

面向射频能量捕获传感网的高吞吐量负载均衡的 节点接入方案

池凯凯 魏欣晨 林一民

(浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310023)

摘要 由于传统无线传感器网络更换传感器电池较为麻烦或不具可行性,其实际应用范围受到很大的限制。考虑具有射频能量捕获能力的无线传感器网络,已知能量源、节点、基站(即汇聚节点)的部署位置,研究如何安排各个节点的接入基站,在满足基站负载平衡约束的情况下最大化整个网络节点的总吞吐量。首先,建立能量捕获传感网的能量捕获模型和信息传输模型,并将该节点接入问题建模为 0-1 整数规划问题;然后,针对该问题提出一种复杂度较低的算法和一种复杂度略高的贪婪式算法。仿真结果表明,与低复杂度算法相比,贪婪式算法所得到的节点接入方案具有更高的网络总吞吐量,但其复杂度略高,因此可用于节点数目较少的场景,而低复杂度算法可用于节点数目较多的场景。

关键词 无线传感器网络,射频能量捕获,节点接入,吞吐量,负载均衡

中图分类号 TN911.2 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.08.021

High-throughput and Load-balanced Node Access Scheme for RF-energy Harvesting Wireless Sensor Networks

CHI Kai-kai WEI Xin-chen LIN Yi-min

(School of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract For the traditional wireless sensor networks (WSNs), their practical applications are greatly restricted by the inconvenient or even impossible battery replacement. This paper considered the RF-energy harvesting WSNs where the positions of energy sources, nodes and base stations (i. e., sinks) are given and studied how to arrange the access base stations for each node, aiming to maximize the total throughput of the entire network nodes while satisfying the load balancing constraints of all base stations. Firstly, the energy harvesting model and information transmission model were built. Then, this node access problem was modeled as a 0-1 integer programming problem. Next, a low-complexity algorithm and a greedy algorithm were proposed for solving this problem. Simulation results demonstrate that the node access scheme obtained by the greedy scheme is able to achieve higher total network throughput compared to the low-complexity scheme. Due to its relative high complexity, the greedy scheme can be used in scenarios where the number of nodes is not very large, whereas the low-complexity scheme can be used in scenarios with a large number of nodes.

Keywords Wireless sensor networks, RF energy harvesting, Node access, Throughput, Load balance

1 引言

在传统的无线传感器网络中(Wireless Sensor Networks, WSNs),传感设备通过更换电池的方式来延长使用寿命。但在一些特殊的条件下,如有毒环境、传感节点被安装在人体内部场景中,更换电池往往难以实现。因此,传感器节点能量受限成为实际应用中的重要问题。

近年来,随着硬件设备技术的发展,具有捕获环境能量功能的传感器节点已经在实际生活中得到了应用。当 WSNs 中的节点能够捕获某种环境中的能量时,理论上网络将具有无限长的生命周期。这种能源可以是太阳能、风能、振动能、电磁波能等^[1]。

特别地,射频能源是目前最有应用前景的能源之一。射频信号具有稳定、可控的特点,不会随着时间、季节和地理位置的变化而显著变换^[2]。实验表明,当 Powercast 射频发射机以 915 MHz 的频率工作时,在距离发射机 0.6 m 的射频信号中可以捕获 3.5 mW 的无线功率,距离发射机 11 m 的射频信号中可以捕获 1 μ W 的无线功率^[3]。同样,作为无线能量传输技术,电感耦合和磁共振耦合技术都是具有高功率强度和 高转换效率的近场无线传输,但是其功率强度随着距离倒数的立方衰减^[4],并且在使用时需要 对发射机和接收机线圈进行校准和定位。因此,它们并不适合应用于移动和远程充电。而射频能量传输技术则没有这样的限制,射频传输被认为是一个远场传输技术,它适用于节点数量大、分布广的场景中。

到稿日期:2017-06-30 返修日期:2017-09-12 本文受国家自然科学基金(61472367,61432015)资助。

池凯凯(1980-),男,博士,教授,CCF 会员,主要研究方向为无线网络,E-mail:kkchi@zjut.edu.cn(通信作者);魏欣晨(1992-),女,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络;林一民(1992-),男,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络。

本文考虑捕获射频能量的无线传感器网络(RF-Energy Harvesting Wireless Sensor Networks, RF-EHWSNs),该网络的传感器节点能够将射频能量转化成电能为节点供电。需要说明的是,由于节点的射频能量捕获功率较低,通常无法执行复杂的网络协议,因此基于单跳(节点直接与周边的某个基站即汇聚节点进行数据通信)的感知数据收集架构具有较强的可行性。而且节点的发送功率较低,不能与远距离的基站进行有效通信,因此对于节点没有部署在小区域的 RF-EHWSNs,往往需要部署多个基站。

