

无线可充电传感器网络中固定充电器的部署策略

何灏, 陈永锐, 易卫东, 李鸣

(中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100041)

摘要: 无线可充电传感器网络(WRSN)的传统充电器部署方式覆盖所有区域, 而所提方法的基本思想是覆盖所有节点的位置。建立了充电器到最远节点距离的数学模型, 分析了节点个数与最小充电半径数学期望之间的关系, 提出一种充电器部署策略: 根据区域内需要充电的节点的位置, 采用最小覆盖圆(SEC)方法, 通过欧式投递男孩算法寻找充电器的最优位置。该方法能够减小充电半径, 降低最小发射功率, 节省平均充电能耗。实验结果显示, 区域中节点出现的位置越少, 节约的能耗越多。

关键词: 无线可充电传感器网络; 充电器部署策略; 发射能耗节约; 无线射频识别

中图分类号: TN923

文献标识码: A

Deployment strategy for static chargers in WRSN

HE Hao, CHEN Yong-rui, YI Wei-dong, LI Ming

(School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100041, China)

Abstract: The traditional deployment strategy of static chargers in wireless rechargeable sensor networks (WRSN) covers all the area. The basic idea is to cover all the positions of nodes. A mathematical model of distance between a charger and the farthest node was established, the relationship between the number of nodes and the mathematical expectation of minimum radius of charging was analyzed, and deployment strategy for static chargers was proposed. The method based on the locations of all nodes that need to be charged in the area, used the smallest enclosing circle (SEC) algorithm and finds the optimal location of the charger through Euclidean delivery boy algorithm. It will decrease charging radius, reduce the minimum required transmitted power, thereby saving the average charging energy consumption. The experimental results demonstrated that the less the number locations that the nodes existed, the more energy will be saved.

Key words: wireless rechargeable sensor networks, chargers deployment strategy, transmitted power saving, RFID

1 引言

无线传感器网络(WSN)节点具有体积小、部署灵活、自组织性等特点, 成为物联网关键技术之一, 目前被广泛用于环境监测^[1]、城市监测^[2]和人体监测^[3]等领域。由于受到 WSN 节点的体积和成本等因素制约, 能源问题成为 WSN 的一大挑战。传统的 WSN 网络往往依靠电池提供能量, 而近年来, 电池技术的发展速度远远慢于电子技术, 电池不但会增加节点的体积和成本, 而且其寿命也成为 WSN 网络生命周期的瓶颈。

为了解决 WSN 的能源供给问题, 如今有 2 类主要的解决思路: 能量节约和能量获取。能量

节约技术主要通过睡眠调度、功率管理、路由选择等技术, 减少单位时间内的能耗, 延长网络生命周期。这种技术一直是主流研究方向, 但是该方法需要在能耗节约和传输性能之间进行权衡, 可能损失传输性能, 并且其对网络生命周期的延长也有限。而能量获取技术, 其基本思想是从环境中获取能量, 如阳光^[4]、震动^[5]、风能^[6]等。其优势是可以从周围汲取能量, 但由于环境能量密度低, 为了达到一定的能量获取率, 传感器节点需要配备体积较大的能量转换器, 并且能量转换效率低; 更重要的是, 由于外部环境具有一定的不确定性, 能量获取过程不可控并且难以精确预测。

为了解决上述问题,人们开始探索更为可靠、可控的能源供给方法,提出了无线可充电传感器网络(WRSN)^[7]的概念。WRSN 通过无线充电器来持续、稳定地向网络中的节点提供能量,可以使网络生命周期不再受电池寿命或周围环境的制约。由于 WSN 节点的体积受储能元件大小影响很大,而 WRSN 又可以从很大程度上减小对于储能元件的依赖,使 WRSN 节点可以以更小、更灵活的形式出现,这成为 WRSN 另一个独特的优势。当前,已经有一些基于不同供电原理的 WRSN 的研究,如使用电磁辐射^[7]、磁耦合共振^[8]、Wi-Fi^[9]、RFID^[10]等充电方式来给节点供电。

但是,在 WRSN 技术中,也面临着减小充电代价的问题。一方面,要保证给每个节点提供充足能量;另一方面,要尽可能减小充电器数量和能耗。在实际应用中,根据充电器是否能够移动,WRSN 的无线充电方式主要包含 2 种:移动充电方式和固定充电方式。移动充电方式引入了移动充电装置,其实现形式非常灵活,研究内容除了路径规划外,还能够整合数据采集以及其他功能,成为研究的热点。

当 WRSN 中节点的通信距离远大于充电距离时,由于无线电信号的衰减与距离呈指数关系,移动充电方式能够靠近节点,对其进行高效的充电。该技术的核心问题是如何依据节点分布情况,规划移动充电器的最优充电路径与充电时间。在保证所有节点都能完全充电的前提下,使所需要的移动充电器数量最少,并且具有最少的充电开销。移动充电方式常用于节点之间具有较远距离的情况,此时无线充电信号可以忽略不计。而在另外一些应用背景下,如果节点之间距离较近且充电信号强度可以满足要求,如在室内或某些特定结构环境下的应用,移动充电方式就不是特别必要。

固定充电方式使用一些位置固定的无线充电器覆盖区域中所有节点的位置。其中一个需要解决的重要问题是:如何在保证所有节点都正常工作的前提下,使充电器个数最少、功耗最低。如果无线充电器的充电半径固定,传统部署方法按照等边三角形顶角的部署形式,可以用最少的充电器完全覆盖所有区域。这种方法基于一种假设,即需要进行充电的节点出现在区域中的所有位置。但是,由于区域中的节点数量是有限的,几乎不可能覆盖所有位置,如果不谋求覆盖所有区

