

# 吞吐量最大化的二维无线能量传输算法

姚信威<sup>1</sup> 郑星航<sup>1</sup> 王万良<sup>1</sup> 赵 澄<sup>1</sup> 杨双华<sup>1,2</sup>

(浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310023)<sup>1</sup> (英国拉夫堡大学计算机系 莱斯特郡 LE11 3TU)<sup>2</sup>

**摘 要** 针对无线网络中节点能量的局限性,提出了一种网络吞吐量最大化的二维无线能量传输优化算法。根据各节点捕获能量的时域分布,依次从节点维度和时间维度进行节点间的能量分配和传输。根据两节点间的高斯双工信道模型,建立基于能量传输的网络吞吐量模型。引入节点维度和时间维度的能量传输效率,建立了能量传输解析模型,并提出二维无线能量传输算法,实现了网络吞吐量最大化。实验结果表明,该算法能有效地优化网络节点能量分配,提高网络的总吞吐量。

**关键词** 无线能量传输,能量采集,吞吐量最大化,无线网络

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.11.034

## Bi-dimensional Wireless Energy Transfer Algorithm for Maximum Network Throughput

YAO Xin-wei<sup>1</sup> ZHENG Xing-hang<sup>1</sup> WANG Wan-liang<sup>1</sup> ZHAO Cheng<sup>1</sup> YANG Shuang-hua<sup>1,2</sup>

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

(Department of Computer Science, Loughborough University, Leicestershire LE11 3TU, UK)<sup>2</sup>

**Abstract** A bi-dimensional wireless energy transfer optimization algorithm for maximum network throughput was proposed to overcome the limited energy of each node in wireless network. Due to the inequality of energy distribution of each node, some energy is transferred successively in node dimension and time dimension to optimize the energy allocation among wireless nodes. Network throughput model was presented by integrating the Gaussian two-way communication model of two wireless nodes and wireless energy transfer. To obtain the maximum network throughput, an analytical energy transfer model was also presented by introducing the energy transfer efficiency of node dimension and time dimension, and a bi-dimensional energy transfer mechanism was proposed based on the model analysis. Experimental results demonstrate that the proposed mechanism can effectively optimize the energy distribution among wireless nodes, and maximize the total network throughput.

**Keywords** Wireless energy transfer, Energy harvesting, Throughput maximization, Wireless networks

## 1 引言

随着无线网络技术的发展,无线节点的能量局限性已经成为影响无线网络性能的主要因素之一。然而,现有的有线充电方式无法适用于无线网络中移动节点的实时供电;同时,由于无线网络环境中分布着大量的无线节点,也无法对每个节点更换电池。因此,研究者逐渐将目光转移到无线网络中的无线能量传输技术(即无接触感应电能传输技术),并进行深入的研究<sup>[1]</sup>。

在未来的无线网络中,携带能量收发模块的网络节点能从外界环境中采集能量,并且采用无线能量传输技术可以将能量通过无线电传输到其它节点,使网络节点能从外界环境或者其他节点处获得足够维持自己正常工作所需的能量。无线能量传输是无线通信中一个相对较新的概念,但它已经被

运用于多个系统中。例如,在光通信或者太空任务中使用微波进行能量传输。然而,这些系统总是需要特定的硬件或基础设施来实现,不能直接应用于无线网络节点<sup>[2]</sup>。传统无线网络的主要任务仅仅是实现无线数据传输,即通过电磁波实现网络节点间的数据通信,其网络节点具有体积小、移动性高和电池容量小等特点<sup>[3]</sup>;而未来无线网络的主要任务不仅是实现无线数据传输,还需要其节点能通过能量捕获从外界环境中采集能量,形成一个自给自足的无线网络。然而由于地理位置或移动性等原因,某些节点无法采集到足够的能量,需要通过无线能量传输技术从能量储备丰富的邻居节点得到部分能量。因此,如何在现有无线网络节点的基础上将能量通过电磁波进行节点间的无线传输是重点和难点,亟需一种新的无线能量传输技术来保证能量的有效传输和合理分配<sup>[4,5]</sup>。

到稿日期:2014-11-11 返修日期:2015-02-03 本文受国家自然科学基金资助项目(61402414,61379123)、“十二五”国家科技支撑计划课题资助项目(2012BAD10B01),浙江省教育厅科研项目资助项目(Y201431815),浙江省基金资助项目(LQ14F020005),浙江省科技厅公益技术项目(2014C31G2020077)资助。

