·移动互联与通信技术· 文章编号:1000-3428(2018)05-0083-05 文献标志码:A 中图分类号:TP393

无线可充电传感器网络中充电器的部署优化

王志方[1,2],郑 霖[1],李晓记[1,2]

(1.桂林电子科技大学 信息与通信学院,广西 桂林 541004;2.广西信息科学实验中心,广西 桂林 541004)

摘 要: 为在无线可充电传感器网络中部署尽量少的充电器实现充电代价最小化,根据传感器节点的位置关系和拓扑特征设计 2 种无线充电器位置优化算法:近似算法与聚类分区算法。采用分割技术将网络划分成若干个网格的形式,分别求解每个网格内最少充电器数目,并通过移位策略减少充电器数目,提出近似比为$(1+\varepsilon)$的近似算法。同时,采用贪心思想进行聚类分区,结合最小包围圆算法提出聚类分区算法。复杂度分析与仿真结果表明,2 种算法都能准确求解出充电器的位置,其中聚类分区算法部署的充电器数目更少,并且时间复杂度更低。

关键词: 无线可充电传感器网络;充电器部署;非均匀分布;近似算法;分区算法

中文引用格式: 王志方,郑 霖,李晓记. 无线可充电传感器网络中充电器的部署优化[J]. 计算机工程,2018,44(5):83-87,93.

英文引用格式: WANG Zhifang, ZHENG Lin, LI Xiaoji. Charger Deployment Optimization in Wireless Rechargeable Sensor Network[J]. Computer Engineering, 2018, 44(5):83-87, 93.

Charger Deployment Optimization in Wireless Rechargeable Sensor Network

WANG Zhifang[1,2], ZHENG Lin[1], LI Xiaoji[1,2]

(1. School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;
2. Guangxi Experiment Center of Information Science, Guilin, Guangxi 541004, China)

【Abstract】 In order to minimize the charging cost in wireless sensor networks, two wireless charger location optimization algorithms are designed according to the location and topological features of sensor nodes: approximate algorithm and cluster partitioning algorithm. The segmentation technology is used to divide the network into several grids. The minimum number of chargers in each grid is solved separately. The number of chargers is reduced by the shift strategy, and an approximation ratio approximation $(1+\varepsilon)$ algorithm is obtained. At the same time, the greedy thought is adopted to cluster the clusters, and the clustering partitioning algorithm is proposed based on the least enclosing circle algorithm. Complexity analysis and simulation results show that both algorithms can effectively solve the position of the charger and are superior to other algorithms. The clustering partitioning algorithm has fewer number of chargers and lower time complexity.

【Key words】 Wireless Rechargeable Sensor Network(WRSN); charger deployment; non-uniform distribution; approximation algorithm; partitioning algorithm

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0046673

0 概述

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)由部署在监测区域内的大量传感器节点和一些汇聚节点组成,是通过无线通信方式形成的多跳自组织网络系统。在 WSN 中,传感器节点协作地感知、采集和处理网络覆盖区域中被感知对象的信息,并发送给观察者[1-2],其中传感器节点由有限的一次性电池供电且很难更换电池[3],这使得 WSN 的生命周期受到影响,严重制约其发展。文献[4]在实验中采用磁谐振耦合的技术验证了无线能量传输的可行性,这为 WSN 中传感器节点的能量补充提供了一个解决方案。

由无线充电器充电的无线传感器网络也称为无线可充电传感器网络(Wireless Rechargeable Sensor Network, WRSN)[5-6]。WRSN 中一个关键问题是无

基金项目: 国家自然科学基金(61362006,61571143,61371107);广西自然科学基金(2014GXNSFBA118288);广西信息科学实验中心基金"基于信息融合的室内智能定位关键技术研究"(PT1604)。