域,而是覆盖所有节点的位置,也可以给所有节点正常充电。相比于区域完全覆盖的充分不必要条件,这是节点充电的充要条件。这也成为优化充电器部署位置的依据。

本文对采用固定充电方式的 WRSN 进行了研究,建立了充电器覆盖区域内充电器到最远节点距离(即最小充电半径)的数学模型,分析了节点个数与最小充电半径数学期望之间的关系,并据此提出了一种充电器位置部署的局部优化方法。该方法的基本思想是充电器充电区域覆盖所有节点位置,而不是覆盖所有区域。该算法根据所有需要充电的节点的位置,基于最小覆盖圆(SEC)算法,寻找充电器的最优位置,降低发射功耗或发射时间,从而节省平均充电能耗。使用基于 RFID 的无线充电平台 WISP^[9]和现成 RFID 读写器进行了仿真试验。结果显示,相比于传统等边三角形的部署形式,当区域内节点个数为 2~100 时,本文算法平均能够将发射功率减少 14%~79%。其节能效果与节点个数有关,区域中节点数量越少,节约的能量越多。

2 相关工作

近几年,WRSN 充电问题的研究逐渐成为研究热点。这些研究有的关注不同的充电原理及其特点,如使用电磁辐射^[8]、磁耦合共振^[8]、Wi-Fi^[9]、RFID^[10]等;其他的研究不同的充电调度,如研究移动充电器的最优路径,或是将充电和信号采集整合到一起。

文献[8]是无线能量转换技术的综述,以及这些技术近期来的不同应用。然后,文献[8]还给出了充电需要满足的基本原则:在任意长度的时间内,网络的能量消耗应该少于充电器提供到网络的能量加上所有节点的初始能量。此外,通过一个估计加权算法,对充电调度进行了规划,并研究了无线充电与典型应用的整合。

在很多应用中,传感器网络节点之间在地理上都有比较远的距离^[11],而无线电传输信号强度又随距离的增加成几何速率衰减。因此,移动充电方式能够更好地应对中远距离的充电问题,所以大部分研究工作主要集中在可移动充电方式的研究上。文献[12]和文献[13]提出了一种用来对野外节点进行充电的无线充电载具,并对其最优路径理论进行了分析,提出了接近最优的路径方案。由于一个 RFID 充电器可以同时为多个节点进行充电,每个节点上

都有片上能源存储系统，所以文献[14]规划了一种用于移动充电的启发式算法，让其在行进过程中能够在一些位置停留，这些位置应尽可能多地覆盖节点，在这些节点能量耗尽前进行充电，使充电延迟最小化。而文献[15]提出了一种用于室内充电的自走式载具，并提出了相应的移动充电规划。

对于固定充电方式，同样需要考虑如何在保证所有节点都正常工作的前提下，充电器个数最少、功耗最低。不同于移动式充电器，也有一些应用场景更加适合固定充电方式，如室内环境^[16]、人体运动识别^[17]等。由于 RFID 是一种较为成熟且已经被广泛应用的无线通信技术，有研究者将其用作近距离无线充电技术^[18]。Philipose 等^[19]最早介绍了基于 RFID 的一种 WISP 无线充电技术的概念、设计需求和潜在应用。Intel 开发了 WISP 的开源平台^[20]，使 WISP 发展为一项经典的近距离无线充电技术。在 WISP 中，RFID 读写器(reader)成为系统的充电器，可以给多个节点上的标签(tag)充电。只要标签位于读写器的充电半径内，它就可以从读写器发送的 RF 信号中获取能量^[21]。所以读写器的位置应该能够保证所有标签都能充上电，每个节点的耗电速率都应该小于其充电速率。

文献[22]中认为，读写器应该部署的位置应该满足一个条件，即无论一个标签放在什么位置，都能够被充上电。所以文献[22]中，根据圆盘感知模型^[23]，将读写器部署在等边三角形的顶角上(如图 1 所示)，可以获得能够保证完全覆盖平面所需要的最少读写器数量。这种部署方式类似于移动电话基站。文献[24~26]中讨论了更多的圆圈覆盖区域问题。文献[24]和文献[26]，进行了如何使用圆圈覆盖某种特定形状的理论推导。文献[26]对 WSN 传感器覆盖范围进行了讨论，对于充电器对于节点的覆盖也有参考价值。因为在 WSN 中，节点被部署用来探测目标发射的信号，而在 WRSN 中，充电器被部署用来发射信号给节点充电。文献[27]讨论了如何减少和避免充电和通信的冲突。

当充电圆圈半径固定的时候，将充电器部署在等边三角形的 3 个顶点可以实现用最少的圆来完全覆盖平面。移动电话基站往往采用这种部署策略，能够覆盖到各个角落，而不用担心出现信号死角。以往 WRSN 固定充电方式为了覆盖所有区域，也沿用了这种布局。但是，充电器需要满足的充要条件

是覆盖所有节点的位置，而不是覆盖所有区域。本文将能够覆盖这些节点位置的充电区域称为有效区域。相比于覆盖所有区域的方案，更小的覆盖区域意味着充电器更低的发射功率或者相同功率下更短的发射时长。实际上，区域中的节点数量是有限的，每个节点出现的位置通常也较为固定，并且节点位置的个数与充电有效区域有关系。基于上述分析，本文研究了一种 WRSN 充电器放置位置的优化方法，通过大量重复实验仿真了使用该方法时，区域内不同节点数量对于充电能耗的平均影响。

