

# 射频能量捕获无线传感网中占空比最佳的能量源布置方法

池凯凯<sup>1,2</sup> 林一民<sup>1</sup> 李燕君<sup>1</sup> 程 珍<sup>1</sup>

(浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310023)<sup>1</sup>

(浙江省可视媒体智能处理技术研究重点实验室 杭州 310023)<sup>2</sup>

**摘 要** 无线射频能量传输技术在为下一代无线传感器网络供能方面具有广阔的应用前景。射频能量捕获无线传感网由于能量捕获速率非常有限,通常工作在极低的占空比模式下。因此这类无线传感器网络的一个基本问题就是如何配置给定数量的射频能量源(Energy Transmitters, ETs),从而最大化最糟糕(即具有最低能量捕获速率)节点的能量捕获速率,即最大化其占空比。首先对能量源最优布置问题建模,为深入了解该问题提供理论基础;然后分别提出了贪婪式 ETs 布置方法和基于粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)的 ETs 布置方法。仿真结果显示,相较于均匀布置方法,所提出的两种能量源布置方法能够极大地提高全网最低占空比。

**关键词** 无线传感器网络,射频能量捕获,能量源布置,占空比最优

中图分类号 TN911.2 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.03.028

## Energy Transmitter Placement to Optimize Duty Cycle of RF Energy Harvesting Wireless Sensor Networks

CHI Kai-kai<sup>1,2</sup> LIN Yi-min<sup>1</sup> LI Yan-jun<sup>1</sup> CHENG Zhen<sup>1</sup>

(School of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)<sup>1</sup>

(Key Laboratory of Visual Media Intelligent Process Technology of Zhejiang Province, Hangzhou 310023, China)<sup>2</sup>

**Abstract** Radio frequency (RF)-based wireless energy transfer is one of promising techniques to power the next-generation wireless sensor networks (WSNs). Due to the very limited energy harvesting rate, the RF energy harvesting WSNs usually operate in the ultra low duty cycle mode. So one fundamental issue of this kind of WSNs is how to deploy a given number of energy transmitters (ETs) so as to maximize the minimum duty cycle of all nodes. Firstly, this paper analyzed this optimal ET placement problem so as to deeply and theoretically understand it. Then the greedy approach and the particle swarm optimization (PSO) based approach were presented for this problem. Simulation results show that the proposed approaches can significantly improve the duty cycle when compared to the even placement of ETs.

**Keywords** Wireless sensor networks, RF energy harvesting, Energy transmitter placement, Duty cycle optimization

## 1 引言

众所周知,由电池供能的无线传感器网络的生存时间非常有限,该不足严重阻碍了其在实际场景中的广泛应用。而能够从环境中捕获能量的传感器节点满足了无线传感器网络可持续运作的需求。在不同的能量捕获技术中,无线电射频(Radio Frequency, RF)能量捕获技术在给无线传感器网络节点供能方面有着广泛的应用前景。无线电射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)系统就是射频能量捕获技术中的一种典型应用。在该系统中,RFID 标签工作所需的能量全部来自于其接收 RFID 阅读器发射出来的射频能量。传统的 RFID 标签没有感知和计算功能,而近年来研究人员设计出了具有感知、计算和通讯能力的无线认证感知平台

(WISP)<sup>[1]</sup>,该平台由 RFID 阅读器提供能量并且可以从中读取信息。最近,研究人员还实现了标签与标签之间的相互通信,这种标签同样具有射频能量捕获功能<sup>[2]</sup>。

需要强调的是,通常射频能量捕获速率非常低。在典型情况下,WISP 标签的整流输出功率是微瓦级,而在工作状态下标签消耗的功率是毫瓦级<sup>[1]</sup>。因为射频能量捕获所得到的功率非常低,所以由射频能量供能的无源传感器节点必须工作在极低的占空比模式下。在射频能量捕获无线传感网(RF Energy Harvesting Wireless Sensor Networks, RFEH-WSNs)中,一个传感器节点的最大可能的占空比取决于其能量捕获速率的大小,也即取决于能量源(Energy Transmitters, ETs)的摆放位置。对于传感器节点,ETs 离得越近,则能量捕获速率越大。因此,RFEH-WSNs 需要考虑的一个基本问题就是