作者简介: 王志方(1990—),男,硕士研究生,主研方向为无线传感器网络;郑 霖,教授;李晓记,副教授。

收稿日期: 2017-04-06 **修回日期:** 2017-05-23 **E-mail:** 846012384@qq.com

线充电器的部署问题。无线充电器很昂贵[7],并且它们的部署需要花费很多的时间和成本,如何有效地部署无线充电器,使得网络的充电代价最小化,是一个亟待解决的问题。

目前针对 WRSN 的研究多数为对移动充电策略的研究[8-9],而对固定天线充电器部署问题的研究并不多见。文献[10]研究在室内的环境下如何部署配有定向天线的无线充电器,使得无线充电器覆盖全部传感器节点,并提出了基于节点的贪心锥选择算法和基于对的贪心锥选择算法。文献[11]提出一种基于自适应对的贪心锥选择(APB-GCS)算法,通过迭代以贪婪地选择覆盖大多数传感器的充电器。文献[12]中假设充电器网络的布置为等边三角形,通过研究点配置和路径配置这两种形式,使用最少数量的充电器来确保放置在网络任何位置的静止或移动的标签可以获得足够的功率用于持续正常工作。文献[13]考虑数据汇点对传感器的影响,提出一种能够减少所需定向充电器数量并仍然保持良好充电效果的功率平衡感知部署方法。

上述针对无线充电器部署的研究忽略了节点的位置关系和拓扑特征,传感器节点随机地分布在指定区域中,会造成传感器节点的密度不均匀,使得充电器的数目增多。为此,本文定义室内随机非均匀环境下 WSN 的充电覆盖问题,寻找最少数量的固定无线充电器,其中充电器位于网格顶点处,且充电器的覆盖区域被假设为圆形。为部署传感器节点非均匀分布下最少数目的充电器,根据文献[14-15]的启发,将节点的位置关系和拓扑特征考虑到充电器的选择中,提出利用分割技术和移位策略的近似算法,并结合最小包围圆算法,设计基于 k-中心点算法的聚类分区算法。

1 WSN 网络模型和问题

如图 1 所示,给定一个无线可充电传感器网络,其中传感器节点随机的部署在长为 L、宽为 W 的长方形区域内,负责为传感器节点进行充电的充电器位于距离长方形 H 的高度处。如图 2 所示,无线充电器配备有 3D 波束成形定向天线。当传感器节点位于无线充电器的充电圆锥内,即传感器节点位于无线充电器的覆盖范围内,假定传感器节点可以接收到无线充电器传输的能量。

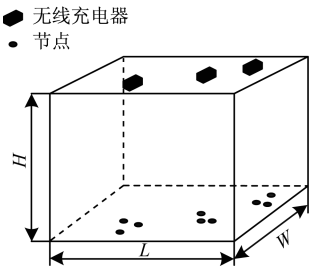


图 1 无线可充电传感器网络示意图

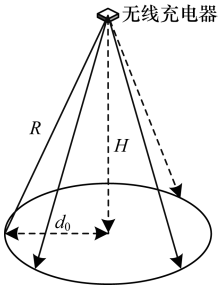


图 2 无线充电器覆盖模型

充电范围 R 是指在无线充电器的范围内使得在传感器节点的功率接收率至少超过一个阈值 δ,这里传感器节点 i 的功率接收率用 U_i 表示。U_i 是与距离有关的参数,随着节点 i 与无线充电器的距离增大而减小,当传感器节点 i 与无线充电器的距离大于 r_0,此处假定其功率接收率过低,使得传感器节点的电池磁谐振耦合无法正常工作。r_{ij} 为传感器节点 i 到无线充电器 j 的距离,当 $r_{ij} \leqslant r_0$ 时,节点 i 的功率接收率 $U_i = \mu(r_{ij}) \times U_{\text{Full}}$,否则 $U_i = 0$。这里 U_{Full} 是无线充电汽车(Wireless Charging Vehicle,WCV)为单个传感器节点满功率输出,$\mu(r_{ij})$ 为无线功率传输的效率,$\mu(r_{ij})$ 是关于 r_{ij} 的减函数,且 $0 \leqslant \mu(r_{ij}) \leqslant 1$。本文旨在使用最少数量的无线充电器对平面中的所有传感器节点进行充电,该问题定义如下:

问题 1 给定位于欧几里得平面 U 的目标传感器节点,寻找到最少数目的充电器,使得充电器能覆盖全部的传感器节点,并且每个传感器节点至少被无线充电器覆盖一次。

2 算法设计

为方便起见,本文将无线充电器投影到节点所在的平面上,由此得到 WSN 节点能量补给的充电覆盖模型,如图 3 所示。其中,o_i 表示投影到平面上的第 i 个无线充电器,d_{ij} 为节点 j 到第 i 个无线充电器在平面上投影点的距离,d_0 为无线充电器投影到平面上的最大覆盖半径,可知 $d_{ij} = \sqrt{r_{ij}^2 - H^2}$。

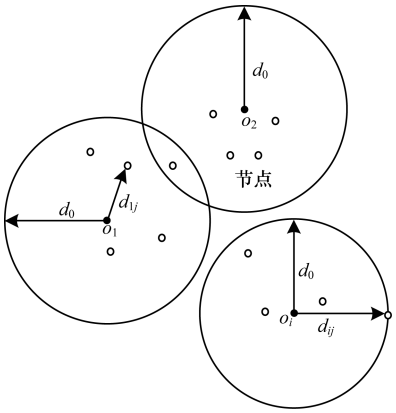


图 3　无线充电器充电范围

本文 WSN 中传感器节点集为 $N=\{1,2,\cdots,m\}$,无线充电器集为 $M=\{1,2,\cdots,m\}$,因此,有 $N=N_1\cup N_2\cup\cdots\cup N_m$,其中 n 和 m 分别表示传感器节点和无线充电器的数目。下文设计 2 种算法求解问题 1。

2.1　近似算法

假设 Q 是覆盖 N 中所有点的正方形。用于问题 1 的分割技术的思想如下:首先将正方形 Q 划分为称为单元的正方形网格,每个大小为 $m\times m$,其中 m 为常数(见图 4);然后解决每个单元的问题 1;最后将所有单元的解的联合作为对原始输入的解[16]。

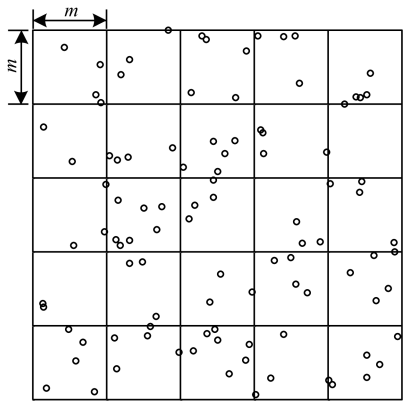


图 4　$m\times m$ 正方形网格

近似算法的具体步骤如下:

步骤 1　将平面 U 划分成正方形,边长皆为 m $(m>2d_0)$,集合 $Q=F_1\cup F_2\cup\cdots\cup F_u$,其中 F_i 表示有节点存在的正方形,u 为节点存在的正方形的数目。