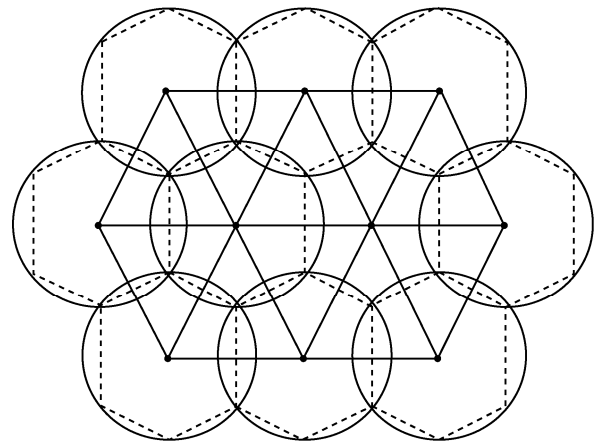


图 1 传统等边三角形充电器部署方式

3 问题描述

为了能够维持区域中所有节点的正常工作，在 WRSN 的无线充电过程中，需要考虑 2 个基本问题。

1) 保证区域 Ω 中所有节点都供电充足，即在点 (x, y) 处的充电功率 $p_r(x, y)$ 大于或等于耗电功率 p_s ，即

$$\text{s.t. } p_r(x, y) \geq p_s, \forall (x, y) \in \Omega \quad (1)$$

2) 充电代价尽可能小，包括用最少的充电器覆盖最多节点位置、充电器功率和充电时间尽可能小。

$$\min \int_{\Omega} \sum_{i=1}^N p_r^{(i)}(x, y) dx dy \quad (2)$$

在固定的无线充电方式中，传统的充电方式是将充电器部署于等边三角形 3 个顶点处，这样可以实现在充电半径相同时，用最少的充电器实现对整个区域的覆盖。这样就构成了给区域内所有节点都能够充上电的充分条件，保证节点在区域内任意位

置都能够被充电。

然而, 在实际使用过程中, 节点往往只出现在区域中的特定位置: 固定在一个位置, 或节点可以运动, 但仅限于若干特定位置。由于区域内节点出现的位置是有限且确定的, 不会占据空间的所有区域, 往往可以用一个更小充电半径的圆圈覆盖所有节点, 这个更小的覆盖圆就能成为优化充电器部署位置和发射能耗或发射时间的依据。也就是说, 在保证每个节点都能正常充电的前提下, 充电器的位置和功率都存在优化的空间。传统充电器位置的等边三角形部署方式可能存在不同程度的功耗上的浪费, 这取决于单位区域内节点的个数、分布的位置。

在对充电器位置部署优化的研究中, 本文将 3 个问题作为优化的依据: 1) 包含节点的区域该如何划分; 2) 节点在该区域内出现的个数; 3) 节点的位置如何分布。在传统等边三角形方法下, 圆与圆之间的交点依次连线可以形成一个个正六边形, 即蜂窝状紧密排列在一起, 完全覆盖住整个区域。所以, 本文将正六边形区域选为分析的对象, 研究在该区域中节点的不同个数对充电器位置优化存在的影响。

为了验证优化结果, 本文使用 WISP 标签作为测试用无线充电硬件。WISP, 即无线识别和传感平台, 是一个通过 RFID 读写器进行充电和读取的传感器硬件平台。它可以直接从读写器产生的 RF 信号中获取能量, 不需要电池。WISP 是一个开源, 开放架构的 EPC Class 1 Generation 2 RFID 标签, 包含一个可编程 16 bit 微控制器和任意的传感器。传统的 RFID 标签不能执行任意的电脑程序, 也无法支持传感器。本文所用 WISP 版本为 WISP4.1DL, 包含 32 KB 存储器、一个三轴加速度计、一个温度传感器和一个电容传感器。

4 无线充电模型和节点分布模型

本节介绍 WRSN 中的一种基于 RFID 的无线充电模型。然后讨论区域内节点分布情况、节点个数与能够覆盖所有节点的充电器所需要的充电半径数学期望之间的关系, 该半径将作为本文优化算法的重要依据。如果充电覆盖半径小于传统等边三角形方法的半径, 则说明可以减少充电器的能耗。

4.1 无线充电模型

本文考虑单个充电器提供的功率。无线电在自

由空间中的传播, 可以根据 Friis 自由空间式(3)计算接收功率 p_r

$$p_r = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 p_t \quad (3)$$

其中, p_t 为发射功率, G_t 和 G_r 为发射和接收天线的增益, λ 为波长, d 为收发端的距离。Friis 公式常用于计算远距离传输, 如卫星通信。

在 WISP 系统中, 读写器(reader)通过一个极化天线发送无线电信号, 而 WISP 标签(tag)也通过一个直线极化双极子天线接收信号。所以, 公式中加入极化损失因子。此外, 还要考虑接收信号的转化效率。文献[28]在 Friis 公式的基础上, 给出了一个计算无线充电功率的经验式

$$p_r = \frac{G_t G_r}{L_p} \left(\frac{\lambda}{4\pi(d + \beta)} \right)^2 p_t \quad (4)$$

其中, L_p 为极化损失, β 为 Friis 公式短距离传输时候的调整因子。

在充电模型中将以下部分看作一个整体 τ , η 为传输效率, 如式(5)所示。

$$\tau = \frac{G_t G_r \eta}{L_p} \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 p_t \quad (5)$$

当充电器发射功率 $p_t = 1\text{W}$ 时候, 得到的 $\tau = 4.32 \times 10^{-4}$ 以及 $\beta = 0.2316$ 。

当一个节点距离充电器足够远时, 节点上标签接收到的读写器发出的 RF 信号功率可以忽略不计。所以, 根据标签距离读写器的远近, 假设读写器的位置为(0, 0), 那对于位置(x,y)的标签所能接收到的功率可用式(6)计算。

$$p_r(x, y) = \begin{cases} \frac{\tau}{(d + \beta)^2}, & d \leq r_2 \\ 0, & d > r_2 \end{cases} \quad (6)$$