在 RF-EHWSNs 中,节点的能量捕获速率取决于能量源(Energy Transmitters, ETs)的放置。目前,ETs 的位置放置问题已有一些相关研究成果^[5-7]。He 等^[5]考虑到使用最少的 ETs,以确保网络中任意一个静态传感器节点能接受足够的能量来维持操作。Fu 等^[6]考虑了另外一种场景,即 ETs 在场景内移动,研究了 ETs 的停留位置和相应的停留时间,使得网络中所有的传感器节点充电的总时延最小化。Li 等^[7]提出了一种新的射频能量充电模型,并提出了两种有效的 ETs 布置方法,满足每个传感器节点的捕获功率不小于捕获功率需求,同时使得 ETs 的个数最小化。

在 RF-EHWSNs 中,节点上行链路的信道质量一方面取决于所部署基站的个数及其部署位置,另一方面取决于节点的接入基站选取。关于 RF-EHWSNs 中的多基站部署问题,目前为止仅开展了少量的研究工作。Bi 等^[8]考虑了 RF-EHWSNs 中的能量源与基站部署问题,在满足能量捕获和通信性能需求的前提下,最小化网络中部署的接入点和能量源个数,即最小化网络硬件成本。具体来说,针对所有节点有相同的数据传输速率需求的 RF-EHWSNs,以最小化基站和能量源数目为目标,研究了基站和能量源的联合部署,满足每个节点的平均能量捕获功率比所需数据发送功率至少高出一个预定的阈值的约束条件。

关于 RF-EHWSNs 中节点的接入基站选取问题,目前为止几乎没有相关的研究。已有的文献中,节点一般是直接接入到最近(信号传输质量最好)的基站,没有考虑不同基站的负载均衡性。不难理解,当某基站的服务节点数较大时,节点的数据传输可能会出现拥塞、延迟、信息丢失等情况,这对于服务质量、数据传输时延等指标非常不利。因此,简单地将每个节点接入到其最近的基站可能会导致较差的网络性能。鉴于此,本文研究以下问题:在给定的网络中能量源、节点、基站数目和位置的情况下,每个基站有最大服务节点个数的限制,最优化各个节点的接入基站选取,从而最大化所有节点的总吞吐量。该问题中的基站最大服务节点数的限制保证了基站不会服务较多的节点,一定程度上达到了负载均衡的效果。

本文首先建立能量捕获感知网络中能量源的能量捕获模型和基站的信息传输模型,根据模型分析,将该节点接入问题建模为 0-1 整数规划问题;然后提出一种复杂度较低的算法和一种复杂度略高的贪婪式算法。

2 系统模型

本节将介绍本文考虑的射频能量捕获传感网络模型。

2.1 网络模型

本文考虑以下射频能量捕获的无线传感网络场景,如图 1 所示,网络由基站、能量源和传感节点组成,其个数分别为 K, M 和 N 。第 i 个节点与第 j 个基站的距离为 $d_{i,j}^B$,而第 i 个节点与第 j 个能量源的距离为 $d_{i,j}^E$ 。

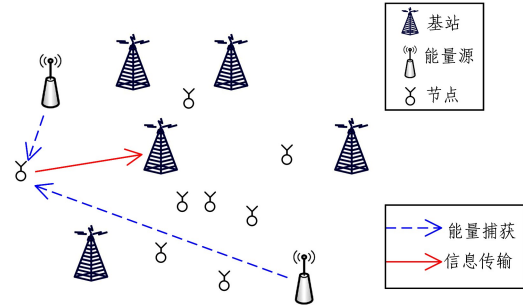


图 1 射频能量捕获传感网示意图

Fig. 1 Illustration of RF-energy harvesting WSNs

该网络中,能量源在下行链路发送射频能量来为网络中的节点供电,传感节点在上行链路向某个依附的基站以单跳的方式直接传输数据。节点与基站之间以多跳方式传递数据的架构需要采用路由协议和其他高层协议,其消耗的中继节点上的资源(如能量、存储、计算等方面的资源)不在本文的考虑范围内。所有节点没有其他嵌入式电源,只能通过捕获射频能量源发送的能量来发送无线信息。能量源的射频能量发送频段与节点的数据发送所使用的频段不同,即在基站端,能量源发送的能量信号不会对节点向基站发送的数据信号的接收造成干扰。另外,传感节点的数据发送采用码分复用模式,节点间的信号干扰忽略不计。

上行、下行链路的信道增益分别用一个复数随机变量 $\tilde{g}_{i,j}$ 和 $\tilde{h}_{i,j}$ 表示,则信道功率增益分别表示为 $g_{i,j} = |\tilde{g}_{i,j}|^2$, $h_{i,j} = |\tilde{h}_{i,j}|^2$ 。

