性质。第 5 节是仿真实验。最后是全文的总结。

## 1 相关工作

由于骨干节点资源充足、功能强大,因而被用来提高无线传感器网络的性能。Yarvis<sup>[16]</sup>从能量异构性和通信异构性两个角度分析了对网络生存期和数据传输率的影响,并且指出合理的部署方式使得数据传输率提高 3 倍,而网络生存期达到 5 倍。由于节点能力不同,两种节点的价格也不同。Mhatre<sup>[17]</sup>讨论了在保证网络生存期、网络连通性和覆盖质量时,如何确定两种不同类型节点的最优部署密度和初始能量的问题,以达到最小化开销的目的,而文献[18]则以 LEACH 分簇协议为代表,比较了单跳和多跳同构以及异构网络的费用开销效率。Lee<sup>[19]</sup>通过理论和模拟的方法研究了异构网络中覆盖质量随着节点失效而降低的问题,并针对单跳通信模型和多跳通信模型分别给出了详细的讨论。超节点具有较强的无线通信能力,可以构造通信骨干网,而普通节点与超节点相连,形成叠加的网络结构。在此网络模型下,文献[20]讨论了异构网络的点目标覆盖问题,文献[21]则考虑了具有容错性能的  $k$  anycast 的拓扑控制问题,目标是通过优化普通节点的发送功率,使得每个节点至少存在  $k$  条到达

骨干网络的不相交路径.Li<sup>[22]</sup>讨论了通信半径异构下的拓扑控制问题,描述了两种局部化的拓扑控制算法:DRNG 和 DLMST,两种算法都可确保网络的连通性.Su<sup>[23]</sup>考虑了节点感知半径的异构性,讨论和计算了确保网络覆盖度的条件,提出了分布式的优化算法.Han<sup>[24]</sup>描述了在通信半径异构的网络中如何部署中继节点以获得较高的网络连通性,文中把这个问题分为两种情况讨论:完全容错的中继节点放置和部分容错的中继节点放置问题.

连通覆盖是无线传感器网络研究领域的热点问题,研究人员从节点部署和节点调度两个角度讨论了无线传感器网络的连通覆盖问题.Bai<sup>[25]</sup>从理论上给出了对于任意的  $r_c/r_s$  比值下,网络完全覆盖时 1-连通和 2-连通的渐近和近似最优的部署方法,还讨论了几种常见的规则部署策略(如正六边形、正正方形、菱形和三角点阵)下的节点效率,而 Bai 在文献[26]里则提出了钻石形的部署策略,使得网络保持 4-连通覆盖.Zhang<sup>[27]</sup>首先证明了当  $r_c/r_s$  的比值至少为 2 时,任务区域被覆盖则意味着也是连通的.以此结论为依据,提出了优化的地理密度控制算法(optimal geographical density control,简称 OGDC).Gupta<sup>[28]</sup>从能量高效查询执行的角度讨论了无线传感器网络的连通覆盖问题(connected sensor cover,简称 CSC),构造最小连通覆盖集是一个 NP-难的问题.为此,分别设计了集中式和分布式的贪婪算法.Jiang<sup>[29]</sup>为解决连通覆盖集问题,设计了一种基于目标区域 Voronoi 划分的集中式近似算法(centralized voronoi tessellation,简称 CVT),当节点通信半径大于等于 2 倍的感知半径时,CVT 算法构造的节点集是连通的;当节点通信半径小于 2 倍感知半径时,设计了一种基于最小生成树的连通算法.本文则是解决异构传感器网络的转发连通覆盖问题.

## 2 问题与假设

在任务区域  $D$  内随机部署了  $N$  个传感器节点和  $M$  个骨干节点.传感器节点携带能量少、计算能力和存储空间有限,主要承担感知、报告和转发数据的任务,节点感知半径为  $r_s$ ,通信半径为  $r_c$ , $D_i$  为节点  $a_i$  的感知区域.骨干节点也称为数据转发节点,数据转发节点的能量不受限制,具有较大的存储空间、较强的计算能力和通信能力,主要承担数据转发任务.由于通信能力强,转发节点间构成了一个可靠的转发骨干网,而传感器节点则通过多跳路径与转发骨干网相连,如图 1 所示.由于传感器节点通信能力有限以及无线信道的不稳定、时变和高误码率的特性,使得传感器节点间链路的数据成功发送概率小于 1.当数据被逐跳转发时,随着路径长度的增加,数据成功转发概率下降,当累积成功转发概率小于给定值  $\alpha$  时,则认为路径不可达.

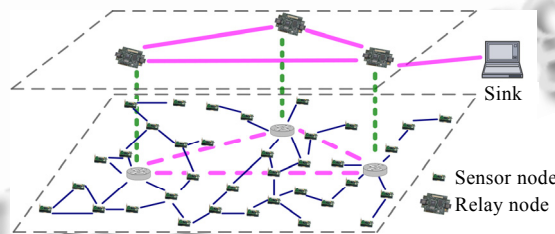


Fig.1 Heterogeneous wireless sensor networks

图 1 异构的无线传感器网络

图  $G(V,E)$  中,  $V=A \cup S$ , 其中,  $A=\{a_1, a_2, \dots, a_N\}$  为传感器节点集合,  $S=\{s_1, s_2, \dots, s_M\}$  为转发节点集合.  $E$  为传感器节点间的链路和传感器节点与转发节点间链路的集合, 由于转发节点之间的通信总是可靠的, 因而不考虑它们间的链路.

**定义 1(覆盖).** 任务区域内任意一点至少被一个活跃节点感知.

**定义 2(图连通).** 给定图  $G(V,E)$ , 若对于  $V$  中的任意两个顶点, 至少存在一条连接它们的路径, 则称图  $G(V,E)$  是连通的.

当两个传感器节点间的距离不大于  $r_c$  时则存在一条通信链路, 即对应于图中的一条边,  $b(e_{ij})$  为边  $e_{ij}$  的成功发送概率, 用于度量链路的通信质量, 简记为  $b_{ij}$ , 矩阵  $[b_{ij}]$  则为图  $G(V,E)$  中所有链路的数据成功发送概率, 其中



