步骤 2　对任一集合 F_i,寻找单元格中最少数目的充电器 $F_i(c)$。

步骤 3　输出 $Q=\cup F_i(c)$。

假设近似算法求得的充电器覆盖问题的一个最优解为 D^*。从近似算法的过程中,笔者发现近似算法的复杂性是单元格的数量和单个单元格中充电覆盖复杂度的乘积。因此,本文专注于研究单个单元格中充电覆盖的复杂性。由于充电距离的限制,每个充电器的充电盘至多可以覆盖 $\pi\times d_0^2$ 的区域。因为每个单元格的大小为 $m\times m$,每个单元格最多有 $\left\lceil\frac{m}{\sqrt{\pi}\cdot d_0}\right\rceil^2$ 个分区,所以覆盖单元格至多需要 $O(m^2)$ 个充电器。在此基础上,考虑目标传感器节点的位置。假设在第 i 单元格中有 n_i 个目标传感器节点,如果存在与单元格内其他传感器节点的距离都大于 $2d_0$ 的传感器节点,需要使用隔离的充电器对其充电。另一方面,如果传感器节点距离其他传感器的距离小于 $2d_0$,则可以使用一个充电器对其进行充电。因此,可以将充电器的充电盘移动到规范位置,使得至少 2 个传感器节点可以被充电器覆盖,规范位置选取 2 个传感器节点连线的中心。对于给定第 i 单元格内的 n_i 个目标传感器节点,至多需要 n_i 个规范位置。对于至多需要 $O(m^2)$ 个充电器覆盖单元中的所有节点,在穷尽搜索算法中,需要检查 $n_i^{O(m^2)}$ 可能的解决方案找到单元格中的最少的充电器。

因此,在所有非空单元格中,算法总时间为:

$$\sum_{i=1}^{u}n_i^{O(m^2)}\leqslant\left(\sum_{i=1}^{u}n_i\right)^{O(m^2)}=n^{O(m^2)}\tag{1}$$

所有目标传感器节点随机分布在平面 U 上。本文通过移位策略,移动单元格以减少充电器的数目。

如图 5 所示,在欧几里得平面 U 上,本文假定平面为 $l\times l$ 的正方形,因此,有 $U=\{(x,y)\mid 0\leqslant x\leqslant l,0\leqslant y\leqslant l\}$,此处 l 为整数。假定 $-m\leqslant p<0$,有新平面 $\tilde{U}=\{(x,y)\mid p\leqslant x\leqslant p+l,p\leqslant y\leqslant l+p\}$。移位策略是通过平移平面 $\tilde{U}$,从 $P(0,0)$ 移位到左下角 $(-m,-m)$ 处,每次移动计算出每个存在节点的单元格内最少数目的充电覆盖,然后与移动之前的单元格内充电覆盖集合组成 S,令 $J=\varnothing,\tilde{S_j}=S_j,j=1,2,\cdots,u$,若 $\bigcup_{j\in J}S_{j\neq S}$,则令 $|\tilde{S}|=\max\limits_{1\leqslant j\leqslant m}\{|\tilde{S_j}|\}$,$J=J\cup\{j^*\}$,$\tilde{S}=S_j-S_{j^*}$,否则,输出 $\bigcup_{j\in J}S_j$。

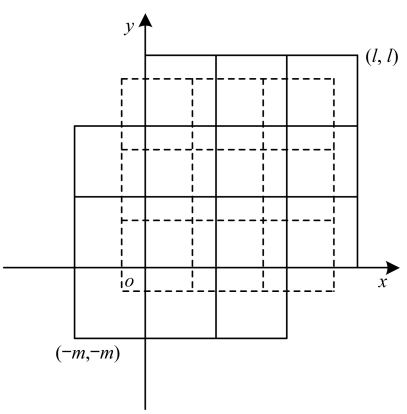


图 5　移位策略示意图

下面对近似算法的近似比进行分析。每个单元格为 $m \times m$ 的正方形,这里假设单元格不包括上、右侧边界。假定 D_i 为划分 $P(i,i)$ 中所有单元格的最少数目充电器的并集。将划分 $P(i,i)$ 中位于水平或垂直格线的所有单元格的集合成为 $P(i,i)$ 的一个条块。用 H_i 和 V_i 分别表示 D^* 中与 $P(i,i)$ 的水平和垂直条块相交的所有单元格的集合。如果充电器与多个单元格相交,则它必须属于 H_i 或者 V_i,且每个充电器最多与 4 个单元格相交,因此,有:

$$|D_i| \leqslant |D^*| + |H_i| + 2|V_i| \tag{2}$$

当 $a \neq b$ 时,一个充电器不可能既属于 V_a 又属于 V_b,即所有的集合 $V_a, a = 0,1,\cdots,m-1$ 都是两两不相交的。因此,有:

$$\sum_{i=0}^{m-1} |V_i| \leqslant |D^*| \tag{3}$$

同理可得:

$$\sum_{i=0}^{m-1} |H_i| \leqslant |D^*| \tag{4}$$

因此,$\sum_{i=0}^{m-1} |D_i| \leqslant \sum_{i=0}^{m-1} (|D^*| + |H_i| + 2|V_i|) \leqslant (m+3)|D^*|$,从而有 $\frac{1}{m}\sum_{i=0}^{m-1} |D_i| \leqslant (1+\frac{3}{m})|D^*|$。而 $\frac{1}{m}\sum_{i=0}^{m-1} |D_i|$ 代表 $|D_i|$ 的平均值,则至少存在一个 $i(i \in \{0,1,\cdots,m-1\})$ 满足 $|D_i| \leqslant (1+\varepsilon)|D^*|$,此处本文用 $\varepsilon = \frac{3}{m}$。因此,对于任意一个 $\varepsilon > 0$,存在一个求解充电器覆盖问题的 $(1+\varepsilon)$ 近似算法。

2.2 聚类分区算法

初始化移动位置集合 $M = \varnothing$,聚类分区算法的具体步骤如下:

步骤 1 令 $k = 1, S = \varnothing$。

步骤 2 使用 k-中心点算法进行分类并计算出每一类中点的最小包围圆[17]。

步骤 3 判断是否存在半径 $r_i \leqslant d_0, i \in \{1,2,\cdots,k\}$ 的最小包围圆。若存在,则将这些聚类储存到集合 S 中,并且 $M = M \cup S$,然后从节点集 N 中去除类中的点,即 $N = N - S$,判断集合 S 是否为空集,不满足转到步骤 1,满足转到步骤 4;若不存在,$k = k+1$,转到步骤 3。

步骤 4 输出集合 M。

已知 k-中心点算法时间复杂度为 $O(k(n-k)^2)$,而最小包围圆算法时间复杂度是线性的。假设第 1 次出现半径 $r_i \leqslant d_0, i \in \{1,2,\cdots,k\}$ 的最小包围圆时 k-中心点算法运行了 k_1 次,此时最小包围圆内的节点数为 n_1,则运行总时间为:

$$O((n-1)^2 + 2\cdot(n-2)^2 + \cdots + k_1\cdot(n-k_1)^2) = O(\frac{k_1(k_1-1)}{2}n^2) = O(k_1^2\cdot n^2) \tag{5}$$

假设第 2 次出现半径 $r_i \leqslant d_0, i \in \{1,2,\cdots,k\}$ 的最小包围圆时 k-中心点算法运行了 k_2 次,此时最小包围圆内的节点数为 n_2,则运行总时间为:

$$O((n-n_1-1)^2 + 2\cdot(n-n_1-2)^2 + \cdots + k_1\cdot(n-n_1-k_1)^2) = O(k_2^2\cdot n^2) \tag{6}$$

以此类推,当最后一次 k_l 时,此时最小包围圆内的节点数为 n_n。因此,聚类分区算法的运行时间为:$O((k_1^2 + k_2^2 + \cdots + k_l^2)\cdot n^2)$。本文假定 $k = \max\{k_1,k_2,\cdots,k_l\}$,则聚类分区算法的时间复杂度为 $O(k^3\cdot n^2)$。

3 仿真与分析

本节展示了 2 种算法的仿真结果。仿真器以 MATLAB 和 LINGO 实现,仿真设置如表 1 所示。假设传感器节点随机部署在 20 m×20 m 平面中,其中距离平面 2.82 m 处的一组网格点间隔为 1.414 m,以部署无线充电器。无线充电器的有效充电距离为 3 m,即传感器节点与充电器的距离在这个范围内可以有效地补充电量,否则传感器节点的充电效率为 0。