姚信威(1986—),男,博士,讲师,CCF 会员,主要研究方向为无线传感器网络、无线多媒体通信,E-mail: xwyao@zjut.edu.cn;郑星航(1991—),男,硕士生,主要研究方向为无线能量传输、无线传感网;王万良(1957—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为网络控制、人工智能;赵澄(1985—),男,博士生,主要研究方向为感知网络、网络控制;杨双华(1963—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为无线传感网、网络优化。

近年来,部分研究学者和研究机构在无线能量传输建模、节点能量传输算法以及节点吞吐量最大化等方面做了前期研究,并取得了一些成果<sup>[2,4-15]</sup>。由于节点在能量采集过程中可向相邻节点发送或接收能量,Berk Gurakan 和 Omur Ozel 建立了只有源节点和目的节点的高斯双工信道模型,并利用广义二维定向水填充算法求解两个节点在能量传输下的总吞吐量最大化问题<sup>[4]</sup>。此外,他们在上述研究成果的基础上增加了一个中继节点,对无线能量传输中高斯信道建模以及无线能量传输算法做了进一步的研究<sup>[2,6]</sup>,详细分析了在特定的能量状态分布下如何传输能量以及传输多少能量等问题<sup>[5]</sup>。Kaya Tutuncuoglu 和 Aylin Yener 引入了能量有效期的概念,并在节点有效能量和有限容量的条件下对吞吐量最大化问题进行研究<sup>[7]</sup>。Jing Yang 和 Kaibin Huang 等从信道衰弱、信道广播、多径信道访问、信道干扰等角度来研究信道中节点吞吐量最大化问题<sup>[8-13]</sup>。Oner Orhan 和 Deniz Gunduz<sup>[14]</sup>研究了节点中电池储能大小的限制对吞吐量的影响并考虑了节点处理能耗条件下吞吐量的最大化问题<sup>[14,15]</sup>。

为了解决无线网络中节点能量的局限性,优化无线能量传输中节点之间的能量分配,最大化节点的总吞吐量等难题,本文提出了一种基于网络吞吐量最大化的时间维度和节点维度的无线能量传输优化算法。它设定:能量在时间维度是单向传输的,即能量只能从现在时刻传输到未来时刻;在节点维度是可以双向传输的,即节点之间的能量可以相互传输,并且节点维度与时间维度的能量传输不相关。通过引入时间维度和节点维度的能量传输效率,建立了实时能量传输的解析模型,获取每个时刻节点在时间维度和节点维度的有效能量传输值,从而最大化网络的总吞吐量。

本文第 2 节为系统建模,包括二维能量传输的信道模型和吞吐量最大化模型;第 3 节详细介绍二维能量传输的实现算法;第 4 节为实验结果分析;最后对本文进行总结。

## 2 系统模型

### 2.1 二维能量传输的信道模型

由两个节点组成的高斯双工信道模型<sup>[16]</sup>如图 1 所示,节点 1 和节点 2 分别具有各自的能量队列和数据队列。每个节点在不同时刻获得不等的能量,为了延长无线网络的使用寿命及优化网络节点间的能量分布,需要设计有效的无线能量传输算法。因此,本文提出了一种二维能量传输算法,使得网络总吞吐量达到最大。

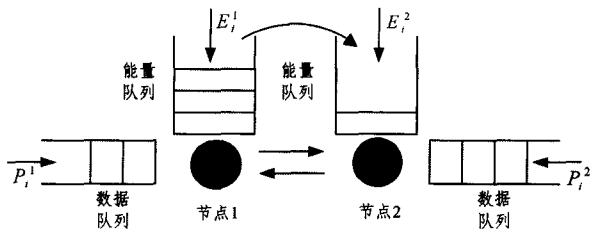


图 1 高斯双工信道模型

随着网络技术和计算机硬件技术的发展,节点能从外界环境中采集能量,而环境中的能量源(如太阳能、风能、机械能<sup>[17]</sup>等)通常随着时间动态变化,而这些具有某一规律的变化往往能被监测到。因此,假设在某时间段内节点 1 和节点

