

射频能量捕获传感网中满足节点吞吐量需求的 基站最少化部署方案

池凯凯 徐欣晨 魏欣晨

(浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310023)

摘要 在射频能量捕获无线传感网(Radio Frequency Energy Harvesting Wireless Sensor Networks, RFEH-WSNs)中,基站(即汇聚节点)不仅具有较高的成本,而且其部署位置很大程度上决定了节点的可达吞吐量。文中研究 RFEH-WSNs 中满足节点吞吐量需求的基站最少化部署问题。首先,将该问题建模为优化问题,以深入理解该问题的本质;然后,提出一种低复杂度的启发式部署算法和一种复杂度略高的基于遗传算法的部署算法。仿真结果表明,这两种算法能找出基站数目较少的可行部署方案。相比于启发式基站部署算法,基于遗传算法的基站部署算法能得到部署基站更少的方案,但计算复杂度略高,适用于规模较小的 RFEH-WSNs。

关键词 射频能量捕获,无线传感网,基站部署,吞吐量需求

中图分类号 TN911.2 文献标识码 A

Minimal Base Stations Deployment Scheme Satisfying Node Throughput Requirement in Radio Frequency Energy Harvesting Wireless Sensor Networks

CHI Kai-kai XU Xin-chen WEI Xin-chen

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

Abstract In radio frequency energy harvesting wireless sensor networks (RFEH-WSNs), base stations (BSs), i. e., sinks, not only have high cost, but their deployment positions also greatly determine the achievable throughputs of nodes. This paper studied the minimal BSs deployments satisfying the node throughput requirement. Firstly, this problem was formulated as an optimization problem to deeply understand the essence of this problem. Then, a low-complexity heuristic deployment algorithm and a genetic algorithm based deployment algorithm were proposed. Simulation results show that, these two algorithms can find the BSs deployment with relatively few BSs. Compared to the heuristic deployment algorithm, genetic algorithm based deployment algorithm achieves fewer BSs, but has a little higher computational complexity, and is suitable for small and medium scale RFEH-WSNs.

Keywords Radio frequency energy harvesting, Wireless sensor networks, Base stations deployment, Throughput requirement

1 引言

在传统的无线传感网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)中,节点由电池供电,能量十分有限。布置在恶劣或特殊环境中的节点,一旦电池容量耗尽,很难甚至无法进行电池的充电或者更换。能量捕获^[1]作为一项新兴的技术,能有效解决 WSNs 的能量受限问题。与传统的 WSNs 相比,能量捕获无线传感网中的节点可以捕获环境中的能量,如太阳能、风能等^[2]。其中,节点通过捕获空间中的射频信号能量进行电池充电^[3],是非常有潜力的一种能量捕获方案。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^[4]。射频能量捕获无线传感网(Radio Frequency Energy Harvesting Wireless Sensor Networks, RFEH-WSNs)具有如下优点:可以对能量源的能量传输强度在时间维度和空间维度上

进行充分控制,且节点能量捕获较为稳定。

在传统的 WSNs 或者新型 RFEH-WSNs 中,节点将数据以一跳或多跳的方式传递给基站(Base Stations, BSs)即汇聚节点,BSs 的部署位置会很大程度上影响节点往 BSs 发送数据的可达传输速率。节点离 BS 越近,可达的传输速率越高。而且,基站的成本通常比较高。因此,研究 BSs 的最优部署问题是非常有意义的。

研究人员针对传统 WSNs 开展了一些 BSs 部署问题的研究。比如,文献[5]考虑了在传统 WSNs 中如何布置单个 BS 使得网络寿命最大化。其将网络分为两层:一层是传感器节点和簇头组成的下层拓扑,该层的主要工作是传感器节点收集信息传递给簇头;一层是由簇头和基站组成的上层拓扑,该层的主要工作是簇头将信息汇总至基站。首先找到关键簇头,再根据关键簇头确定最小覆盖圆,从而找到部署 BS 的最优位置。

本文考虑了 RFEH-WSNs 的最优部署问题,该问题与传

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;徐欣晨(1993—),女,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络;魏欣晨(1992—),女,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络。