表 1 仿真设置

参数名	参数值
平面大小/m²	20×20
传感器节点数目	100
有效充电距离/m	3
网格宽度/m	2.650
网格长度/m	1.414

在上文的分析中,近似算法的时间复杂度近似为 $n^{O(m^2)}$,其中平面被平均分成25 个小方格,每个方格的边长均为 4 m。而聚类分区算法的时间复杂度为 $O(k^3\cdot n^2)$,k 值最大取 10。因此,近似算法的时间复杂度远高于聚类分区算法。

图 6 和图 7 分别展示了当平面上随机部署传感器节点的数量为 100 时,2 种算法得到的无线充电器的数量。其中,通过近似算法计算得到的充电器的数目为 36 个,而通过聚类分区算法计算得到的充电器的数目为 35 个。由于近似算法在移位策略中,处于左边界和上边界的点在移位之后将不再参与分区,因此会使计算出的充电器的数目上有一定的偏差。

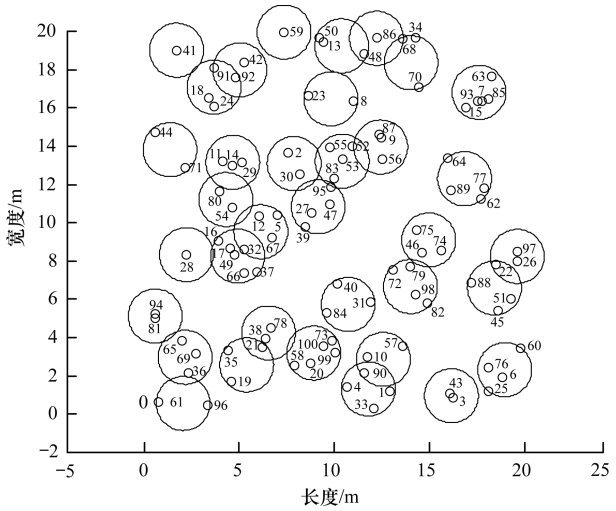


图 6　近似算法仿真结果

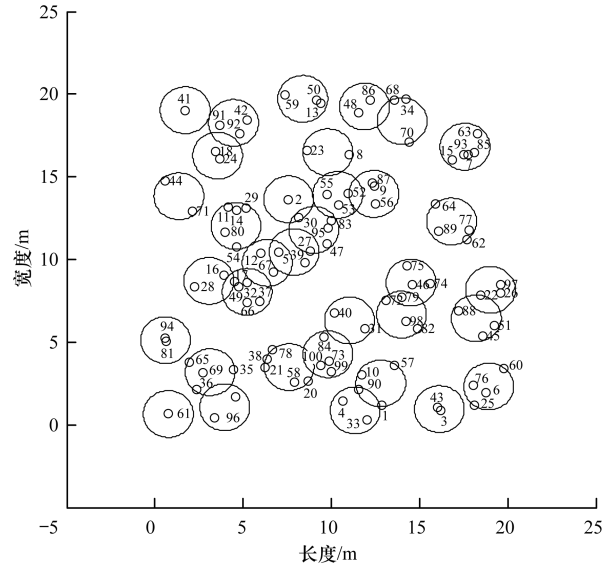


图 7　聚类分区算法仿真结果

图 8 给出了近似算法、聚类分区算法和 APB-GCS 算法在选择充电器数量方面的比较结果。可以看出,由近似算法和聚类分区算法求得的充电器的数目比 APB-GCS 算法少得多,而近似算法与聚类分区算法相差不大。