实际上, 根据标签到读写器的距离, 节点接收功率 p_r 可以进一步分为 3 种情形: 可以充满、不能充满和完全充不上, 如式(7)所示。

$$p_r(x, y) = \begin{cases} p_s, & d \leq r_1 \\ \frac{\tau}{(d + \beta)^2}, & r_1 \leq d \leq r_2 \\ 0, & d > r_2 \end{cases} \quad (7)$$

其中, p_s 为节点耗电功率。在 $d \leq r_1$ 范围内, 单个充电器可以给节点完全充上电, 再高的发射功率就

没有意义, 因此, 其接收功率可以统一记为 p_s ; 而在 $r_1 \leq d \leq r_2$ 范围内, 单个充电器能够给节点充电, 但此时 $p_r < p_s$, 无法充满, 可以用该计算式算出能够接收到的充电功率; 当 $d > r_2$ 的时候, 距离太远, 充电可以忽略。本文研究单个充电器问题, 故考虑能够完全充电的状态, 即 $d \leq r_1$ 的情形。

然后, 充电代价最小化问题可以通过式(8)来表示。

$$\min \int_{\Omega} \sum_{i=1}^N P_r^{(i)}(x, y) dx dy \quad (8)$$

其中, Ω 是覆盖区域, 传统正三角形覆盖全部区域并不是必需的。本文所提算法只需要覆盖所有节点出现的位置即可。对于覆盖所有节点来说, 传统的等边三角形顶点部署方式是一个充分不必要条件。

4.2 节点分布模型与所需充电半径的期望

在实际应用中, 比较常见的节点部署方法为随机部署, 即节点位置理论上在区域中可以等效为服从均匀分布。所以本文将引入均匀分布模型, 然后分析当节点数量不同的时候, 对最远节点到充电器距离的数学期望的影响。该期望可以从统计意义上说明所需要的充电半径大小, 也进一步决定了充电器所需要的能耗。为了得到节点个数与覆盖半径期望之间的关系, 计算包含 3 步: 1) 计算区域中一个点到中心的距离的概率分布和概率密度; 2) 如果在区域中有 n 个点, 则计算最远点到中心的距离的概率分布和概率密度, 这里需要用到第 1) 步中的结果; 3) 根据第 2) 步的结果, 计算最远点到中心的距离的期望。

1) 假设节点在区域中的 x 和 y 方向分别服从 $[a, b]$ 上的均匀分布, $x \sim U(a, b)$, $y \sim U(a, b)$ 。节点 (x, y) 到区域中心的距离为 $z = \sqrt{x^2 + y^2}$, 可以得到联合概率分布函数

$$F_z(r) = P(z \leq r) = P\left(\sqrt{\left(x - \frac{a}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{a}{2}\right)^2} \leq r\right) = \frac{\pi r^2}{(b-a)^2} \quad (9)$$

其联合概率密度函数为

$$f_z(r) = \frac{d}{dr} F_z(r) = \frac{2\pi r}{(b-a)^2} \quad (10)$$

2) 由于节点在区域中的部署相互独立, 本文认

为 z_1, \dots, z_n 独立同分布, 有 $z_{\max} = \max_i(z_1, \dots, z_n)$ 。要计算概率分布函数 $F_{z_{\max}}(r)$ 和概率密度函数 $f_{z_{\max}}(r)$, 有

$$f_{z_{\max}}(r) = n f_z(r) (1 - F_z(r))^{n-1} = n \frac{2\pi r}{(b-a)^2} \left(1 - \frac{2\pi r^2}{(b-a)^2}\right)^{n-1} \quad (11)$$

3) 由式(4)可知, 节点到充电器的距离对于接收功率有着很大影响。通过联合分布, 可以计算区域中节点个数 n 与最远节点到中心点距离的期望 $E(z_{\max})$ 之间的关系。期望 $E(z_{\max})$ 可以通过式(12)计算。

$$E(z_{\max}) = \int_0^{\infty} r f_{z_{\max}}(r) dr = \int_0^{\infty} n r \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \left(1 - e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}\right)^{n-1} dr = \frac{n(b-a)}{\sqrt{\pi}} \left(-\frac{\sqrt{\pi}}{2} \left(1 - \frac{\pi}{2}\right)^n + \frac{4n(n!)^2}{(2n+1)!}\right) \quad (12)$$

使用 Wallis 公式进一步化简, 当 $n \rightarrow \infty$ 时, 有

$$E(z_{\max}) = -\frac{n(b-a)}{2} \left(1 - \frac{\pi}{4}\right)^n + \frac{m(b-a)}{2n+1} \quad (13)$$

当 $a=0, b=2$ 时, 节点个数 n 与最大半径的期望 $E(z_{\max})$ 之间的关系如图 2 所示。区域中节点越多, 半径的期望越大, 当区域内有 10 个节点时, 半径的期望是 0.95 (实线), 逐步接近但小于按照等边三角部署的充电器的固定半径 (虚线)。而半径的期望与充电器所需要的发射能耗有关。也就是说, 节点越少, 所需要的充电能耗越小。理论分析得到的结果可以反映出整体的统计规律, 而实际半径仍然需要由区域中节点的具体位置决定。

5 局部有效区域优化算法

根据前面的介绍, 可以知道: 1) 充电器能够充电的充要条件是覆盖的对象是所有节点的位置, 而不是所有区域, 当节点在区域中的位置固定或在若干个特定位置之间移动时, 往往可以用一个比蜂窝部署方式半径更小的圆覆盖这些位置; 2) 区域中节点位置的个数和分布情况与最小圆半径的期望之间存在一定关系, 区域内节点出现的位置越少, 半径的期望越小。本文依据这 2 个特点对充电器位置和能耗进行优化。