2 在每个时刻( $i \in (1, 2, \dots, T)$ , 其中  $T$  表示最大时刻)通过能量捕获获得的总能量分别为  $E_1^1, E_2^1, \dots, E_T^1$  和  $E_1^2, E_2^2, \dots, E_T^2$ , 节点 1 和节点 2 在每个时刻用于传输数据队列的能量分别为  $P_1^1, P_2^1, \dots, P_T^1$  和  $P_1^2, P_2^2, \dots, P_T^2$ , 其中  $E$  表示获得的能量,  $P$  表示用于传输数据的能量, 左上角的数字 1 和 2 分别表示节点 1 和节点 2, 右下角的数字 1, 2,  $\dots, T$  表示每个时刻。为了分析真实的能量传输过程, 引入节点维度和时间维度的能量传输效率分别为  $\alpha (0 \leq \alpha \leq 1)$  和  $\beta (0 \leq \beta \leq 1)$ , 由于时间维度与节点维度的能量传输机理相似, 并假设时间维度与节点维度的能量传输不相关, 本文将重点分析节点维度的能量传输。当节点  $U$  传输  $\delta_i^U$  的能量到节点  $V$  时, 节点  $U$  的能量队列有  $\delta_i^U$  的能量离开, 同时节点  $V$  的能量队列有  $\alpha \delta_i^U$  的能量进入, 其中  $U (U=1$  或  $2)$  代表能量多的节点序号,  $V (V=1$  或  $2)$  代表能量少的节点序号, 如图 2 所示。

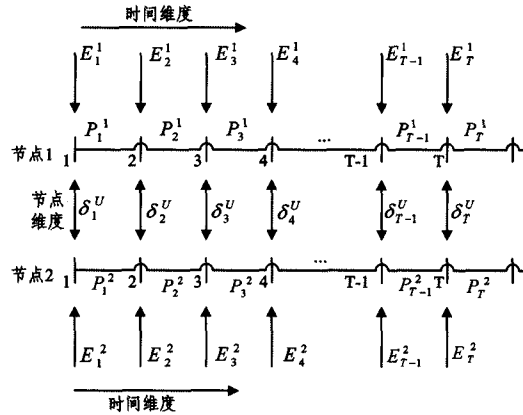


图 2 二维无线能量传输示意图

为了正确反映能量传输方向, 引入能量传输方向函数  $\varphi$  和  $\phi$ : 当  $E_i^1 \geq E_i^2$  时,  $\varphi(E_i^1, E_i^2) = 1, \phi(E_i^1, E_i^2) = 0$ , 即能量从节点 1 传输到节点 2; 当  $E_i^1 < E_i^2$  时,  $\varphi(E_i^1, E_i^2) = 0, \phi(E_i^1, E_i^2) = 1$ , 即能量从节点 2 传输到节点 1。对于每个节点, 其能量约束条件如下:

$$P_i^1 \leq E_i^1 - \varphi(E_i^1, E_i^2) \cdot \delta_i^U + \alpha \cdot \phi(E_i^1, E_i^2) \cdot \delta_i^U \quad (1)$$

$$P_i^2 \leq E_i^2 - \phi(E_i^1, E_i^2) \cdot \delta_i^U + \alpha \cdot \varphi(E_i^1, E_i^2) \cdot \delta_i^U \quad (2)$$

其中, 式(1)表示第  $i$  时刻节点 1 用于传输数据的能量小于或等于节点 1 在第  $i$  时刻拥有的总能量, 式(2)表示第  $i$  时刻节点 2 用于传输数据的能量小于或等于节点 2 在第  $i$  时刻拥有的总能量。第  $i$  时刻节点拥有的总能量包括两部分: 直接从环境中采集的能量和节点间相互传输获取或损失的能量。此外, 传输的能量必须不大于传输节点从环境中采集的总能量, 具体的能量约束条件如下:

$$\delta_i^U \leq \varphi(E_i^1, E_i^2) \cdot E_i^1 + \phi(E_i^1, E_i^2) \cdot E_i^2 \quad (3)$$

### 2.2 二维能量传输的吞吐量最大化模型

为了衡量无线能量传输机制的性能, 网络的总吞吐量是一个被公认并广泛采用的评价指标。根据文献<sup>[4-7, 16]</sup>描述的高斯双工信道, 可以得到能量与吞吐量之间存在着相应的关系。假设信道在节点 1 与节点 2 的输入输出分别为  $x_1, x_2$  和  $y_1, y_2$ , 且输入输出关系是  $y_1 = x_1 + x_2 + n_1, y_2 = x_1 + x_2 + n_2$ ,  $n_1, n_2$  是独立的加性高斯白噪声, 均值为零, 方差为单位方差。则吞吐量与传输能量之间的关系可以表示为<sup>[16]</sup>:

$$R \leq \log_2(1 + P)/2 \quad (4)$$

其中,  $R$  表示吞吐量,  $P$  表示能量。因此, 当节点 1 和节点 2 分别用能量  $P_1^i$  和  $P_2^i$  传输数据时, 它们的吞吐量  $R_1$  和  $R_2$  分别满足  $R_1 \leq \log_2(1+P_1^i)/2$  和  $R_2 \leq \log_2(1+P_2^i)/2$ 。在能量主要用于数据传输且数据队列有充足数据的情况下, 可以近似得到  $R_1 = \log_2(1+P_1^i)/2$  和  $R_2 = \log_2(1+P_2^i)/2$ 。综上, 在节点能量传输的约束条件下, 两个节点在节点维度能量传输时的总吞吐量最大化问题为:

$$\max_{P_1^i, P_2^i, \delta_i^U} \sum_{i=1}^T \left( \frac{1}{2} \log_2(1+P_1^i) + \frac{1}{2} \log_2(1+P_2^i) \right) \quad (5)$$

结合式(1)~式(3)这 3 个约束条件, 节点维度的总吞吐量最大化问题可以用拉格朗日函数  $\mathcal{L}$  来求解:

$$\mathcal{L} = \sum_{i=1}^T \left( \frac{1}{2} \log_2(1+P_1^i) + \frac{1}{2} \log_2(1+P_2^i) \right) - \sum_{i=1}^T \lambda_i C_1 - \sum_{i=1}^T \mu_i C_2 - \sum_{i=1}^T \nu_i C_3 \quad (6)$$

其中  $C_1$ 、 $C_2$  和  $C_3$  分别由约束条件(1)、(2) 和(3)转化得到:

$$C_1 = P_1^i - (E_1^i - \varphi(E_1^i, E_2^i)) \cdot \delta_i^U + \alpha \cdot \phi(E_1^i, E_2^i) \cdot \delta_i^U$$

$$C_2 = P_2^i - (E_2^i - \phi(E_1^i, E_2^i)) \cdot \delta_i^U + \alpha \cdot \varphi(E_1^i, E_2^i) \cdot \delta_i^U$$

$$C_3 = \delta_i^U - (\varphi(E_1^i, E_2^i) \cdot E_1^i + \phi(E_1^i, E_2^i) \cdot E_2^i)$$

拉格朗日函数中有 3 个拉格朗日函数因子, 分别是  $\lambda_i$ 、 $\mu_i$  和  $\nu_i$ 。根据上述拉格朗日函数  $\mathcal{L}$ , 分别对变量  $P_1^i$ 、 $P_2^i$  和  $\delta_i^U$  求偏导数, 可以得到最优化条件:

$$\frac{1}{2(1+P_1^i) \ln 2} - \lambda_i = 0 \quad (7)$$

$$\frac{1}{2(1+P_2^i) \ln 2} - \mu_i = 0 \quad (8)$$

$$(\alpha \cdot \phi(E_1^i, E_2^i) - (E_1^i - \varphi(E_1^i, E_2^i))) \lambda_i + (\alpha \cdot \varphi(E_1^i, E_2^i) - \phi(E_1^i, E_2^i)) \mu_i - \nu_i = 0 \quad (9)$$

并根据上述 3 个能量约束条件求极值:

$$\lambda_i (P_1^i - (E_1^i - \varphi(E_1^i, E_2^i)) \cdot \delta_i^U + \alpha \cdot \phi(E_1^i, E_2^i) \cdot \delta_i^U) = 0 \quad (10)$$

$$\mu_i (P_2^i - (E_2^i - \phi(E_1^i, E_2^i)) \cdot \delta_i^U + \alpha \cdot \varphi(E_1^i, E_2^i) \cdot \delta_i^U) = 0 \quad (11)$$

$$\nu_i (\delta_i^U - (\varphi(E_1^i, E_2^i) \cdot E_1^i + \phi(E_1^i, E_2^i) \cdot E_2^i)) = 0 \quad (12)$$

由于能量充裕的节点在传输能量给其他节点时不会把自身所有能量都传输出去, 即可得  $\delta_i^U - (\varphi(E_1^i, E_2^i) \cdot E_1^i + \phi(E_1^i, E_2^i) \cdot E_2^i) \neq 0$ , 因此, 由式(12)可得  $\nu_i = 0$ 。于是由式(7)~式(9)可得最优化条件如下:

$$\frac{1+P_1^i}{1+P_2^i} = \frac{\varphi(E_1^i, E_2^i) - \alpha \phi(E_1^i, E_2^i)}{\alpha \varphi(E_1^i, E_2^i) - \phi(E_1^i, E_2^i)} \quad (13)$$