统 WSNs 基站最优部署问题存在以下几方面的不同:1)在传统 WSNs 中,节点由于电池能量受限,需要联合考虑基站部署位置和节点数据发送功率。它们联合决定了节点的数据传输速率,而节点的数据发送功率又单独决定了节点的生命周期。然而,在 RFEH-WSNs 中,节点可以不断地从能量源(Energy Transmitters, ETs)捕获稳定的射频能量,可以以固定的发送功率不断地发送数据,即可以无须优化节点的数据发送功率。2)传统 WSNs 一般采取多跳路由且部署单个 BS,而 RFEH-WSNs 中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(即节点与周边的某个 BS 直接进行数据通信)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,因此对于节点不是部署在小区域范围内的 RFEH-WSNs,在网络区域中往往需要部署多个 BSs。

对于 RFEH-WSNs 的 BSs 部署问题,目前为止仅有少量的相关研究工作。文献[6]针对所有节点拥有相同的数据传输速率需求的 RFEH-WSNs,以最少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,使每个节点的平均能量捕获功率比数据发送功率至少高出预定阈值。与该工作不同,本文考虑不同节点有不同的数据传输速率需求,该类是有着更广泛的实际应用前景的异构 RFEH-WSNs,本文研究给定能量源部署(如均匀部署)的情况下满足每个节点吞吐量需求的基站最少化部署问题。

2 系统模型

2.1 网络模型

网络中部署了 M 个 ETs 和 K 个节点。第 m 个 ET 的物理位置用 $(x_m^{(E)}, y_m^{(E)})$ 表示,第 k 个节点 S_k 的物理位置用 $(x_k^{(N)}, y_k^{(N)})$ 表示。每个 ET 以发送功率 P_t 持续不断地发射射频能量信号。节点在下行链路中捕获 ETs 的射频能量以进行数据发送,而在上行链路中接入距离其最近的 BS,向其传输数据信息。能量发送和数据发送在正交频段进行,互不干扰^[6]。

节点以码分复用的方式并行地向基站发送数据,因此节点向其距离最近的基站传输数据时产生的相互干扰忽略不计^[6]。值得说明的是,本模型可通过很简单的修改就适用于时分复用方式。每个节点 S_k 都有一个自己的吞吐量需求 C_k^{\min} ,即实际达到的吞吐量必须要大于或等于 C_k^{\min} 。

用 N 表示所部署的基站个数,且第 n 个基站(记为 B_n)的部署位置用 $(x_n^{(B)}, y_n^{(B)})$ 表示。此外,节点 S_k 与基站 B_n 之间的距离记为 $d_{k,n}^{(B)}$,与第 m 个 ET 之间的距离记为 $d_{k,m}^{(E)}$,则有:

$$d_{k,n}^{(B)} = \sqrt{(x_k^{(N)} - x_n^{(B)})^2 + (y_k^{(N)} - y_n^{(B)})^2}, k=1, 2, \dots, K, n=1, 2, \dots, N \quad (1)$$

$$d_{k,m}^{(E)} = \sqrt{(x_k^{(N)} - x_m^{(E)})^2 + (y_k^{(N)} - y_m^{(E)})^2}, k=1, 2, \dots, K, m=1, 2, \dots, M \quad (2)$$

2.2 能量捕获模型

每个节点捕获到的总功率等于从所有的 ETs 中捕获的能量之和。记节点 S_k 在下行链路捕获的总能量功率为 $P_k^{(N)}$,其可以通过对 Friis 自由空间方程进行修改而得到,具体表示如下^[7]:

$$P_k^{(N)} = \sum_{m=1}^M \frac{\eta G_s G_r}{L_p} \left(\frac{\lambda_1}{4\pi(d_{k,m}^{(E)} + \epsilon)} \right)^2 P_t, k=1, 2, \dots, K \quad (3)$$

其中, η 是整流效率, G_s 是源天线增益, G_r 是接收天线增益, L_p 是极化损耗, λ_1 是供能信号波长。Friis 自由空间方程中的 $d_{k,m}^{(E)}$ 被调整为 $d_{k,m}^{(E)} + \epsilon$, ϵ 是一个固定的小参数,以克服 Friis 自由空间方程在 $d=0$ 时接收功率为无穷大的不足。

2.3 信息传输模型

节点 S_k 以发送功率 $\alpha P_k^{(N)}$ 发送数据信号给其最近的基站 B_n (α 是一个 0 到 1 的常数值,是捕获能量中用于数据传输的能量比例),基站 B_n 接收信号的功率为:

$$P_{k,n}^{(B)} = \frac{\eta G_s G_r}{L_p} \left(\frac{\lambda_2}{4\pi(d_{k,n}^{(B)} + \epsilon)} \right)^2 \alpha P_k^{(N)}, k=1, 2, \dots, K, n=1, 2, \dots, N \quad (4)$$