当一个能量源以发送功率 P_t 发送电磁波时,与能量源距离为 d 的节点处的能量捕获功率 P_h 可以通过对 Friis 自由空间方程进行合理修改而得到,具体表示如下^[5]:

$$P_h = \eta \frac{G_t G_r}{L_p} \left(\frac{\lambda}{4\pi(d+\epsilon)} \right)^2 P_t \quad (1)$$

其中, η 是整流效率, G_t 是源天线增益, G_r 是接收天线增益, L_p 是极化损耗, λ 是波长。对于短距离传输, Friis 自由空间方程中的 d 调整为 $d+\epsilon$, ϵ 是一个固定的小参数,以弥补 Friis 自由空间方程在 $d=0$ 时接收功率为无穷大的不足。

由式(1)可知,无线信道的功率增益为:

$$a = \eta \frac{G_t G_r}{L_p} \left(\frac{\lambda}{4\pi(d+\epsilon)} \right)^2 \quad (2)$$

2.2 能量捕获模型

$p_{i,j}^h$ 表示节点 i 从能量源 j 的射频信号中捕获的功率,则:

$$p_{i,j}^h = h_{i,j} P_j^t \quad (3)$$

其中, P_j^t 表示第 j 个能量源的发射功率,根据式(2)可知下行链路功率增益 $h_{i,j}$ 的值为:

$$h_{i,j} = \eta \frac{G_t G_r}{L_p} \left(\frac{\lambda}{4\pi(d_{i,j}^E + \epsilon)} \right)^2 \quad (4)$$

在有 K 个能量源的情况下,每个传感器节点接收到的功

率等于从每个能量源捕获的功率之和。因此,每个传感器节点 i 从 K 个能量源捕获的总功率 P_i^h 可表示为:

$$P_i^h = \sum_{j=1}^M p_{i,j}^h = \zeta_i \sum_{j=1}^M \eta \frac{G_t G_r}{L_p} \left(\frac{\lambda}{4\pi(d_{i,j}^E + \epsilon)} \right)^2 P_j^t \quad (5)$$

其中, ζ_i 表示节点 i 捕获能量的效率,与文献[10]相同,本文假设 $\zeta_1 = \dots = \zeta_N = \zeta$ 。

2.3 信息传输模型

假设在任一节点上,所捕获的能量的一定比例用来进行上行链路的信息传输^[9], α_i 表示节点 i 的比例值。因此,节点 i 的发送功率为 $\alpha_i P_i^h$,而在基站 j 处的信号接收功率为 $g_{i,j} \alpha_i P_i^h$,其中,根据式(2)可知上行链路功率增益 $g_{i,j}$ 的值如下:

$$g_{i,j} = \eta \frac{G_t G_r}{L_p} \left(\frac{\lambda}{4\pi(d_{i,j}^B + \epsilon)} \right)^2 \quad (6)$$

因此,对于节点 i 接入到基站 j 的无线链路,数据传输速率可表示为:

$$R_{i,j} = W \log_2 \left(1 + \frac{g_{i,j} \alpha_i P_i^h}{\sigma^2} \right) \quad (7)$$

其中, σ^2 表示高斯白噪声的功率。

3 节点最优接入问题及建模

变量 $y_{i,j}$ ($i=1,2,\dots,N, j=1,2,\dots,K$) 用于刻画节点 i 是否接入到基站 j , $y_{i,j}$ 的取值为 0 或 1, $y_{i,j}$ 取 0 意味着节点 i 不接入基站 j , $y_{i,j}$ 取 1 意味着节点 i 接入基站 j 。因此,本文所研究的节点接入问题就是要确定这组变量的值。

由于任意一个节点 i 只接入到一个基站,因此 $y_{i,j}$ 需要满足以下节点接入约束条件:

$$\sum_{j=1}^K y_{i,j} = 1, i=1,2,\dots,N \quad (8)$$

则第 i 个用户的信息传输速率 R_i 可表示为:

$$R_i = \sum_{j=1}^K y_{i,j} \cdot R_{i,j} \quad (9)$$

特别地,根据约束(8)可知, $y_{i,1}, y_{i,2}, \dots, y_{i,K}$ 中有且仅有一个变量取值为 1。

基于式(9),可知网络的总吞吐量为:

$$R = \sum_{i=1}^N R_i \quad (10)$$

在实际应用场景中,若基站的服务数量过大,用户信息可能会出现较大延迟、丢失等情况,这对服务质量而言是不利的。本文考虑单个基站的节点接入数量必须小于门限值 T (T 为整数值)。因此,对于任意一个基站 j ,其对应的变量 $y_{i,j}$ ($i=1,2,\dots,N$) 还需要满足以下负载均衡约束条件:

$$\sum_{i=1}^N y_{i,j} \leq T, \forall j=1,2,\dots,K \quad (11)$$

需要说明的是,在实际应用中,所面对的节点接入问题必须满足 $KT \geq N$,否则不存在可行的接入方案(即满足约束(11)的方案)。

基于以上分析,将所考虑的节点接入问题建模为优化问题,来研究节点的最优接入,从而既达到较好的基站负载均衡,又能最大化节点的总吞吐量。该优化问题的数学描述如下:

最大化: R

变量: $y_{i,j}, i=1,2,\dots,N; j=1,2,\dots,K$

约束条件:

$$y_{i,j} \in \{0,1\}, \forall i=1,2,\dots,N, \forall j=1,2,\dots,K$$

$$\sum_{j=1}^K y_{i,j} = 1, \forall i=1,2,\dots,N$$

$$\sum_{i=1}^N y_{i,j} \leq T, \forall j=1,2,\dots,K$$

称满足节点接入约束条件和负载均衡约束条件的节点接入方案为可行节点接入方案。在所有的可行节点接入方案中,称节点总吞吐量最大的节点接入方案为最优节点接入方案。

该最优节点接入问题是一个 0-1 整数规划问题,下文将提出算法来求解该问题。

4 接入基站选取算法

本节提出一种复杂度较低的接入基站选取算法和一种复杂度略高的贪婪式接入基站选取算法。

4.1 复杂度较低的接入基站选取算法

首先,将每个节点接入距离其最近的基站中。然后对基站进行编号,并对基站逐个进行如下操作:若该基站接入节点的个数小于或等于负载上限值 T ,则不对其进行任何操作;否则反复从当前基站所服务的节点中随机选择一个节点并将该节点切换到未饱和的距离该节点最近的基站,直至该基站的接入节点数目等于 T 。

该算法的第一步是使每个节点达到其吞吐量上限,因为它接入到距离最近的基站。但由于有些基站的接入节点数可能超过门限值 T ,因此在后续操作中将多余的节点切换到其他未饱和的基站中的最近的基站,以尽可能减小吞吐量的下降量。

下面对该算法的计算复杂度进行简单分析。计算每个节点到每个基站的距离的计算复杂度为 $O(NK)$;将每个节点连接到距离最近的基站的计算复杂度为 $O(NK)$;针对接入节点数目超额的基站,对超额的节点进行切换,所需计算复杂度为 $O(N)$ 。综上,该算法的计算复杂度为 $O(NK)$ 。

4.2 贪婪式接入基站选取算法

本文节点接入方法分为两个阶段:1)对每个节点进行初始基站接入选取;2)迭代执行基站选取改善(Enhancement of Base Station Selection, EBSS)。

1)对每个节点进行初始基站接入选取的操作。

在已知节点数目 N ,能量源数目 M 和基站数目 K 的情况下,对每个节点进行初始基站选取(即为每个节点安排合适的基站)的操作如下:

首先,计算每个节点与距离它最近的基站之间的距离,并将所有节点按照该距离从小到大排序。接着,依次确定排序后的节点的接入基站,具体如下。计算上述节点排序中第 i 位的节点 ($i=1,2,\dots,N$) 与所有基站 j ($j=1,2,\dots,K$) 之间的信道功率增益 $g_{i,j}$,并将 K 个基站按照信道功率增益 $g_{i,j}$ 从大到小的顺序排序,用 B_j 表示在该基站排序中第 j 位的基站。然后,从 $j=1$ 开始,检查基站 B_j ,如果基站 B_j 当前接入节点数小于 T (基站服务数量门限值),则节点 i 接入到基站 B_j ,节点 i 基站的选取操作结束;否则,令 $j \leftarrow j+1$,继续检查基站 B_j 。

初始基站接入方案的伪代码如算法 1 所示。

算法 1 初始基站接入选取算法(阶段 1)

Input: 具体场景的节点数目 N , 能量源数目 M , 基站数目 K 及位置

Output: 各个节点所接入的基站及当前状态下节点的总吞吐量 R_i ($i=1, 2, \dots, N$)

Main procedures

1. 计算所有节点与其最近基站的距离, 并将所有节点按照该距离从小到大排序, 并依次标记为节点 1, 节点 2, \dots , 节点 N 。
2. for $i=1$ to N do //为节点 i 确定接入的基站
3. 对于 $j=1, 2, \dots, K$, 计算节点 i 到基站 j 的上行链路增益, 并对所有基站根据对应的上行链路增益值从小到大排序, 用 B_j 表示当前基站排序中排第 j 位的基站。
4. for $j=1$ to K do //依次确认排序的基站
5. 如果基站 B_j 的当前接入节点数小于 T , 即节点 i 接入到基站 B_j , 且跳出该循环。
6. end for
7. end for
8. 计算此接入方案的节点 i 的吞吐量 R_i , $i=1, 2, \dots, N$ 。