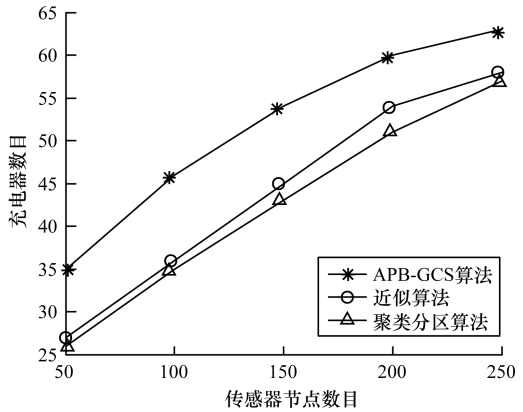


图 8　本文算法与 APB-GCS 算法的充电器数目比较

4　结束语

本文定义无线可充电传感器网络中的充电覆盖问题,同时考虑传感器节点随机非均匀分布的特点,提出 2 种算法:将网络划分成网格的形式进行求解并利用移位策略减少充电器数目的近似算法,以及基于贪心算法思想的聚类分区算法。时间复杂度分析及仿真结果表明,聚类分区算法在减少充电器的数量方面性能更好,而且具有较低的时间复杂度。下一步将对充电器为传感器节点充电的时间以及 WRSN 中拓扑路由对充电的影响等问题进行研究。

参考文献

[1] AKYILDIZ I F,SU W,SANKARASUBRAMANIAM Y, et al. Wireless sensor networks: a survey[J]. Computer Networks,2002,38(4):393-422.

[2] RAULT T,BOUABDALLAH A,CHALLAL Y. Energy efficiency in wireless sensor networks: a top-down survey[J]. Computer Networks,2014,67(8):104-122.

[3] RAJBA S,RAIF P,RAJBA T,et al. Wireless sensor networks in application to patients health monitoring[C]//Proceedings of IEEE Symposium on Computational Intelligence in Healthcare and E-health. Washington D. C., USA: IEEE Computer Society,2013:94-98.

[4] KURS A,KARALIS A,MOFFATT R,et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances[J]. Science,2007,317(5834):83-86.

[5] DAI H P,WU X B,XU L J,et al. Practical scheduling for stochastic event capture in wireless rechargeable sensor networks[C]//Proceedings of WCNC'13. Washington D. C.,USA:IEEE Computer Society,2013: 986-991.

[6] DAI H P,XU L J,WU X B,et al. Impact of mobility on energy provisioning in wireless rechargeable sensor networks[C]// Proceedings of WCNC'13. Washington D. C., USA: IEEE Computer Society,2013:962-967.

[7] 戴海鹏,陈贵海,徐力杰,等. 一种高效有向无线充电器的布置算法[J]. 软件学报,2015,26(7):1711-1729.

[8] 胡　诚,汪　芸,王　辉. 无线可充电传感器网络中充电规划研究进展[J]. 软件学报,2016,27(1):72-95.

[9] 刘　创,王　珺,吴　涵. 无线可充电传感器网络的移动充电问题研究[J]. 计算机技术与发展,2016, 26(3):162-167.

[10] LIAO J H, JIANG J R. Wireless charger deployment optimization for wireless rechargeable sensor networks[C]// Proceedings of International Conference on Ubi-Media Computing and Workshops. Washington D. C., USA: IEEE Press,2014:160-164.

[11] LIAO J H, HONG C M, JIANG J R. An adaptive algorithm for charger deployment optimization in wireless rechargeable sensor networks[J]. Frontiers in Artificial Intelligence and Applications, 2015, 274: 2080-2089.

(下转第 93 页)

5　结束语

本文对采用不同策略的 MPA 算法进行阐述,并结合串行 MPA 算法和 MAX-Log 运算两者之间的优点,提出一种串行 MAX-LogMPA 算法。通过对收敛速度、误码率性能、算法复杂度 3 个方面的仿真实验对比,可以发现:采用串行 MPA 与并行 MPA 的误码率性能一样;并、串 MAX-Log MPA 两者的误码率性能相对较差,算法复杂度低,硬件实现容易。综合来看,串行 MPA 算法比并行 MPA 多用户检测算法更优。串行 MAX-LogMPA 算法的算法复杂度进一步降低,硬件实现更加容易。

参考文献

[1] SOLDANI D, MANZALINI A. Horizon 2020 and beyond:on the 5G operating system for a true digital society[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2015,10(1):32-42.