其中, λ_2 为数据传输信号波长。

因此,基站 B_n 从节点 S_k 处接收的信号的信噪比为:

$$SNR_{k,n} = \frac{P_{k,n}^{(B)}}{W n_o}, k=1, 2, \dots, K, n=1, 2, \dots, N \quad (5)$$

其中, n_o 是高斯白噪声的功率谱密度, W 是信号带宽。根据香农公式,可以得到节点 S_k 的实际吞吐量 C_k 为:

$$C_k = W \log_2(1 + SNR_{k,n}), k=1, 2, \dots, K \quad (6)$$

综上可得:

$$C_k = W \log_2 \left(1 + \frac{A}{(d_{k,n}^{(B)} + \epsilon)^2} \right), k=1, 2, \dots, K \quad (7)$$

其中:

$$A = \frac{\alpha P_t}{W n_o} \left(\frac{\lambda_1 \lambda_2}{(4\pi)^2} \right)^2 \cdot \frac{\eta G_s G_r}{L_p} \sum_{m=1}^M \frac{1}{(d_{k,m}^{(E)} + \epsilon)^2}$$

2.4 基站部署问题建模

本文考虑了异构 RFEH-WSNs,各个节点均有自己的数据传输吞吐量需求 C_k^{\min} 。在已知节点数目 K 和 ETs 数目 M 、每个节点和 ET 的物理位置以及每个节点的吞吐量需求的情况下,研究满足节点的吞吐量需求的同时使基站部署数目最小化。

基于上面的分析,最优基站部署问题可以建模为以下优化问题。

给定:节点数目 K 和 ETs 数目 M ,每个节点和 ET 的物理位置 $(x_k^{(N)}, y_k^{(N)})$ 和 $(x_m^{(E)}, y_m^{(E)})$,以及每个节点的吞吐量需求 $C_k^{\min}, k=1, 2, \dots, K, m=1, 2, \dots, M$

目标:最小化基站数目 N

变量:基站数目 N 以及各个基站的位置

约束: $C_k \geq C_k^{\min}, k=1, 2, \dots, K$

称满足全部节点的吞吐量需求的基站部署方案为可行基站部署方案。在所有可行基站部署方案中,基站部署个数最少的基站部署方案为最优基站部署方案。

由于基站数 N 是整数且节点的吞吐量表达式不是凸函数,该研究问题是一个非凸优化问题,不能用凸优化理论解决该问题。因此本文提出了高效的基站部署方案。

值得说明的是,该问题与 ETs 部署问题都属于拓扑优化问题,但是由它们对应的数学优化问题可以知道,ETs 部署问题中约束函数涉及的节点能量捕获表达式与基站部署问题中约束函数涉及的节点吞吐量表达式有着显著的不同;而且,在 ETs 部署问题中,每个 ET 位置的改变会影响所有节点所捕获的功率,而在基站部署问题中,每个基站位置的改变只影响接入该基站的节点。因此,ETs 部署问题的已有部署方案并不适用于基站部署问题。

3 基站部署算法

首先定义以下几个概念。

定义 1(需求半径) 对于某个节点,当其接入的基站与它的距离为 r 时恰好达到该节点的吞吐量需求,则称该距离 r 为此节点的需求半径。

当某节点和离它最近的基站的距离大于 r 时,则该节点的需求半径没有被满足;当某节点和离它最近的基站的距离小于 r 时,则该节点的实际吞吐量大于其需求吞吐量。

由式(7)可得,对于第 k 个节点 S_k ,当其需求吞吐量为 C_k^{\min} 时,该节点的需求半径 r_k 为:

$$r_k = \sqrt{\frac{A}{2 \frac{C_k^{\min}}{W} - 1}} - \epsilon, k=1, 2, \dots, K \quad (8)$$

定义 2(需求圆) 以节点为中心、需求半径为半径所构成的圆,被称为节点的需求圆。

定理 1 在可行基站部署方案中,任意一个节点的需求圆内至少部署一个基站。

证明:通过反证法来证明。对于某个可行基站部署方案,如果一个节点的需求圆内没有基站,那么该节点到最近基站的距离大于需求半径,从而该节点达不到其吞吐量需求。因此,这与可行基站部署方案的定义相矛盾。证明结束。