到稿日期:2016-02-24 返修日期:2016-06-20 本文受国家自然科学基金(61472367,61432015),浙江省自然科学基金(LY15F020029,LY15F020027)资助。

池凯凯(1980—),男,博士,副教授,主要研究方向为无线网络,E-mail:kkchi@zjut.edu.cn;林一民(1992—),男,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络;李燕君(1982—),女,博士,副教授,主要研究方向为无线传感器网络;程 珍(1981—),女,博士,副教授,主要研究方向为网络安全。

如何布置给定数量的能量源的位置,从而最大化最糟糕(即具有最低能量捕获速率)节点的能量捕获速率,即最大化其占空比。这个问题具有实际意义,因为在一些收集传感数据的应用中,人们期待所有节点的最低采样率(即最小的能量捕获速率)尽可能大,从而实现一个更加平衡的感知系统。

目前,关于射频能量源放置问题的相关研究已有一些成果<sup>[3-6]</sup>。Erol-Kantarci 等人<sup>[3]</sup>考虑了一个移动 ET 的最优访问地点以最大化用户自定义任务的收益。He 等人<sup>[4]</sup>考虑用最少的 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。他们的方案是受传统区域覆盖问题和一个等边三角形的放置模型的启发而设计的。Fu 等人<sup>[5]</sup>考虑到了另外一种场景,ETs 在场景内移动,研究 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。文献<sup>[6]</sup>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,其能满足每个传感器节点的捕获功率不小于捕获功率的需求,同时使得 ETs 的个数最小化。

以上工作要么考虑可移动的 ET 的最优访问地点和停留时间,要么研究 ETs 的最少化部署。不同于这些工作,本文考虑另外一种 ETs 布置问题:在 ETs 个数  $K$  给定的情况下,如何将 ETs 布置在不同的位置上以最大化全网所有节点的最小占空比。

首先对能量源最优化布置问题进行建模,为深入了解该问题提供理论基础;然后分别提出了贪婪式 ETs 布置方法和基于粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)的 ETs 布置方法。贪婪式 ETs 布置方法是先在监视区域中随机布置  $K$  个 ETs,然后逐步贪婪地改善 ETs 的分布位置,直到 ETs 的位置不能再被改善为止;基于 PSO 的 ETs 布置方法先随机生成一定数目的粒子,每个粒子表示所有  $K$  个 ETs 的一种部署方案,通过反复迭代来不断改进粒子性能,从而搜索出较优的部署方案。

## 2 射频能量捕获模型

节点能量捕获输出功率用  $P_h$  表示。在单个 ET 的情况下,节点接收到的信号功率  $P_r$  可以用以下 Friis 自由空间传输方程表示:

$$P_r = G_t G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 P_t \quad (1)$$

值得注意的是,将接收信号进行整流以对储能设备进行充电存在一定的电能损耗。用  $\eta$  表示整流效率,  $0 < \eta < 1$ 。另外,通过进一步考虑天线极化损耗以及基于 Friis 自由空间方程在  $d=0$  时接收功率为无穷大的不足,文献<sup>[1,4-5]</sup>等给出了以下单个 ET 情况下的射频能量捕获模型:

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

其中,  $G_t$  是源天线增益,  $G_r$  是接收天线增益,  $L_p$  是极化损耗,  $\lambda$  是波长,  $P_t$  是 ET 的发送功率。对于射频能量捕获该短距离信号传输场景, Friis 自由空间方程中的  $d$  被调整为  $d+\epsilon$ ,  $\epsilon$  是一个固定的小参数,从而解决 Friis 自由空间方程在  $d=0$  时接收功率为无穷大的问题。

本文考虑通信频段与提供能量的射频频段不一样的情况,无论节点是在通信状态还是休眠状态,节点都一直捕获射频能量。当一个节点的周围分布多个 ETs 时,节点捕获到的

总能量是节点从各个独立的 ET 捕获到的射频能量的总和。

## 3 问题建模

定义如下符号:

1)  $N$  表示布置在二维区域中传感器节点的数量,第  $j$  个节点的坐标用  $(x_j^{(j)}, y_j^{(j)})$  表示,  $j=1, 2, \dots, N$ 。