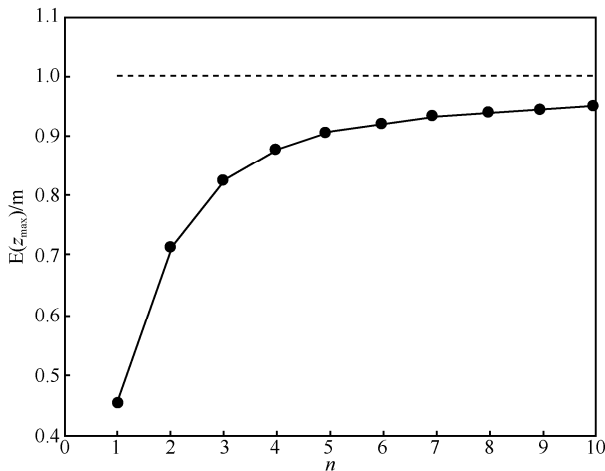


图 2 均匀分布情况下，区域中节点个数 n 与最大半径的期望 $E(z_{\max})$ 之间的关系

$$\min \int_{\Omega_e} \sum_{i=1}^N p_r^{(i)}(x, y) dx dy \quad (14)$$

传统的方法中，如式(8)所示，式中的 Ω 覆盖全部正六边形区域。但是，根据前面的分析，这并非必要条件，只需要覆盖所有节点出现的位置就可以。所以 Ω 可以变为 Ω_e ，即局部有效区域，覆盖所有节点出现的位置，如式(14)。对于单个充电器来说，图 3 反映了其传统覆盖区域和局部有效区域之间的不同。

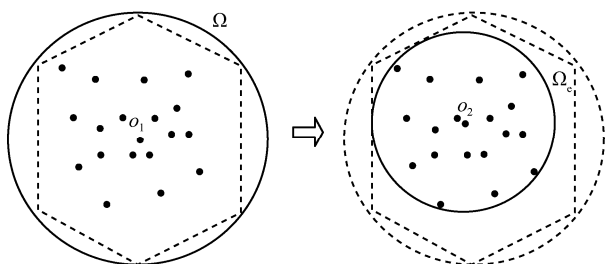


图 3 传统覆盖区域和局部有效区域

基于上述分析，对传统的等边三角形的布置方式进行局部优化，提出一种 WRSN 中固定充电器位置的优化方法，以 WISP 系统为例，所用方法步骤如下。

步骤 1 依据单个充电器能够充满节点的半径 r ，画出边长为 $\sqrt{3}r$ 的紧贴排列的等边三角形。不断扩展三角形数量，直到包含节点的区域被等边三角形完全覆盖。将这些三角形的顶点作为圆心，画出以 r 为半径的圆，这些圆心即为传统方法充电器原本应该部署的位置（如图 1 所示）。

步骤 2 将以 r 为半径的圆，相交的点依次连线，构成一个个正六边形。只保留区域中有节点的

正六边形，擦掉没有包含节点的正六边形。

步骤 3 在每一个正六边形区域中，寻找能够覆盖所有节点的最小覆盖圆(SEC)，即极小化极大位置(minimax location)问题。

步骤 4 依据找到的圆的圆心和半径来设置实际部署充电器的位置、发射功率、发射时间等参数。

在步骤 3 中，寻找最小覆盖圆(SEC)可以通过欧式投递男孩算法(Euclidean delivery boy algorithm)^[29]来实现，如图 4 所示。

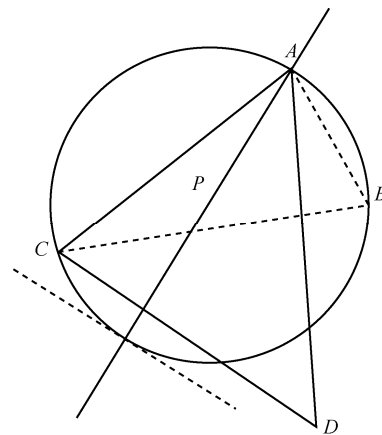


图 4 欧式投递男孩算法

- 1) 选择任意 2 个节点，然后进入步骤 2)。
- 2) 用这 2 个节点的连线定义一个圆的直径。如果该圆覆盖了所有节点，则停止。否则选择某个圆外的节点，以及已有的这 2 个节点，进入步骤 3)。
- 3) 如果这 3 个节点构成一个直角三角形或钝角三角形，丢弃那个大于或等于 90° 顶点的节点，并以剩下的 2 个节点回到步骤 2)。否则，如果三角形为锐角三角形，进入步骤 4)。
- 4) 如果 3 个节点定义的圆覆盖了所有节点，就停止。否则选择圆形外部的节点，称为节点 D ，然后将圆上距离 D 最远的那个节点称为 A 。延长节点 A 的那条直径，将平面分成 2 个半平面。将与 D 在同一个半平面的那个点称为 B ，而另一个点称为 C 。选择节点 A 、 C 和 D 进入步骤 3)。

通过上述步骤，就可以找到最小覆盖圆(SEC)的半径和位置，如图 5 所示。

在步骤 4)中，找到的最小覆盖圆(SEC)圆心的位置就是充电器应当放置的位置，而其半径 R_{SEC} 可以根据式(15)进一步计算所需要最小发射功率或发射时间。当 p_s 确定的时候，可以得到所需要的发射功率 p_t^{SEC} ，该功率与最小覆盖圆(SEC)半径