下面简单说明该阶段的设计思想。根据前面的信息传输模型可知, 随着传输距离的增加, 吞吐量急剧下降。因此, 距离基站较近的节点, 尽量让其就近接入, 而不要接入到其他较远的基站, 从而有利于达到较高的网络总吞吐量。而距离基站较远的节点, 即使让其接入最近的基站也只能达到较低的吞吐量。基于该分析, 第一阶段为不同的节点给予不同的优先级, 距基站越近的节点具有越高的优先级。相比于低优先级的节点, 高优先级的节点较早地获得接入机会, 在所有当前尚未饱和的基站中选取最近的基站来接入。此外, 不难知道, 该阶段所得到的接入基站选取方案中, 对于任一节点 U_i , 比接入基站更近的所有基站都是饱和的。

2) EBSS 操作

EBSS 操作的主要思想如下: 对于当前的基站接入方案, 根据节点吞吐量从小到大的顺序对节点排序, 并依次检查第 i 个节点 ($i=1, 2, \dots, N$) 是否能够通过接入距其更近的基站来提高节点 i 的吞吐量, 并将该基站的某个已接入节点 j 切换到其他基站(节点 j 被切换后的吞吐量必然下降)来提高总吞吐量。如果找到了某个节点 i , 通过上述基站的改善提高了网络吞吐量, 则本轮基站改善结束; 如果对于所有 N 个节点都不能通过变换其接入基站来改善总吞吐量, 则 EBSS 操作结束。迭代执行上述操作, 直到节点接入方案不能再被改善为止。

EBSS 操作具体如下:

步骤 1 对于当前的基站接入方案, 计算当前各个节点的吞吐量 R_i , 且令 $R_i^* = \sum_{i=1}^N R_i$ 。

步骤 2 对所有节点按照其吞吐量 R_i 从小到大排序, 用 U_i 表示当前排序中排第 i 位的节点, 初始化 $i=0$ 。

步骤 3 令 $i \leftarrow i+1$ 。如果 $i=N+1$, 则 EBSS 操作结束; 否则执行步骤 4。

步骤 4 对候选待改善用户 U_i ($i=1, 2, \dots, N$) 进行单节点改善尝试操作(下面将详细描述该操作)。如果该操作找出了用户 U_i 的某个接入基站改进方式并进行了改进, 则执行步骤 1; 否则, 执行步骤 3。

对于节点 U_i , 上述 EBSS 操作中的单节点改善尝试(Sin-

gle Node's Enhancement Check, SNEC)操作具体如下:

步骤 1 找出离节点 U_i 最近的基站, 用 B 表示。如果基站 B 就是节点 U_i 当前所依附的基站, 那么 SNEC 结束。

步骤 2 如果基站 B 不是节点 U_i 当前所依附的基站(基站 B 必定处于饱和状态), 计算节点 U_i 依附于基站 B 的新传输速率。

步骤 3 对该基站 B 当前所依附的其他所有节点按照其吞吐量从大到小排序, 用 U_j' 表示排第 j 位的节点。初始化 $j=0$ 。

步骤 4 令 $j \leftarrow j+1$ 。如果 $j=K+1$, 则 SNEC 操作结束(意味着未找到改善方式)。

步骤 5 对于节点 U_j' , 尝试将其连接到距离其最近的未饱和基站, 并计算节点 U_j' 新的传输速率。

步骤 6 计算节点 U_i 和 U_j' 在新的接入方案中的传输速率之和。如果新的传输速率之和小于或等于原有接入方案的速率之和, 则执行步骤 4; 否则, 更新节点的接入方案(即将节点 U_i 切换到距离其最近的基站 B , 节点 U_j' 切换到距离其最近的未饱和基站), 并且 SNEC 操作结束。

基于上文第一阶段和第二阶段的描述, 贪婪式节点接入算法操作的伪代码如算法 2 所示。

算法 2 基站选取改善(阶段 2)