2)  $K$  表示给定的 ETs 的数量,第  $i$  个 ET 被布置的位置坐标用  $(x_i^{(i)}, y_i^{(i)})$  表示,  $i=1, 2, \dots, K$ 。

3)  $P_a$  和  $P_q$  分别表示节点在工作状态和休眠状态下的功率。同时,用  $\alpha$  代表占空比,表示节点工作时间所占百分比。因此,节点的平均功耗为  $P = \alpha P_a + (1-\alpha) P_q$ 。

4)  $d_{i,j}$  表示第  $i$  个 ET 与第  $j$  个节点之间的距离,即

$$d_{i,j} = \sqrt{(x_i^{(i)} - x_j^{(j)})^2 + (y_i^{(i)} - y_j^{(j)})^2}$$

根据式(2)可知,节点  $j$  从第  $i$  个 ET 捕获的功率为  $\eta \frac{G_t G_r}{L_p} \left( \frac{\lambda}{4\pi(d_{i,j} + \epsilon)} \right)^2 P_t$ , 因此节点  $j$  从所有  $K$  个 ETs 所捕获的总功率为:

$$P_h^{(j)} = \sum_{i=1}^K \eta \frac{G_t G_r}{L_p} \left( \frac{\lambda}{4\pi(d_{i,j} + \epsilon)} \right)^2 P_t \quad (3)$$

最大化  $N$  个节点中最糟糕节点的占空比等价于最大化  $N$  个节点中最小的捕获功率  $P_h^{\min}$ 。  $P_h^{\min}$  为:

$$P_h^{\min} = \min\{P_h^{(j)} : j=1, 2, \dots, N\} \quad (4)$$

将本文考虑的最优 ETs 布置问题(Optimal ETs Placement, OETP)建模,如图 1 所示。

给定: $N, K, P_t, (x_i^{(i)}, y_i^{(i)}), i=1, 2, \dots, N$ 目标函数: $\max P_h$ 变量: $(x_j^{(j)}, y_j^{(j)}), j=1, 2, \dots, K$ 约束条件: $P_h^{(j)} \geq \bar{P}_h, \forall i=1, 2, \dots, N$
---

图 1 ETs 最优 ETs 布置问题的数学建模

一旦解决该 OETP 问题从而找到最大的  $\bar{P}_h$  后,就可以通过公式  $\bar{P}_h = \alpha^* P_a + (1-\alpha^*) P_q$  求得相应的全部节点的最小占空比  $\alpha^*$ 。

该问题的不等式约束函数是非线性和非凸的,所以 OETP 问题是一个非线性的同时也是一个非凸最优化的问题,要求解出其最优解是非常困难的。下面分别阐述所提出的贪婪式 ETs 布置方法和基于粒子群优化的 ETs 布置方法。

## 4 贪婪式 ETs 布置方法

本算法的主要思想是:首先在监视区域中随机布置  $K$  个 ETs,然后逐步改善 ETs 的分布位置,直到 ETs 的位置不能再被改善为止。在每一步的 ETs 位置改善操作中,改善最差 ET 的位置,具体如下:寻找能量捕获率最低的节点 A 以及距离 A 最近的 ET B;将 ET B 沿 A 和 B 的直线方向向节点 A 移动固定长度的一小段距离  $\Delta d$ (称为步长),从而就确定了 B 的新坐标位置,而其他 ETs 位置保持不变,如图 2 所示。B 在新的坐标位置时,显然节点 A 的能量捕获速率有所提高,但可能存在一些节点(如图 2 中的节点 C)由于 B 的移动而与 B 的距离变远,从而能量捕获速率下降。如果 B 在新的坐标位置时对应的  $P_h^{\min}$  比 B 在上一步位置时对应的  $P_h^{\min}$  大,则继续执行下一步的 ETs 位置操作;否则贪婪式 ETs 布置方法终止,最终的 ETs 位置为先前一步的 ETs 位置。

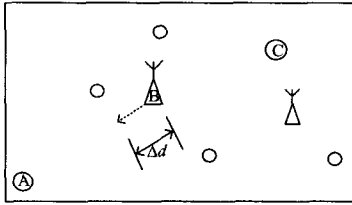


图2 ETs位置改善示意图

算法中的  $\Delta d$  取值一般较小,其取值越小则每轮 ETs 的位置更新步伐越小,最后的布置方案会离局部最优方案越近,但算法循环执行 ETs 位置改善操作的次数会越多,即越耗时。