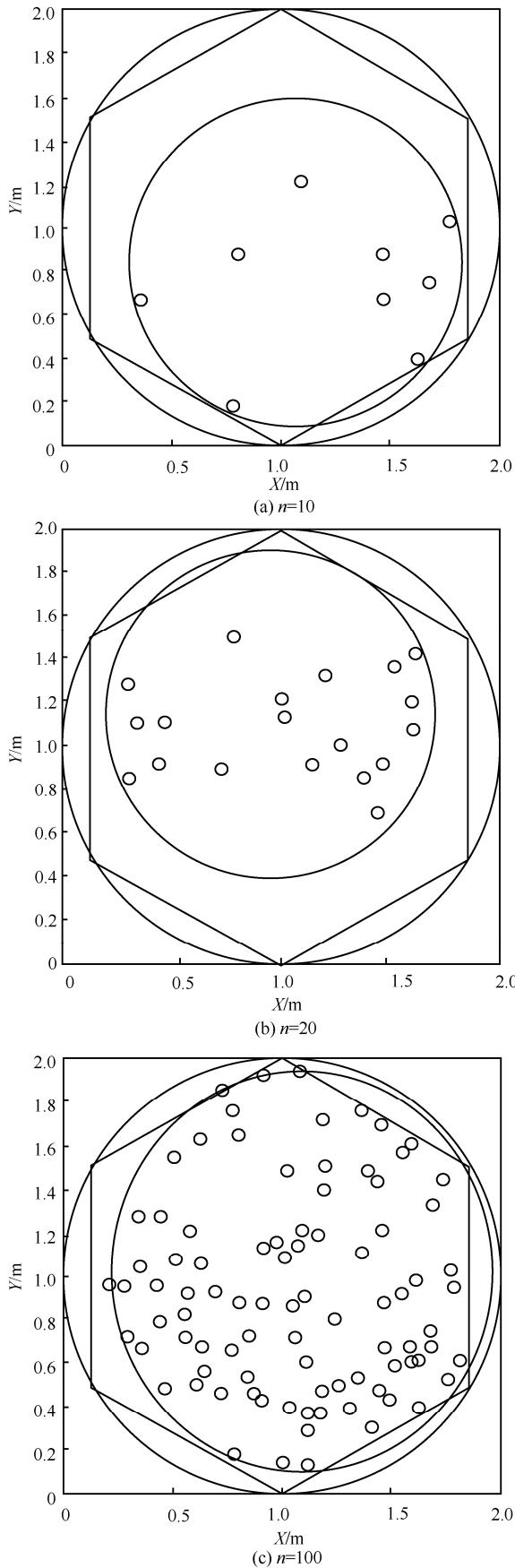


图 5 均匀分布条件下, 当 $n=10、20、100$ 时的最小覆盖圆(SEC)

有关, 其与传统方法的发射功率 $p_i^{\text{Tradition}}$ 之间存在如下关系

$$p_i^{\text{SEC}} = \frac{(R_{\text{SEC}} + \beta)^2}{(R + \beta)^2} \cdot p_i^{\text{Tradition}} \quad (15)$$

6 仿真实验

本节进行了基于 WISP 平台相关参数的仿真实验。该仿真的主要目标是验证算法节约能量的效果。通过实验, 考察在区域内标签个数 n 不同时, 外接圆半径的变化情况, 以及在此半径下充电器所需要的发射功耗情况。

根据之前的推导, 容易得到接收功率和距离之间的关系

$$p_r = \frac{\tau}{(d + \beta)^2} \quad (16)$$

$$\tau = \frac{G_t G_r \eta}{L_p} \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 p_t \quad (17)$$

其中, 本文使用 WISP4.1DL 提供的标签作为能源接收装置, 并且使用标准的商用 RFID 读写器 Octane3 Speedway 作为充电器。根据文献[28]的方法, 计算得到具体参数 $G_t = 8 \text{ dBi}$, $G_r = 2 \text{ dBi}$, $\lambda = 0.33 \text{ m}$, $\eta = 0.125$, $L_p = 3.193$ 。按照等边三角形部署的充电器的传统发射功率 p_t 最大为 1 W , $r_1 \approx 1 \text{ m}$, 发射功率保持固定不变。根据式(5), 可以得到 $\tau = 4.32 \times 10^{-4}$ 和调整因子 $\beta = 0.2316$ 。

对六边形区域中节点数量 n 从 2 到 20 进行仿真实验, 重复 1 000 次取平均, 用本文局部有效区域算法计算出最小覆盖圆的平均半径 R_{SEC} , 如图 6 所示。如果使用该半径作为充电器参数, 所需要的平均发射功率 p_i^{SEC} 如图 7 所示。

此外, 进行了节点个数从 2 到 100 的实验, 当传统正三角部署发射功率为 1 W 的时候, 本文节点所需要的平均发射功率 p_i^{SEC} 如图 8 所示。

仿真实验结果分析如下。

1) 最小覆盖圆 (SEC) 半径与节点数量的关系。从图 6 可以看出, 传统充电器半径 R 为 1 m 覆盖的正六边形区域中, 随着区域内节点数量的增多, 最小覆盖圆半径不断增大。当区域内只有 2 个节点的时候, 所需要的平均充电半径为 0.41 m , 当节点个数增加到 20 个的时候, 所需要的平均充电半径为 0.85 m 。