类似地, 考虑节点在时间维度上只能在相邻时刻进行能量传输, 以节点 1 为例, 可以求解节点 1 在时间维度上的能量传输最优化条件如下:

$$\frac{(1+P_1^i)}{(1+P_1^{i+1})} = \frac{1}{\beta} \quad (14)$$

下一节将在该模型的基础上提出不同传输效率  $\alpha, \beta$  下的最优能量传输算法。

### 3 二维能量传输的实现算法

通过第 2 节的模型分析, 为了使节点的总吞吐量最大化, 提出了一种新型二维无线能量传输算法。由于时间维度与节点维度的能量传输算法相似, 本文将重点说明节点维度的能量传输。

当  $E_1^i \geq E_2^i$ , 即  $\varphi(E_1^i, E_2^i) = 1, \phi(E_1^i, E_2^i) = 0$  时, 由式(13)可得:

$$\frac{(1+P_1^i)}{(1+P_2^i)} = \frac{1}{\alpha} \quad (15)$$

将  $P_1^i = E_1^i - \delta_i^U$  和  $P_2^i = E_2^i + \alpha \delta_i^U$  代入式(15)可得:

$$\delta_i^U = \frac{\alpha + \alpha E_1^i - 1 - E_2^i}{2\alpha} \quad (16)$$

由  $\delta_i^U > 0$ , 可得  $\alpha > (1+E_2^i)/(1+E_1^i)$ 。因此当  $(1+E_2^i)/(1+E_1^i) < \alpha \leq 1$  时, 节点 1 向节点 2 传输  $\delta_i^U = (\alpha + \alpha E_1^i - 1 - E_2^i)/2\alpha$  的能量, 能量队列是最优的; 而当  $0 \leq \alpha \leq (1+E_2^i)/(1+E_1^i)$  时, 在节点维度不进行能量传输。

同理, 当  $E_1^i < E_2^i$  且  $(1+E_1^i)/(1+E_2^i) < \alpha < 1$  时, 节点 2 向节点 1 传输  $\delta_i^U = (\alpha + \alpha E_2^i - 1 - E_1^i)/2\alpha$  的能量, 能量队列是最优的; 而当  $0 < \alpha < (1+E_1^i)/(1+E_2^i)$  且  $E_1^i < E_2^i$  时, 在节点维度不进行能量传输。

同理, 也可以得到节点在时间维度的能量传输最优化条件。以节点 1 为例, 由于能量只能从当前时刻传输到下一个时刻, 因此当  $(1+E_{i+1}^1)/(1+E_i^1) < \beta \leq 1$  且  $E_i^1 \geq E_{i+1}^1$  时, 能量最优化的条件是节点 1 在第  $i$  时刻将  $(\beta + \beta E_i^1 - 1 - E_{i+1}^1)/2\beta$  的能量传输到第  $i+1$  时刻; 而当  $E_i^1 < E_{i+1}^1$  或  $0 \leq \beta \leq (1+E_{i+1}^1)/(1+E_i^1)$  时, 在时间维度不进行能量传输。

节点在进行能量传输时应优先考虑当前时刻各个节点能量的分布情况, 即先满足当前时刻的节点能量需求。所提二维无线能量传输算法设定: 节点 1 和节点 2 先进行节点维度的能量传输, 再进行时间维度的能量传输, 其算法流程如图 3 所示。从图中可以看出程序设定: 节点先进行各个时刻节点维度的能量传输, 随后节点 1 与节点 2 分别各自进行时间维度的能量传输, 在执行完节点维度和时间维度能量传输后程序终止, 此时得到最优能量分布状态。