本方法虽然是贪婪式方法,复杂度非常低,但很有可能陷入局部最优,因此运行本方法多次(比如 3000 次),然后挑选出其中最佳的 ETs 布置方案作为最终布置方案。

算法 1 给出了贪婪式 ETs 布置方法的细节。

#### 算法 1 贪婪式 ETs 布置方法

Input:  $N, K, (x_i^{(s)}, y_i^{(s)}), i=1, 2, \dots, N$

Output:  $(x_j^{(t)}, y_j^{(t)}), j=1, 2, \dots, K$

Main procedures

1. 随机生成  $K$  个 ETs 的坐标位置,每个 ET 的坐标位置处于监视区域中,并且通过式(3)和式(4)计算相应的  $P_h^{\min}$ ;
2.  $P_h^* = 0$
3. while(TRUE)
4.  $P_h^* \leftarrow P_h^{\min}$ ;
5. 寻找能量捕获功率最低的节点 A 以及距离节点 A 最近的 ET B;
6. 用  $(x_j^{(t)}, y_j^{(t)})$  表示 B 的当前坐标,用  $(\bar{x}_j^{(t)}, \bar{y}_j^{(t)})$  表示 B 向 A 移动  $\Delta d$  后的坐标,计算 B 向 A 移动  $\Delta d$  后的坐标所对应的  $P_h^{\min}$ ;
7. if( $P_h^{\min} > P_h^*$ )
8. {更新 B 的坐标:  $x_j^{(t)} = \bar{x}_j^{(t)}, y_j^{(t)} = \bar{y}_j^{(t)}; P_h^* \leftarrow P_h^{\min};$ }
9. else
10. return;
11. end while

## 5 基于粒子群优化的 ETs 布置方法

由于贪婪式算法容易陷入局部最优,因此进一步提出了基于 PSO(即粒子群优化)的 ETs 布置方法来解决 OETP 问题。

PSO 是一种进化计算技术,源于对鸟群捕食行为的研究。该算法最初是受飞鸟集群活动、动物追逐等群体行为的启发,进而利用群体智能建立一个简化模型<sup>[7]</sup>。PSO 在对动物集群活动行为进行观察的基础上,利用群体中的个体对信息的共享使整个群体的运动在问题求解空间中产生从无序到有序的演化过程,从而得到最优解。

PSO 中,用  $M$  表示粒子(比如说鸟)的个数,每一个粒子  $i$  有一个位置向量  $x_i$  和速度向量  $v_i$ 。位置向量  $x_i$  模拟优化问题中的一个候选解,速度向量  $v_i$  表示候选解的变化趋势。为了得到最优的解决方案, $M$  个粒子一起不断地迭代更新它们的位置和速度向量。 $x_i$  和  $v_i$  的更新公式如下:

$$\begin{cases} v_i \leftarrow \omega v_i + \varphi_p r_p (p_i - x_i) + \varphi_g r_g (p_g - x_i) \\ x_i \leftarrow x_i + v_i \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $p_i$  是第  $i$  个粒子搜索到的最优位置,  $p_g$  表示整个集群(即  $M$  个粒子)搜索到的最优位置,  $r_p$  和  $r_g$  是两个  $(0, 1)$  间的随机数,  $\varphi_p$  和  $\varphi_g$  是用于控制 PSO 方法效率的常数。

对于 OETP 问题,定义粒子  $i$  的位置向量  $x_i$  作为  $K$  个

ETs 的坐标,也即  $2K$  个维度的向量  $x_i = (x_i^{(1)}, y_i^{(1)}, x_i^{(2)}, y_i^{(2)}, \dots, x_i^{(K)}, y_i^{(K)})$ 。 $x_i$  的适应度  $f(x_i)$  为其在式(4)中对应的  $P_h^{\min}$  值。

在开始阶段, $M$ (例如  $M=20$ )个粒子中的每个粒子的位置向量  $x_i$  所包含的  $K$  个节点坐标是在监视区域中随机产生的,每个粒子的速度  $v_i$  初始化为 0。为了寻找最优解,基于粒子群优化的方法根据式(5)反复迭代更新每个粒子现有的速度向量  $v_i$  以及坐标向量  $x_i$ 。