Input: 当前 N 个节点的接入方案

Output: 改善后的接入方案及网络优化总吞吐量 R_i^*

1. 计算所输入的网络, 所有用户当前吞吐量 R_i , 且 $R_i^* = \sum_{i=1}^N R_i$;
2. while(TRUE) //找出一个节点来进行一次贪婪改进;
3. 对所有节点按照其吞吐量从小到大排序, 用 U_i 表示排在第 i 位的节点。
4. for $i=1$ to N do //对候选待改善用户依次进行检验, 直到找出一个节点来进行改善
5. 找出距离节点 U_i 最近的基站, 用 B 表示;
6. if(基站 B 就是节点 U_i 当前所依附的基站)
7. continue; //即跳到第 4 行
8. else
9. {
10. 对该基站 B 当前所依附的节点按其吞吐量从大到小排序, 用 U_j' 表示排在第 j 位的节点;
11. 计算节点 U_i 依附于基站 B 的新传输速率;
12. for $j=1$ to T do
13. 将 U_j' 尝试连接到距离其最近的未饱和基站 B' , 并计算其新的传输速率;
14. if(节点 U_i 与 U_j' 新速率之和大于它们的原速率之和)
15. 跳至第 21 行执行接入优化;
16. end if
17. end for
18. }
19. end for
20. return //没有找到任何可改善的接入节点
21. 将节点 U_i 接入到 B , 将 U_j' 连接到基站 B' ;
22. end while

下面对该算法的计算复杂度进行简单分析。在第一阶段, 对于每一个节点和每一个基站, 它们的距离的计算复杂度为 $O(NK)$ 。对所有节点排序的计算复杂度取决于所采用的排序算法, 一些经典排序算法(如冒泡排序法)的计算复杂度

为 $O(N^2)$ 。对于每个节点,进行基站排序的典型计算复杂度为 $O(K^2)$,然后逐个检查基站以接入未饱和的基站的计算复杂度为 $O(K)$ 。由于通常 $N > K$,因此第一阶段的复杂度为 $O(N^2)$ 。在第二阶段的每一轮迭代中:对节点排序的计算复杂度为 $O(N^2)$;对于每个节点,检查是否可以对其切换以提高总吞吐量的计算复杂度为 $O(T^2)$,则找出一个可切换节点的计算复杂度为 $O(NT^2)$ 。因此,第二阶段的复杂度为 $O(LN^2 + LNT^2)$,其中 L 为迭代的次数。综上,该算法的计算复杂度为 $O(LN^2 + LNT^2)$ 。

5 实验仿真

考虑到目前尚没有关于 RF-EHWSNs 中节点的接入基站选取方面的研究工作(已有的文献中,节点一般是直接接入到信号传输质量最好的基站),更没有考虑到负载均衡的节点接入方案,本文仅对所提的两种方案进行性能评估和比较。这两种方案将为后续设计的更优方案提供对比。

关于能量捕获模型(即式(2))的相关参数取值请参见文献[5-6]等,具体如下: $\eta=0.3, G_s=8\text{ dB}, G_r=2\text{ dB}, L_p=3\text{ dB}, \lambda=0.33\text{ m}, \epsilon=0.2316\text{ m}$ 。能量源的发送功率 $P_t=1\text{ W}$ 。关于信息传输模型(即式(6)和式(7))的相关参数取值请参见文献[9]等,具体如下: $W=1\text{ MHz}, \alpha=0.8$, 高斯白噪声谱密度为 10^{-7} W/Hz 。

仿真场景是一个 $10 \times 10\text{ m}^2$ 的区域,有 N 个节点、 K 个基站和 M 个能量源,基站的接入节点的上限值 T 为 10。

图 2 给出了 4 个能量源、8 个基站以及不同节点数目的贪婪式接入方案和低复杂度接入方案的平均吞吐量比较。仿真场景中,4 个能量源均匀地分布在 $10 \times 10\text{ m}^2$ 的区域内,即它们的坐标分别为 $(2.5, 2.5), (7.5, 2.5), (7.5, 7.5)$ 和 $(2.5, 7.5)$,以使网络节点的能量捕获速率相对均匀,而基站和节点位置均为随机部署。

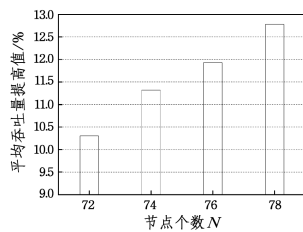


图 2 不同节点个数下的平均吞吐量提高情况

Fig. 2 Average throughput improvement under different numbers of nodes

从图 2 中可以看出,与低复杂度方案相比,贪婪式节点接入方案得到的网络总吞吐量较大。随着节点个数 N 的增加,吞吐量提高的百分比也逐渐增加。例如: $N=72$ 时,贪婪式节点接入方案比低复杂度方案提高 10.30%; $N=78$ 时,贪婪式节点接入方案比低复杂度方案提高 12.78%。这是由于当节点个数 N 逐渐接近基站所能接入的总节点个数(即 $K \times T=80$)时,对于低复杂度方案,在将所有节点接入到最近基站后,有相对较多的超负荷基站,即有较多的节点需要进行切换,而节点的切换可能导致较高的吞吐量下降;对于贪婪式方案,第一阶段的节点接入既不会导致基站超负荷,也可使节点尽可能接入距离其较近的基站;而第二阶段又反复改