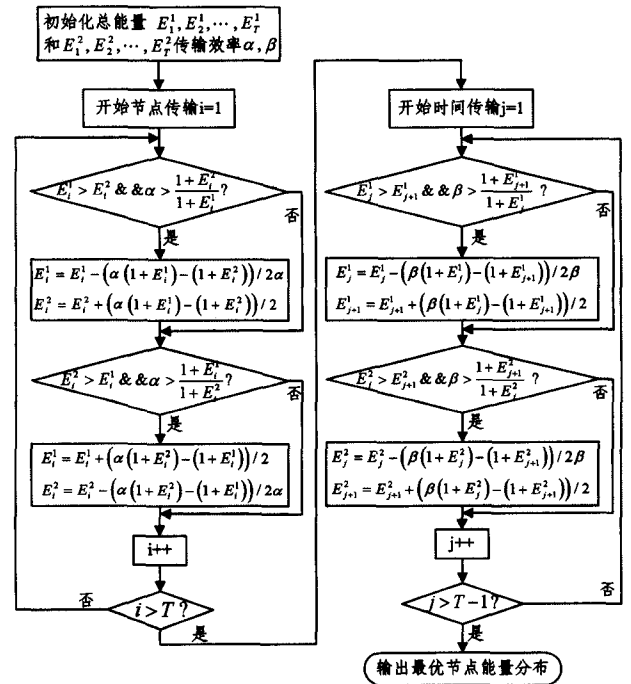


图 3 无线能量传输算法流程

### 4 实验结果分析

为了模拟真实的网络场景并对二维无线能量传输算法进

行仿真验证,本节采用 Matlab 进行仿真,模型基本参数设置<sup>[2]</sup>见表 1(可以根据实际应用环境调整各个参数,实现有效的无线能量传输)。其中因为所提算法在时间维度上只有相邻时刻才进行无线能量传输,所以  $\beta$  的取值为 1。为了深入分析算法的性能,将实验分为两个部分,第一部分为理想情况下(即参数  $\alpha=\alpha_1$ )算法的性能分析,第二部分为实际情况(即参数  $\alpha=\alpha_2$ )下算法的性能分析。

表 1 模型基本参数的设置

参数	值	参数	值
T	15	i	$i \in (1,15)$
$E_i^1$	Rand(0,9)	$E_i^2$	Rand(0,9)
$\alpha_1$	1	$\beta$	1
$\alpha_2$	0.5		

表 2 二维无线能量传输算法的性能(第一组实验)

节点状态	节点序号	时刻														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
“0”	1	2	3	7	4	5	3	5	2	6	6	1	3	2	4	5
状态	2	7	0	6	6	0	4	9	5	5	2	2	5	1	0	4
“1”	1	4.5	1.5	6.5	5	2.5	3.5	7	3.5	5.5	4	1.5	4	1.5	2	4.5
状态	2	4.5	1.5	6.5	5	2.5	3.5	7	3.5	5.5	4	1.5	4	1.5	2	4.5
“2”	1	3	3	5.75	4.125	3.8125	3.8125	5.25	5.25	4.75	3.125	3.125	2.75	2.375	2.375	4.5
状态	2	3	3	5.75	4.125	3.8125	3.8125	5.25	5.25	4.75	3.125	3.125	2.75	2.375	2.375	4.5

表 3 二维无线能量传输算法的性能(第二组实验)

节点状态	节点序号	时刻														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
“0”	1	9	4	3	5	4	7	1	0	5	1	7	9	4	4	2
状态	2	1	2	1	4	0	6	3	8	6	2	2	2	4	0	1
“1”	1	5	3	2	4.5	2	6.5	2	4	5.5	1.5	4.5	5.5	4	2	1.5
状态	2	5	3	2	4.5	2	6.5	2	4	5.5	1.5	4.5	5.5	4	2	1.5
“2”	1	4	3	3	3.25	3.25	4.25	4.125	4.125	3.5	3.5	4.5	4.75	3.375	2.4375	2.4375
状态	2	4	3	3	3.25	3.25	4.25	4.125	4.125	3.5	3.5	4.5	4.75	3.375	2.4375	2.4375

首先,通过上述两组实验数据的对比分析,可以得到节点在初始状态的能量分布对算法的性能有较大的影响,即节点 1 与节点 2 之间在相同时刻的能量差值越大,算法性能提升越明显;同理,同一节点中各时刻之间能量差值越大,算法性能提升也越明显。其次,通过对比实验数据可得,所提算法利用不同节点在不同时刻所获得的能量差能有效防止节点在某时间段内能量处于“过剩”状态或“饥饿”状态,延长节点在网络拓扑中的生存时间。此外,通过本算法还可以有效提高节点的总吞吐量,从而充分利用节点的信道资源。