PSO 算法反复迭代到一个固定数值次数(定义为迭代次数)后终止。

算法 2 给出了基于 PSO 的 ETs 布置方法的细节。

#### 算法 2 基于粒子群优化的 ETs 布置方法

Input:  $N, K, M, (x_i^{(s)}, y_i^{(s)}), i=1, 2, \dots, N$

Output:  $(x_j^{(t)}, y_j^{(t)}), j=1, 2, \dots, K$

Main procedures

1. for  $i=1$  to  $M$  do //初始化粒子信息
2. 初始化第  $i$  个粒子的初始位置  $x_i$ :  $x_i$  中 ET 的坐标在最小覆盖区域中随机挑选;
3. 初始化粒子的初始速度  $v_i$ :  $v_i=0$ ;
4. 初始化第  $i$  个粒子的最优位置为它的初始位置  $p_i \leftarrow x_i$ ;
5. end for
6. 在  $\{p_i; i=1, 2, \dots, M\}$  里找出最好的  $p_g$  并且初始化整个集群的最佳已知位置  $p_g \leftarrow p_i$ ;
7. for  $i=1$  to 迭代次数 do
8. for  $i=1$  to  $M$  do
9. 根据式(4)更新第  $i$  个粒子的速度向量  $v_i$  和位置向量  $x_i$ ;
10. if ( $f(p_i) < f(x_i)$ )
11.  $p_i \leftarrow x_i$ ;
12. if ( $f(p_g) < f(x_i)$ )
13.  $p_g \leftarrow x_i$ ;
14. end for
15. end for

## 6 实验仿真

实验评估比较了 3 种 ETs 布置方法:均匀 ETs 布置方法、贪婪式 ETs 布置方法和基于 PSO 的 ETs 布置方法。均匀布置方法是将监视区域均匀地划分为  $K$  块非重叠的正方形,同时每个正方形的中心位置放置一个 ET。能量捕获模型(即式(2))的相关参数及其他一些参数的取值如表 1 所列<sup>[1,5]</sup>。在贪婪式算法中,ETs 移动一步的步长设为 0.01m,ET 最终位置确定为 3000 次运行中最佳的位置坐标。在粒子群算法中,采用比较通用的参数值设置:迭代次数为 2000,  $M=20, \omega=0.7298, \varphi_p=1.49618$  以及  $\varphi_g=1.49618$ 。

表 1 参数取值

参数	仿真取值
$\eta$	0.3
$G_s$	8dB
$G_r$	2dB
$L_p$	3dB
$\lambda$	0.33m
$\epsilon$	0.2316m
$P_t$	1W
$P_a$	$1.08 \times 10^{-3} \text{ W}$
$P_q$	$1.8 \times 10^{-6} \text{ W}$

首先,考虑传感器节点均匀分布的场景。对于该场景,由

于节点在区域中均匀规则分布,因此采用均匀 ETs 布置方法是一种简单且有效的选择,其保证了所有节点有接近的能量捕获速率。将  $N$  个传感器节点有规律地布置在一个  $10 \times 10$  ( $\text{m}^2$ ) 的监视区域内,具体来说,监视区域被等面积地划分为  $N$  个非重叠的正方形,每个正方形中心点上放置一个传感器节点。图 3 示出了 3 种方法的占空比。从图中可以看出,与均匀布置方法相比,所提出的两种方法极大地提高了网络的最小占空比,如  $L=25, K=4$  时,贪婪式 ETs 布置方法和基于 PSO 的 ETs 布置方法分别提高了约 44.5% 和 51.5%。这表明,虽然均匀布置方法具有一定的合理性,但所提两种布置方法能找到比均匀布置方法更好的 ETs 布置方案。

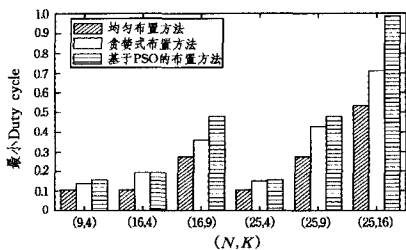


图3 节点规则分布场景下的占空比

其次,考虑更具有一般性的传感器节点随机分布的场景。将  $N$  个传感器节点随机地布置在一个  $10 \times 10$  ( $\text{m}^2$ ) 的监视区域内。图 4 示出了在  $N=20$  且 ETs 不同的情况下,3 种布置方法在多次仿真下最低占空比的平均值,可以得出与上述相同的结论。如当  $K=3$  时,贪婪式 ETs 布置方法和基于粒子群优化的 ETs 布置方法分别提高了约 99.3% 和 261.3%。