善节点的接入,因此即使节点数目较多时节点的平均吞吐量也较高。基站和能量源个数为其他值时所得到的仿真数据也体现了该趋势。

图 3 给出了能量源个数 $M=4$ 、节点个数 $N=75$ 以及不同基站数目下的贪婪式接入方案和低复杂度接入方案的平均吞吐量比较。同样地,能量源均匀地分布在 $10 \times 10\text{ m}^2$ 的区域内。由于基站的成本较高,在实际场景中,一般基站数目应尽可能地少,即使基站所能接入的节点总数超过实际节点数目,但超出的个数应尽可能小。仿真中,对于不同基站数目的情况,基站所能容纳的总节点个数($K \times T$)都取相同值 80,即当 $K=4$ 时 $T=20$,当 $K=10$ 时 $T=8$ 。

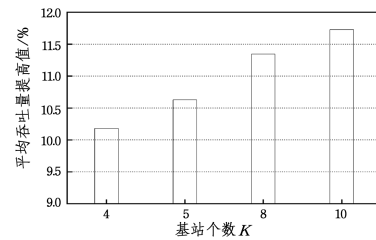


图 3 不同基站个数下的平均吞吐量提高

Fig. 3 Average throughput improvement under different numbers of base stations

图 3 表明,随着基站个数的不断增加,贪婪式方案的吞吐量的提高也逐渐增加。例如:当 $K=4$ 时,提高百分比为 10.18%;而当 $K=10$ 时,提高百分比为 11.73%。这是因为当基站个数较少且每个基站所能接入的节点个数较多时,大部分节点能够接入到距离其最近的基站。但当区域中的基站个数较多但每个基站所能接入的节点个数较少时,有较多的节点不能够接入其最近基站,低复杂度方案对这些节点仅依据简单规则进行了基站切换,而贪婪式方案对节点的接入切换进行了反复优化。能量源和节点个数为其他值时所得到的仿真数据也体现了该趋势。

图 4 给出了能量源个数 $M=4$ 、基站个数 $K=8$ 、节点个数 $N=75$ 以及不同 T 值下的贪婪式接入方案和低复杂度接入方案的平均吞吐量。从图 4 中可以看出,随着 T 值的增加,贪婪式方案相比于低复杂度方案所达到的吞吐量提高程度逐渐减小。这是由于当 T 值越大时,每个基站可以接入更多的节点,从而有更多的节点能接入距离其各自最近的基站,因此可供贪婪式方案进行节点接入改善的空间也就越小。

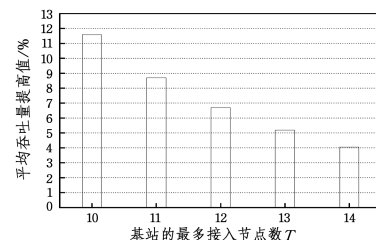


图 4 不同 T 值下的平均吞吐量提高

Fig. 4 Average throughput improvement under different values of T

结束语 对于具有射频能量捕获能力的无线传感器网络的节点接入问题,本文研究如何安排各个节点的接入基站,在满足基站负载均衡约束的情况下最大化整个网络节点的总吞吐量,进而提出一种复杂度较低的算法和复杂度略高的贪婪

式算法。仿真结果表明,与低复杂度算法相比,使用贪婪式算法所得到的节点接入方案能达到更高的网络总吞吐量,但其复杂度略高,因此可用于节点数目较少的场景,而低复杂度算法可用于节点数目较多的场景。

参考文献

- [1] OZEL, TUTUNCUOGLU K, YANG J. Transmission with Energy Harvesting Nodes in Fading Wireless Channels: Optimal Policies[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(8): 1732-1743.
- [2] LU X, WANG P, NIYATO D, et al. Wireless Networks With RF Energy Harvesting: A Contemporary Survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(2): 757-789.
- [3] ZUNGERU A M, ANG L M, PRABAHARAN S, et al. Radio Frequency Energy Harvesting and Management for Wireless Sensor Networks[M]. Green mobile devices and networks: Energy optimization and scavenging techniques, Boca Raton: CRC Press, 2012: 341-368.
- [4] NISHIMOTO H, KAWAHARA Y, ASAMI T. Prototype im-

plementation of ambient RF energy harvesting wireless sensor networks[J]. IEEE Sensors, 2010, 143(2): 1282-1287.