定义 3(最小覆盖长方形) 给定网络节点部署位置,覆盖全部节点且具有最小面积的长方形被称为最小覆盖长方形。

定理 2 存在一个最优部署方案,每个基站都是在最小覆盖长方形内。

证明:通过反证法来证明。假设每个最优基站布置方案都有基站部署在最小覆盖长方形外。任意挑一个最优基站布置方案,如图 1 所示,有 1 个基站部署在最小覆盖长方形 $AB-CD$ 外的 E 点。现将该基站从 E 点沿着垂直于 AD 边的线路上移动直至到达 AD 边上的 F 点。易知,任一原先接入该基站的节点,到该基站的距离变得更短,因此该新基站部署方案仍为可行方案,且所有基站都是在最小覆盖长方形内。因此假设不成立,定理 2 成立。

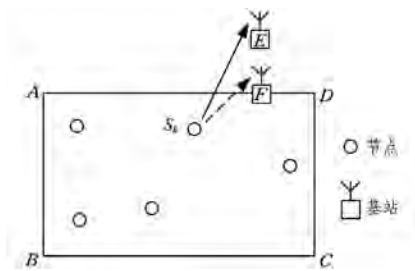


图 1 基站部署变形示意图

3.1 启发式基站部署算法

本部署算法的主要思想如下。

首先,由于节点和 ETs 的位置和个数是已知的,从而根据式(3)计算出节点的能量捕获功率。

接着,对于给定的各个节点的吞吐量要求,根据式(8)计算出各个节点的需求半径和需求圆。

然后,从基站数量 $N=0$ 开始,反复执行以下操作:找到具有最多节点需求圆相交的区域,然后在该区域里部署一

个新基站(N 值增加 1),并将这些节点需求圆标记出来以不再考虑这些节点需求圆。

易知,在某个节点需求圆中放置基站,该节点往该基站发送信息可以满足其吞吐量需求。如果某个节点的需求圆与其他需求圆都不相交,那么为了满足该节点的吞吐量需求,会在其需求圆内放置一个基站。

启发式基站部署算法的具体步骤如下:

1) 根据节点的物理位置来确定最小覆盖长方形,并将该长方形划分成 $p \times q$ 个网格。

2) 对每个节点计算出其需求半径。

3) 找出重叠的需求圆个数最多的网格,如果这样的网格有多个,随机挑选一个网格。

4) 在找出的网格的心中放置一个基站。

5) 删除这些节点需求圆,不再予以考虑。

6) 在剩下的需求圆中,重复执行步骤 3)~步骤 5),直到所有节点的需求圆都被删除,确定基站部署个数 N 及基站的部署位置。

7) 将每个节点依附于离它最近的基站,并删除没有节点接入的基站。

在步骤 3)中之所以挑重叠的需求圆个数最多的网格来新放置一个基站,是因为针对当前基站的放置情况,该新基站的放置可以使那些需求圆内尚未有基站的节点中有最多节点的吞吐量需求得到满足。

该启发式基站部署算法的伪代码描述如下。

算法 1 启发式基站部署算法

Input: 当前 K 个节点的物理位置,当前 M 个 ETs 的物理位置,ETs 的发送功率,节点功率转化因子 α ,节点最低吞吐量需求 C_k^{\min}

Output: 所需基站个数 N 及其物理位置

Main procedures

1. 根据节点的物理位置、ETs 的物理位置和 ETs 的发送功率,计算出各个节点的捕获功率 $P_k^{(N)}$ 和节点的发送功率 $\alpha P_k^{(N)}$ 。此外,设基站初始值 $N=1$ 。
2. 将最小覆盖长方形区域分割成 $p \times q$ 个小网格,并将这些网格标上序号,将每个网格的中心记为基站可能放置的位置。
3. 由节点的发送功率和最低吞吐量需求计算出各个节点的需求半径 r_k 。
4. while(存在剩余节点)
5. 将变量 \max 初始化为 0;
6. for 每个小网格 //找出重叠的需求圆个数最多的网格
7. //计算这个网格中心能够覆盖到节点需求圆的数量(若存在多个小网格中心覆盖的需求圆数量相同,随机挑选一个区域中心即可)
8. 将覆盖到该网格的需求圆数目 count 初始化为 0;
9. for 每个剩余节点//找到该网格能够覆盖到需求圆的节点
10. if (该节点坐标与该网格中心的距离 < 该节点的需求半径 r_k)
11. $\text{count}++$;
12. end if
13. end for
14. if($\text{count} > \max$)
15. $\max = \text{count}$;
16. 将变量 Index 重置为当前网格的序号;

end if

end for

15. 在序号为 Index 的网格中心放置一个基站, $N \leftarrow N+1$;