[2] WANG Bichai,WANG Kun,LU Zhaohua,et al. Comparison study of non-orthogonal multiple access schemes for 5G[C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting. Washington D.C.,USA:IEEE Press,2015:1-5.

[3] NIKOPOUR H,BALIGH H. Sparse code multiple access[C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications. Washington D.C., USA:IEEE Press,2013:332-336.

[4] HOSHYAR R,WATHAN F P,TAFAZOLLI R. Novel low-density signature for synchronous CDMA systems over AWGN channel[J]. IEEE Transactions on Signal Processing,2008,56(4):1616-1626.

[5] BEEK J V D,POPOVIC B M. Multiple access with low-density signatures[C]//Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference. Washington D.C.,USA: IEEE Press,2009:1-6.

[6] RAZAVI R, HOSHYAR R, IMRAN M A, et al. Information theoretic analysis of LDS scheme[J]. IEEE Communications Letters,2011,15(8):798-800.

[7] TAHERZADEH M,NIKOPOUR H,BAYESTECH A,et al. SCMA codebook design[C]//Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference. Washington D.C., USA:IEEE Press,2014:14-17.

[8] ZHANG Shunqing,XU Xiuqiang,LU Lei,et al. Sparse code multiple access:an energy efficient uplink approach for 5G wireless systems[C]//Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference. Washington D.C.,USA:IEEE Press,2014:4782-4787.

[9] AU K, ZHANG Liqing, NIKOPOUR H, et al. Uplink contention based SCMA for 5G radio systems[C]//Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference. Washington D.C.,USA:IEEE Press,2014:900-905.

[10] LU Lei,CHEN Yan,GUO Wenting,et al. Prototype for 5G new air interface technology SCMA and performance evaluation[J]. China Communications, 2015, 12(s1): 38-48.

[11] DU Yang,DONG Binhong,CHEN Zhi. Joint sparse graph-detector design for downlink MIMO-SCMA system[J]. IEEE Journals & Magazines,2017,6(1):14-17.

[12] WU Yiqun, ZHANG Shunqing, CHEN Yan. Iterative multiuser receiver in sparse code multiple access systems[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications. Washington D.C., USA:IEEE Press,2015:2918-2923.

[13] DU Yang, DONG Binhong, CHEN Zhi, et al. A fast convergence multiuser detection scheme for uplink SCMA systems[J]. IEEE Wireless Communications Letters,2016,5(4):388-391.

[14] 杜　洋,董彬虹,王显俊,等. 基于串行策略的 SCMA 多用户检测算法[J]. 电子与信息学报,2016,38(8):1888-1893.

[15] KSCHISCHANG F R, FREY B J, LOELIGER H A. Factor graphs and the sum-product algorithm[J]. IEEE Transactions onInformation Theory, 2001, 47(2):498-519.

编辑　顾逸斐

(上接第 87 页)

[12] HE S B,CHEN J M,JIANG F C,et al. Energy provisioning in wireless rechargeable sensor networks[C]//Proceedings of INFOCOM'11. Washington D.C.,USA:IEEE Computer Society,2011:2006-2014.

[13] LIN T L,LI S L,CHANG H Y. A power balance aware wireless charger deployment method for complete coverage in wireless rechargeable sensor networks[J]. Energies,2016,9(9):695-708.

[14] PANG Y,LU Z,PAN M,et al. Charging coverage for energy replenishment in wireless sensor networks[J]. IEEE International Conference on Networking, 2014, 43(3):251-254.

[15] 王继强. 集合覆盖问题的模型与算法[J]. 计算机工程与应用,2013,49(17):15-17.

[16] DU D Z, KO K I, HU X. Design and analysis of approximation algorithms[M]. Berlin, Germany: Springer, 2011:123-136.

[17] WELZL E. Smallest enclosing disks (balls and ellipsoids)[M]//MAURER H. New Results and New Trends in Computer Science. Berlin,Germany:Springer, 1991:359-370.

编辑　金胡考