- [5] HE S, CHEN J, JIANG F, et al. Energy provisioning in wireless rechargeable sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2013, 12(10): 1931-1942.
- [6] FU L, CHENG P, GU Y, et al. Minimizing charging delay in wireless rechargeable sensor networks[C]// IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM). IEEE, 2013: 2922-2930.
- [7] LI Y, FU L, CHEN M, et al. RF-Based Charger Placement for Duty Cycle Guarantee in Battery-Free Sensor Networks [J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(10): 1802-1805.
- [8] BI S, ZHANG R. Placement Optimization of Energy and Information Access Points in Wireless Powered Communication Networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 15(3): 2351-2364.
- [9] JU H, ZHANG R. Throughput Maximization in Wireless Powered Communication Networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(1): 418-428.

(上接第 87 页)

在多径并发传输机制的基础上实现负载均衡,这也是我们下一步的研究方向。

参考文献

- [1] SU J F, WU M Q, ZHANG Q J. Quantized optimal throughput analysis model of wireless multi-hop Ad hoc networks[J]. Journal of XIDIAN University, 2012, 39(1): 128-134. (in Chinese) 宿景芳, 武穆清, 张钦娟. 多跳 Ad Hoc 网络最佳吞吐率量化分析模型[J]. 西安电子科技大学学报, 2012, 39(1): 128-134.
- [2] LIU Y B, LIU N A, LI X H, et al. Load Balancing Routing Protocol Based on Traffic Prediction for Wireless Mesh Networks [J]. Computer Science, 2017, 44(1): 109-112. (in Chinese) 柳永波, 刘乃安, 李晓辉, 等. 基于流量预测的无线 Mesh 网络负载均衡路由协议[J]. 计算机科学, 2017, 44(1): 109-112.
- [3] AJAYI A O, ROEDIG U, EDWARDS C, et al. A survey of rural Wireless Mesh Network (WMN) deployments[C]// 2014 IEEE Asia Pacific Conference on Wireless and Mobile. Bali: IEEE Press, 2014: 119-125.
- [4] SHEN X J, CHEN Z G, LIU L. Load balancing multicast routing based on network coding in wireless mesh network[J]. Journal on Communications, 2015, 36(4): 89-95. (in Chinese) 沈小建, 陈志刚, 刘立. 无线 mesh 网络中编码感知且负载均衡的多播路由[J]. 通信学报, 2015, 36(4): 89-95.
- [5] DARESHOORZADEH A, GRANDE R D, BOUKERCHE A. Towards a Comprehensive Model for Performance Analysis of Opportunistic Routing in Wireless Mesh Networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 65(7): 5424-5438.
- [6] QIAO H, ZHANG D F, XIE K, et al. Distributed Fair Cooperative Routing in Multi-gates Wireless Mesh Network[J]. Journal on Communications, 2015, 36(2): 175-185. (in Chinese) 乔宏, 张大方, 谢鲲, 等. 分布式多网关无线 Mesh 网公平协作路由算法[J]. 通信学报, 2015, 36(2): 175-185.
- [7] SHESHADRI R K, KOUTSONIKOLAS D. An Experimental

Study of Routing Metrics in 802. 11n Wireless Mesh Networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2014, 13(12): 2719-2733.

- [8] GAO J, ZHANG L. Load-Balanced Short-Path Routing in Wireless Networks[J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems, 2006, 17(4): 377-388.
- [9] GAUR N, CHAKRABORTY A, MANOJ B S. Load-aware routing for non-persistent small-world wireless mesh networks[C]// IEEE 2014 Twentieth National Conference on Communications (NCC). Kanpur: IEEE Press, 2014: 1-6.
- [10] BAK P, TANG C, WIESENFELD K. Self-organized Criticality-An Explanation of $1/f$ Noise[J]. Physical Review Letters, 1987, 59(59): 381-384.
- [11] AHMED A M, PAULUS R. Congestion detection technique for multipath routing and load balancing in WSN[J]. Wireless Networks, 2017, 23(3): 881-888.
- [12] DELGADO COLLAO O, LABEAU F. Delay aware load balancing over multipath wireless networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, PP(99): 1.
- [13] LAREDO J L J, BOUVRY P, GUINAND F, et al. The sandpile scheduler: How self-organized criticality may lead to dynamic load-balancing[J]. Cluster Computing, 2014, 17(2): 191-204.
- [14] LAREDO J L J, GUINAND F, OLIVIER D, et al. Load Balancing at the edge of chaos: how self-organized criticality can lead to energy-efficient computing[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2017, 28(2): 517-529.
- [15] ZHOU T J, JIANG G P, TU X, et al. Local load redistribution strategy based on maximum residual capacity of nodes in complex networks[C]// 2017 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC). IEEE Press, 2017: 3692-3696.
- [16] PERKINS C E, ROYER E M, DAS E. Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing[C]// Proceedings of the 2rd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications 1999. Louisiana, IEEE Press, 1999: 90-100.