为了进一步分析所提二维无线能量传输算法的性能,将所提算法与文献[3]所提广义二维定向水填充算法进行实验对比。在上述相同的网络场景(第一组实验和第二组实验)下,根据文献[3]算法优化后的节点总吞吐量分别为 33.84 和 32.80,节点总吞吐量分别增加了 10.47% 和 14.16%。通过对比分析,可以得到两种算法具有近似相等的网络总吞吐量。但是广义二维定向水填充算法假设能量在节点维度是单向传输的,即假设能量只能从节点 1 传到节点 2,这与实际网络中节点间可互相传输能量不符;并且当大部分时刻节点 2 的总能量都大于节点 1 的总能量时,算法性能较差。此外,由于能量存在时效性,因此该算法考虑在时间维度上能量能从当前时刻传输到之后的任意时刻是不合理的。而本文所提的二维无线能量传输算法充分考虑了节点维度上能量传输的双向性

### A. 理想情况下算法的性能分析

采用两组实验来分析所提算法的性能,其中第一组实验数据如表 2 所列,第二组实验数据如表 3 所列。表中“0”状态、“1”状态和“2”状态分别表示节点的初始状态、节点进行节点维度能量传输后的状态和节点进行时间维度能量传输后的状态。通过总吞吐量公式  $\sum_{i=1}^{15} (\frac{1}{2} \log_2(1+P_i^1) + \frac{1}{2} \log_2(1+P_i^2))$  分别对第一组实验数据的“0”状态、“1”状态和“2”状态求出节点的总吞吐量,分别是:30.64、32.45、33.42,即“1”状态和“2”状态分别相对于“0”状态使节点的总吞吐量增加了 5.93% 和 9.09%。对第二组实验数据做相同的分析,可得 3 个状态相对应的节点总吞吐量分别为 28.73、31.44、32.62,节点总吞吐量分别增加了 9.44% 和 13.55%。

和时间维度上只能在相邻时刻间进行能量传输,更符合实际情况,并且也能很好地提升节点总吞吐量。

### B. 实际情况下算法的性能分析

为了更直观地分析能量传输的趋势,理解二维无线能量传输算法的优势,第三组数据采用二维坐标图进行表示。图中的“0”、“1”和“2”分别代表的是“0”状态、“1”状态和“2”状态。为了分析不同节点维度传输效率  $\alpha$  对算法性能的影响,将第三组数据分别在  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  下进行实验。它们在相同的网络场景下进行实验,如图 4(a) 和 5(a) 所示。图 4(b) 和图 5(b) 分别表示节点在  $\alpha_1$  与  $\alpha_2$  下经过节点维度能量传输后的能量分布状态。图 4(c) 和图 5(c) 分别表示节点在  $\alpha_1$  与  $\alpha_2$  下再经过时间维度能量传输后的能量分布状态。通过总吞吐量公式分别对  $\alpha_1$  情况做相同的分析,可得 3 个状态相对应的节点总吞吐量,分别为 26.76、30.14、31.07,节点总吞吐量分别增加了 12.60%、16.10%。对  $\alpha_2$  情况做相同的分析可得 3 个状态相对应的节点总吞吐量分别为 26.76、27.78、29.24,节点总吞吐量分别增加了 3.80%、9.23%。随后本文通过大量实验可以得到,该算法在  $\alpha_1$  时能增加的节点总吞吐量大约是 8%~17%,而在  $\alpha_2$  时能增加的节点总吞吐量大约是 6%~11%。从实验结果可以看出当无线传输效率没有那么理想时,算法提升节点总吞吐量略小于理想情况,但是与初始状态算法相比,提升效果还是十分明显的。

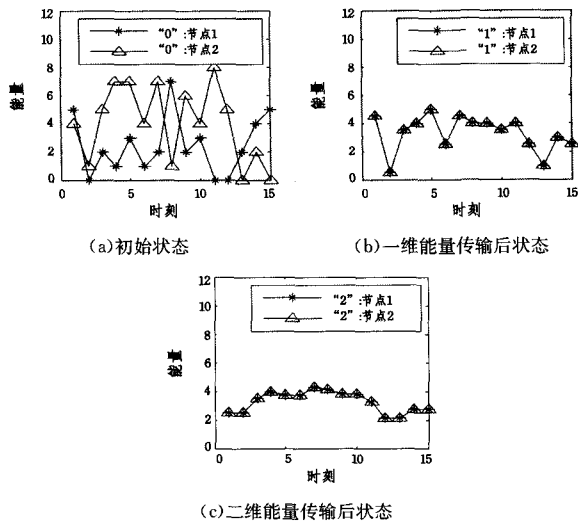


图4 二维无线能量传输算法的性能(第三组实验,  $\alpha_1$ )