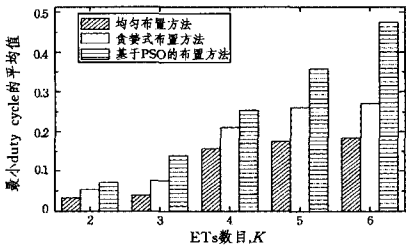


图4 节点随机分布场景下的占空比( $N=20$ )

最后,贪婪算法比粒子群算法的运行速度更快,因此可以

应用于传感器节点数量  $N$  非常大的情况。

**结束语** 本文考虑射频能量捕获无线传感网中射频能量源 ETs 的最优布置问题,提出了两种最大化所有节点占空比最小值的能量源布置方法:贪婪式 ETs 布置方法和基于 PSO 的 ETs 布置方法。仿真结果显示,相较于 ETs 均匀布置的情况,所提出的两种方法可以显著地提高全网最低占空比,提高率甚至可以达到几倍,具体取决于网络场景。

## 参考文献

- [1] 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 and Measurement, 2008, 57(11): 2608-2615.
- [2] PARKS A N, LIU A, GOLLAKOTA S, et al. Turbocharging ambient backscatter communication[C]// ACM Conference on Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM). ACM, 2014: 619-630.
- [3] EROL-KANTARCI M, Mouftah H T. Mission-aware placement of RF-based power transmitters in wireless sensor networks[C]// 2012 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC). IEEE, 2012: 12-17.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] KENNEDY J, EBERHART R C. Particle swarm optimization. Encyclopedia of Machine Learning [C] // IEEE International Conference on Neural Networks. IEEE, 1995: 1942-1948.
- [8] different propagation environments[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2002, 51(5): 823-838.
- [9] ERTEL R B, REED J H. Angle and time of arrival statistics for circular and elliptical scattering models[J]. Journal on Selected Areas in Communications, IEEE, 1999, 17(11): 1829-1840.
- [10] PETRUS P, REED J H, RAPPAPORT T S. Geometrical-based statistical macrocell channel model for mobile environments[J]. Transactions on Communications, IEEE, 2002, 50(3): 495-502.
- [11] PEI F, ZHANG J H, PAN C. Elevation angle characteristics of urban wireless propagation environment at 3.5 GHz[C]// IEEE 78th Vehicular Technology Conference (VTC Fall). 2013: 1-5.
- [12] KALLIOLA K, SULONEN K, LAITINEN H, et al. Angular power distribution and mean effective gain of mobile antenna in
- [13] AULIN T. A modified model for the fading signal at a mobile radio channel[J]. Transactions on Vehicular Technology, IEEE, 1979, 28(3): 182-203.
- [14] PARSONS J D. The mobile radio propagation channel[M]. New York: John Wiley, 2000: 25-30.
- [15] QU S X, YEAP T. A three-dimensional scattering model for fading channels in land mobile environment[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1999, 48(3): 765-781.
- [16] GRADSHTEYN I S, RYZHIK I M. Table of integrals, series, and products[M]. New York: Academic Press, 2007: 160-170.

(上接第 88 页)

- [9] ERTEL R B, REED J H. Angle and time of arrival statistics for circular and elliptical scattering models[J]. Journal on Selected Areas in Communications, IEEE, 1999, 17(11): 1829-1840.
- [10] PETRUS P, REED J H, RAPPAPORT T S. Geometrical-based statistical macrocell channel model for mobile environments[J]. Transactions on Communications, IEEE, 2002, 50(3): 495-502.
- [11] PEI F, ZHANG J H, PAN C. Elevation angle characteristics of urban wireless propagation environment at 3.5 GHz[C]// IEEE 78th Vehicular Technology Conference (VTC Fall). 2013: 1-5.
- [12] KALLIOLA K, SULONEN K, LAITINEN H, et al. Angular power distribution and mean effective gain of mobile antenna in