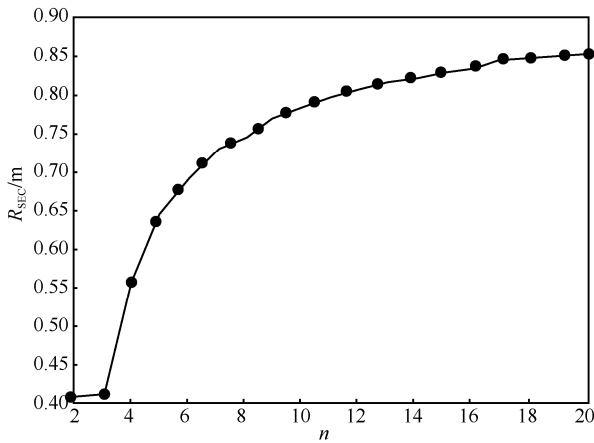


图 6 节点个数 n 从 2 到 20 时, 最小覆盖圆的平均半径 R_{SEC}

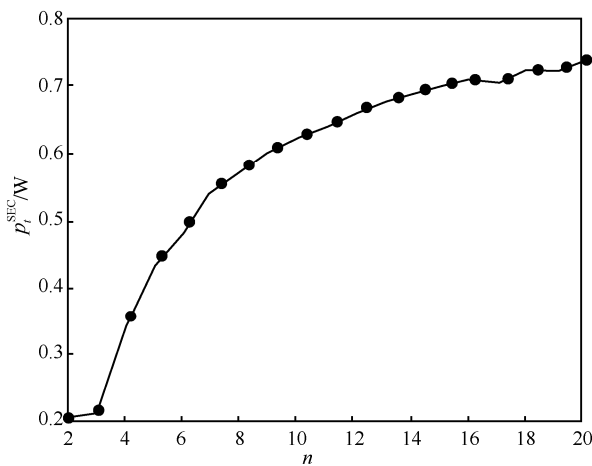


图 7 节点个数 n 从 2 到 20 时, 充电器所需平均发射功率 P_i^{SEC}

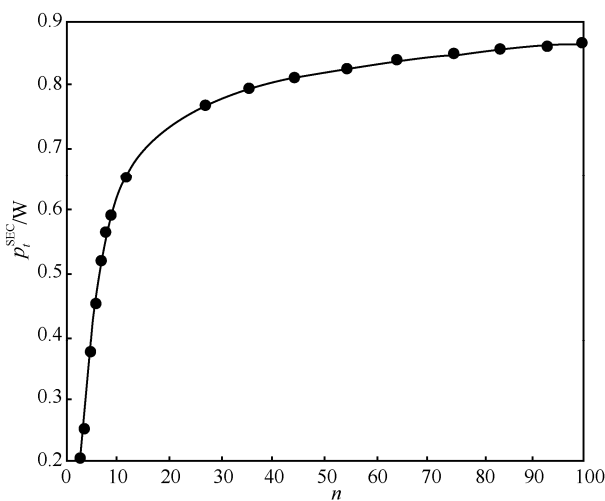


图 8 节点个数 n 从 2 到 100 时, 充电器所需平均发射功率 P_i^{SEC}

2) 所需充电发射功率与节点数量的关系。为了便于观察节点数量较少时候的情形, 本文分别进行了包含从 2 到 20 个节点和从 2 到 100 个节点的实验, 从图 7 可以看出, 传统充电器覆盖半径 R 为 1 m

的区域中, 传统发射功率 $P_i^{Tradition}$ 需要 1 W, 使用本文方法对充电器位置和发射功率进行优化后, 当节点个数为 2 个时, 所需要的充电器平均发射功率为 0.21 W, 当节点个数 20 个时, 所需要的充电器平均发射功率为 0.73 W; 从图 8 可以看出, 当节点个数为 100 个时, 所需要的充电器平均发射功率为 0.86 W。

如图 9 所示, 通过重复 1 000 次的仿真实验的平均结果可以看出, 使用本文的局部有效区域优化算法, 相比传统的等边三角形的部署方式, 根据区域中节点个数的不同, 有不同程度的节能效果, 区域内节点数量越少, 平均所需要的发射功率越低。

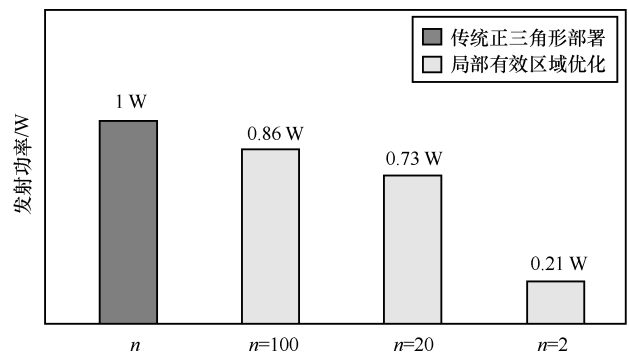


图 9 传统正三角形部署和本局局部有效区域优化算法在不同节点个数情况下充电器所需要的平均发射功率

7 结束语

本文研究了 WRSN 中固定方式充电器部署位置的优化问题, 建立了充电器覆盖区域内充电器到最远节点距离 (即最小充电半径) 的数学模型, 分析了均匀分布条件下节点个数与最小充电半径期望的关系, 据此提出了一种充电器位置部署的局部有效区域优化方法。对于传统的等边三角形的部署方法, 覆盖所有区域是充分不必要条件; 而本文方法覆盖所有节点的位置, 是充电的充要条件。该算法根据所有需要充电的节点的位置, 采用最小覆盖圆 (SEC) 方法, 通过欧式男孩投递算法寻找充电器的最优位置。其节能效果与区域内的节点数量有关, 本文使用基于 RFID 的无线充电平台 WISP 来进行仿真实验。通过大量仿真实验, 发现相比于传统的等边三角形的部署形式, 该方法能够从不同程度上降低能耗: 在重复 1 000 次的随机试验中, 当区域中有 2 个节点时, 平均可以降低 79% 的发射功率; 而当区域中有 100 个节点时, 也能降低 14% 的发射功率。实验结果显示, 区域中的节点数量或节点出现的位置

越少, 节约的能量越多。实验结果反映出了降低能耗的统计规律, 对于单次实验来说, 实际降低多少能耗, 与区域内节点个数和节点具体位置有关。

参考文献:

- [1] STOJKOSKA B R, AVRAMOVA A P, CHATZIMISIOS P. Application of wireless sensor networks for indoor temperature regulation[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2014 (1): 975-978.
- [2] KAFI M A, CHALLAL Y, DJENOURI D, et al. A study of wireless sensor networks for urban traffic monitoring: applications and architectures[J]. Procedia Computer Science, 2013, 19(Complete): 617-626.
- [3] RAJBA S, RAIF P, RAJBA T, et al. Wireless sensor networks in application to patients health monitoring[C]//IEEE Symposium on Computational Intelligence in Healthcare & E-health. IEEE, 2013:94-98.
- [4] RAGHUNATHAN V, KANSAL A, HSU J, et al. Design considerations for solar energy harvesting wireless embedded systems[C]//International Symposium on Information Processing in Sensor Networks. IEEE Press, 2005.
- [5] MENINGER S, MUR-MIRANDA T O, AMIRTHARAJAH R, et al. Vibration-to-electric energy conversion[C]//International Symposium on Low Power Electronics and Design, 2005:48-53.
- [6] PARK C, CHOU P H. AmbiMax: autonomous energy harvesting platform for multi-supply wireless sensor nodes[C]//Sensor & Ad Hoc Communications & Networks, Secon 06 IEEE Communications Society. IEEE, 2006:168-177.
- [7] YANG Y, WANG C, LI J. Wireless rechargeable sensor networks - Current status and future trends[J]. Journal of Communications, 2015, 10(9): 696-706.
- [8] YANG Y, WANG C, LI J. Power sensor networks by wireless energy - Current status and future trends[C]// 2015 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC). 2015: 648-652.
- [9] TALLA V, KELLOGG B, RANSFORD B, et al. Powering the next billion devices with Wi-Fi[J]. Economics Papers from University Paris Dauphine, 2015, 3(2): 17.
- [10] BUETTNER M, PRASAD R, SAMPLE A, et al. RFID sensor networks with the Intel WISP[C]//International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, SENSYS 2008. 2008: 393-394.
- [11] XIE L, SHI Y, HOU Y T, et al. Bundling mobile base station and wireless energy transfer: modeling and optimization[C]//INFOCOM, 2013 Proceedings IEEE. IEEE, 2013:1636-1644.
- [12] XIE L, SHI Y, HOU Y T, et al. Making sensor networks immortal: an energy-renewal approach with wireless power transfer[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2012, 20(6):1748-1761.
- [13] SHI Y, XIE L, HOU Y T, et al. On renewable sensor networks with wireless energy transfer[C]//INFOCOM, 2011 Proceedings IEEE. IEEE, 2012:1350-1358.
- [14] FU L, CHENG P, GU Y, et al. Minimizing charging delay in wireless rechargeable sensor networks[C]//INFOCOM, 2013 Proceedings IEEE. IEEE, 2013:2922-2930.
- [15] CHIEN W C, CHO H H, LAI C F, et al. Dynamic charging planning for indoor WRSN environment by using self-propelled vehicle[C]// International Conference on Knowledge Management in Organizations. Springer, Cham, 2017:547-559.
- [16] GU Y, LO A, NIEMEGERERS I. A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2009, 11(1):13-32.
- [17] BUETTNER M, PRASAD R, PHILIPOSE M, et al. Recognizing daily activities with RFID-based sensors[C]//International Conference on Ubiquitous Computing. ACM, 2009:51-60.
- [18] WEINSTEIN R. RFID: a technical overview and its application to the enterprise[J]. It Professional, 2005, 7(3):27-33.
- [19] PHILIPOSE M, SMITH J R, JIANG B, et al. Battery-free wireless identification and sensing[J]. IEEE Pervasive Computing, 2005, 4(1): 37-45.
- [20] SAMPLE A P, YEAGER D J, POWLEDGE P S, et al. Design of an RFID-based battery-free programmable sensing platform[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2008, 57(11): 2608-2615.
- [21] SAMPLE A P, BUETTNER M, GREENSTEIN B, et al. Revisiting smart dust with RFID sensor networks[C]//ACM Workshop on Hot Topics in Networks. 2008.
- [22] 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.
- [23] ZHANG H H, HOU J C. Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks[J]. Ad Hoc & Sensor Wireless Networks, 2005, 1(2).
- [24] STOYAN Y G, PATSUK V M. Covering a compact polygonal set by identical circles[J]. Computational Optimization and Applications, 2010, 46(1): 75-92.
- [25] KERSHNER R. The number of circles covering a set[J]. American Journal of Mathematics, 1939, 61(3): 665-671.
- [26] WANG X, XING G, ZHANG Y, et al. Integrated coverage and connectivity configuration in wireless sensor networks[C]// International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. ACM, 2003:28-39.
- [27] TIAN Y, CHENG P, HE L, et al. Exploiting time of charge to achieve collision-free communications in WRSN[C]//International Conference on Heterogeneous Networking for Quality, Reliability, Security and Robustness. IEEE, 2014:115-121.
- [28] 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.
- [29] ELZINGA J, HEARN D W. Geometrical solutions for some minimax location problems[J]. Transportation Science, 1972, 6(4): 379-394.

作者简介:



何灏 (1987-), 男, 云南昆明人, 中国科学院大学博士生, 主要研究方向为无线传感器网络、图像处理。

陈永锐 (1978-), 男, 湖南湘潭人, 中国科学院大学副教授, 研究方向为无线传感器网络、协作通信。

易卫东 (1959-), 男, 云南昆明人, 中国科学院大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线传感器网络及其相关应用。

李鸣 (1987-), 男, 山东青岛人, 中国科学院大学博士生, 主要研究方向为传感器技术。