16. 将需求圆覆盖到序号为 Index 的网格的节点删除;

17. end while

18. 将每个节点依附于离它最近的基站,并删除没有节点接入的基站。

3.2 基于遗传算法的基站部署算法

上述启发式部署算法具有复杂度较低的优点,但是容易陷入局部最优,因此进一步提出一种基于遗传算法的基站部署算法。

当某节点的需求圆与任意其他节点的需求圆都不相交,则称这个节点为独立节点;反之,当节点需求圆与其他节点需求圆相交,则称该节点为相交节点。因为每个独立节点的需求圆内必将放置一个基站,因此部署问题只需考虑相交节点覆盖圆内的高效基站部署。所设计的遗传算法仅针对相交节点来部署基站,所得到的基站部署数目加上独立节点的个数即为最终部署基站的总个数。

3.2.1 编码

用 P 表示节点需求圆相交区域的数目,记节点需求圆的相交区域为 a_1, a_2, \dots, a_P ,本部署方案仅在相交区域中才会部署基站。将相交区域进行二进制编码操作,因此每个个体的长度为相交区域的数目 P 。用变量 $I_i = 0$ 表示相交区域 a_i 不放置基站,用 $I_i = 1$ 表示相交区域 a_i 放置基站,即:

$$I_i = \begin{cases} 1, & \text{相交区域 } a_i \text{ 放置基站} \\ 0, & \text{相交区域 } a_i \text{ 不放置基站} \end{cases} \quad (9)$$

对于一个个体,1 的个数即是所部署的基站数。例如,假设总共有 5 个由节点需求圆相交而成的区域,则每个个体的编码长度为 5,若其中一个个体的编码为“00110”,则说明该个体对应的部署方案在相交区域 a_3 和相交区域 a_4 放置了基站,总基站个数是 2。因此,对于任意一个个体 G_k ,所对应的基站个数 N_k 为:

$$N_k = \sum_{i=1}^P I_i \quad (10)$$

3.2.2 适应度函数

适应度函数是评价个体优劣的唯一标准。适应度值越高的个体,被选择的概率越高。本算法中适应度函数的设计考虑了以下两个方面:1)节点吞吐量需求是否被满足。如果某个个体没有保证每个节点需求圆内都有基站,则令其适应度为 0。2)部署基站的数目。因为在保证每个节点需求圆内都有基站的情况下,所部署的基站越多越不好,所以将每个节点需求圆内都有基站的个体适应度定义为 $1 - N_k/P$ 。 N_k 越大,适应度值越小。

3.2.3 选择运算规则

在选择操作中,应在当前种群中挑出优秀的个体作为父代进行交叉变异等操作。本算法中,选择适应度值最大的前 L 个个体来进入下一步的交叉操作。

3.2.4 交叉运算规则

常见的交叉有单点交叉和多点交叉。本文采用单点交叉,以父代个体的中间点位作为分界,两个父代个体基因的左右部互相交换基因序列,从而生成两个子代个体。将前面选择操作所选择出来的 L 个个体两两进行交叉,生成 $2C_L^2$ 个新

个体,并选择适应度值最大的前 J 个(J 为种群规模)新个体进行后面的变异运算。

3.2.5 变异运算规则

对群中所有个体以变异概率 p 来决定是否进行变异,对要进行变异的个体随机选择变异位进行变异。

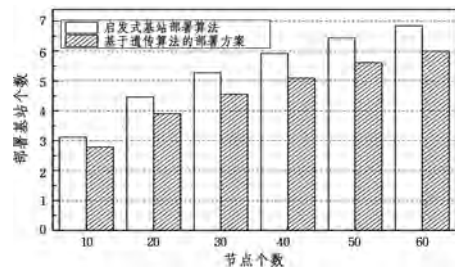
为了加快算法的收敛速度,尤其是在节点数目较大即需求圆相交区域数目 P 较大的情况,在变异运算后引入以下优化模块:对每个个体,按从左往右的顺序逐个对基因位进行检查,如果某基因位是 1 且将其变为 0 后该个体对应的部署仍然可行,则将该位由 1 变为 0。

4 实验仿真

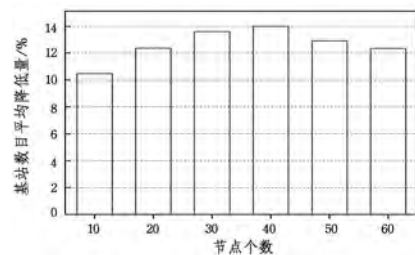
仿真的场景是在 $10 \times 10 \text{ m}^2$ 的区域内随机部署 K 个传感器节点以及均匀部署 4 个 ETs,每个 ET 的发送功率 $P_t = 0.6 \text{ W}$ 。能量捕获模型和信息传输模型的相关参数如下^[7]: $\eta = 0.3, G_s = 8 \text{ dBi}, G_r = 2 \text{ dBi}, L_p = 3 \text{ dB}, \lambda_1 = 0.33 \text{ m}, \lambda_2 = 0.66 \text{ m}, \epsilon = 0.2316 \text{ m}$ 。

遗传算法中的仿真参数如下: $J = 100, L = 30, p = 0.001$ 。初始种群中, J 个个体的二进制编码随机生成。当节点个数增加时,相交区域的数目急剧增大,算法收敛速度较慢。若将遗传迭代次数设置为较小值(如 1000 次),则无法达到较优部署,因此将仿真中的遗传迭代次数设置为 5000。

图 2 给出了两种部署算法的平均部署基站数目。可以看出,基于遗传算法的部署比启发式部署的部署基站数目要少,图 2 中几种情况的基站数目的降低量在 10% 以上。



(a) 两种部署算法的平均部署基站个数



(b) 基于遗传算法的部署相比启发式部署的部署基站数目的降低量

图 2 平均部署基站数目的对比

从图 2(b) 可以看出,随着节点数目的增加(从 10 增加到 40),基站数目降低量先是不断上升,但当节点数目进一步增加(从 40 增加到 60)时,基站数目降低量慢慢下降,其原因如下:当节点数目较少时,很多节点的需求圆没有与其他节点的需求圆相交,节点需求圆相交的区域较少。由于两种部署方案的差别在于如何在相交的需求圆内部署基站,面对需求圆相交区域数不多的场景,启发式部署算法也能找出较好的基站部署。但随着节点数目的增加,节点需求圆相交区域的数

目增加,启发式算法是迭代地查找需求圆重叠度最高的区域来新放置一个 BS,一开始重复度最高的区域往往是最小覆盖长方形的中心部分,这样会使得接下来需求圆内没有基站的节点分散在最小覆盖长方形内的边缘部分,从而导致所需部署的 BSs 的个数较多。而遗传算法即使针对有很多相交区域的场景,经过反复的遗传迭代,也可以找到较优的部署方案,因此相比于启发式部署算法,其部署基站的下降量不断增加。

然而,当节点数量进一步增加,在有限的网络区域内,所需部署的基站数目会接近并达到上限值,该数目的基站部署可以覆盖网络区域中任何位置的节点。因此,此时即使节点数目进一步增加,无论采用哪种部署算法,所需部署的基站数目也基本不需再增加了,高性能的遗传算法与启发式部署方案相比,部署基站数目的降低量也较有限,甚至没有降低。

结束语 本文研究了 RFEH-WSNs 中满足节点吞吐量需求的基站最少化部署问题,提出了一种低复杂度的启发式部署算法和一种复杂度略高的基于遗传算法的部署算法。仿真结果表明,这两种算法均能找出基站数目较少的可行部署方案。相比于启发式基站部署算法,基于遗传算法的基站部署算法得到了部署基站更少的方案,但计算复杂度略高,可用于规模不是非常大的 RFEH-WSNs。

参考文献

- [1] PRIYA S, INMAN D J. Energy Harvesting Technologies[M]. New York, NY, USA: Springer-Verlag, 2008.
- [2] SUDEVALAYAM S, KULKARNI P. Energy harvesting sensor nodes: Survey and implications [J]. IEEE Commun. Surveys Tuts., 2011, 13(3): 443-461.
- [3] ZHOU X, ZHANG R, HO C K. Wireless information and power transfer: Architecture design and rate-energy tradeoff[J]. IEEE Trans. Commun., 2013, 61(11): 4754-4767.
- [4] JU H, ZHANG R. Throughput maximization in wireless powered communication networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(1): 418-428.
- [5] PAN J, CAI L, HOU Y T, et al. Optimal base-station locations in two-tiered wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2005, 4(5): 458-473.
- [6] BI S, ZHANG R. Placement Optimization of Energy and Information Access Points in Wireless Powered Communication Networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(3): 2351-2364.
- [7] HE S, CHEN J, JIANG F, et al. Energy provisioning in wireless rechargeable sensor networks [J]. IEEE Transactions Mobile Computing, 2013, 12(10): 1931-1942.

(上接第 313 页)

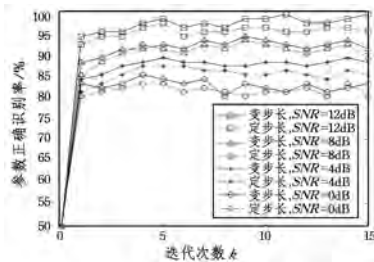


图7 两种识别算法的性能对比

从图7的识别性能可以看出,改进的变步长识别算法的性能要优于文献[9]的定步长的识别算法,究其原因主要是本文算法的收敛性较好,在相同的迭代次数下,本文算法更容易搜索到正确的参数。

结束语 基于 EM 算法思想,本文提出了变步长梯度寻优算法,该算法能够高性能地识别 RSC 码的编码多项式参数。从收敛性上看,变步长算法的收敛性能要远远好于定步长算法;从参数的识别率来看,在噪声环境较为恶劣的条件下,变步长算法对参数的识别仍能够达到较高的识别率。从上述两个方面可知:变步长的 RSC 生成多项式参数的识别算法的性能是非常好的。同时,本文还定量地研究了常值 γ 与 α 对参数收敛性的影响,为常值 γ 与 α 的选取指明了方向。下一步研究的方向将从减少算法的运算量出发,来提高参数识别的效率。

参考文献

- [1] 王兆伟,王永达,李秉权. Turbo 码应用于机载通信信道编码的研究[J]. 移动通信, 2015, 39(16): 55-59.

- [2] 谢辉,黄知涛,王峰华. 信道编码盲识别技术研究进展[J]. 电子学报, 2013, 41(6): 1166-1176.
- [3] 任亚博,张健,刘以农. 高误码率下 Turbo 码交织器的恢复方法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(8): 1927-1930.
- [4] BARBIER J. Reconstruction of turbo-code encoders[J]. Defense & Security, 2005, 5819: 463-473.
- [5] 解辉,王峰华,黄知涛,等. 基于改进欧几里得算法的卷积码快速盲识别算法[J]. 国防科技大学学报, 2012, 34(6): 159-162.
- [6] 刘健,王晓军,周希元. 基于 Walsh-Hadamard 变换的卷积码盲识别[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(4): 884-888.
- [7] 于沛东,李静,彭华. 一种利用软判决的信道编码识别新算法[J]. 电子学报, 2013, 41(2): 302-305.
- [8] MOON T K. Maximum-likelihood binary shift register synthesis from noisy observation[J]. Information Theory IEEE Transactions on, 2002, 48(7): 2096-2104.
- [9] DEBESSU Y G, WU H C, JIANG H. Novel Blind Encoder Parameter Estimation for Turbo Codes[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(16): 1917-1920.
- [10] 张旻,陆凯,李歆昊,等. 归零 Turbo 码的盲识别方法[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(6): 1424-1427.
- [11] 张旻,陆凯,李歆昊. Turbo 编码类型的盲识别方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(5): 701-707.
- [12] DING J, HANGENAUER J. Parameter estimation of a convolutional encoder from noisy observations[C]//Proc. IEEE International Symposium on Information Theory, 2007: 1776-1780.
- [13] LEE L R R F. A Tutorial on Hidden Markov Models and Selected Applications in Speech Recognition[J]. Proceedings of the IEEE, 1989, 77(2): 257-286.
- [14] 高鹰,谢胜利. 一种变步长 LMS 自适应滤波算法及其分析[J]. 电子学报, 2001, 29(8): 1094-1097.