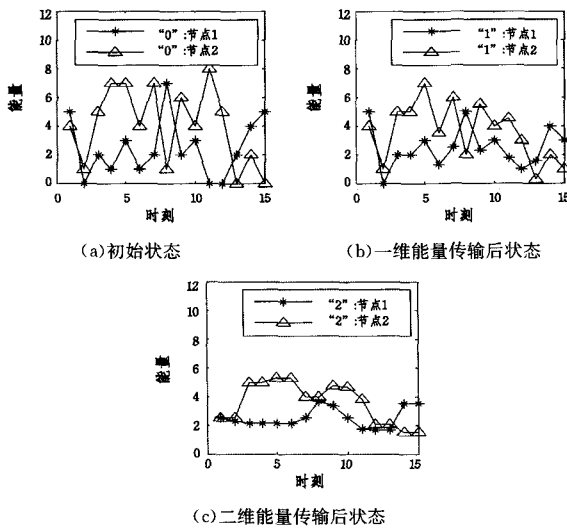


图5 二维无线能量传输算法的性能(第三组实验,  $\alpha_2$ )

从图4(a)和5(a)中可以看出两个节点在“0”状态的能量分布是很杂乱无章的,这符合节点在自然环境中获取能量的不确定性。对比图4(b)和图5(b)可得,节点维度的传输效率 $\alpha$ 会影响算法在节点维度的传输过程,例如第1时刻在 $\alpha_1$ 时进行节点间的无线能量传输,而在 $\alpha_2$ 时这两个时刻未进行节点间的无线能量传输。从图4(c)和图5(c)可以看出,节点能量分布曲线变得平滑了,但并不是一条水平线,这是由于所提算法考虑能量在时间维度是单向不可逆的,并且只有相邻时刻间才能进行能量传输。因此,该算法虽然没有达到理论上的完美值,但是却更具有实际意义。

**结束语** 基于网络吞吐量最大化的无线能量传输技术是未来无线网络技术的研究重点和热点,寻求一种好的无线能量传输算法对提高整个网络的性能有着重要的意义。本文提出了一种二维无线能量传输算法,基于高斯双工信道,建立了无线能量传输模型和吞吐量最大化模型,并通过拉格朗日函数有效地解决了无线网络中各节点之间的能量分配问题和最大化节点的总吞吐量问题。

实验表明,二维无线能量传输算法不仅可以有效地提高节点的总吞吐量,而且能避免节点在某些时刻处于“过剩”状

态和“饥饿”状态,优化各节点在每个时刻的能量利用率。下一步将考虑节点维度传输的时延对时间维度能量传输的影响;同时,由于两个节点网络具有局限性,还需要进一步考虑多节点网络的无线能量传输技术。

## 参考文献

- [1] 张雪松,朱超甫,李忠富.基于微带天线的能量传输技术及其性能研究[J].电子与信息学报,2007,29(1):232-235  
Zhang Xue-song, Zhu Chao-fu, Li Zhong-fu. The Studies of Energy Transmission Technology and Its Performances Based on Microstrip Antennas[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(1): 232-235
- [2] Gurakan B, Ozel O, Yang J, et al. Energy Cooperation in Energy Harvesting Communications[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(12): 4884-4898
- [3] 刘铁流,巫咏群.基于能量优化的无线传感器网络分簇路由算法研究[J].传感技术学报,2011,24(5):764-770  
Liu Tie-liu, Wu Yong-qun. Energy Optimized Approach Based on Clustering Routing Arithmetic for Wireless Sensor Networks [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2011, 24(5): 764-770
- [4] Gurakan B, Ozel O, Yang J, et al. Energy cooperation in energy harvesting two-way communications[C]// IEEE International Conference on Communications (ICC). Budapest, 2013: 3126-3130
- [5] Gurakan B, Ozel O, Yang J, et al. Energy cooperation in energy harvesting wireless communications[C]// IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings (ISIT). Cambridge, MA, 2012: 965-969
- [6] Gurakan B, Ozel O, Yang J, et al. Two-way and multiple-access energy harvesting systems with energy cooperation[C]// Conference Record of the Forty Sixth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR). Pacific Grove, CA, 2012: 58-62
- [7] Tutuncuoglu K, Yener A. Optimum transmission policies for battery limited energy harvesting nodes[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(3): 1180-1189
- [8] Ozel O, Tutuncuoglu K, Yang J, et al. Transmission with energy harvesting nodes in fading wireless channels: Optimal policies [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(8): 1732-1743
- [9] Yang J, Ozel O, Ulukus S. Broadcasting with an energy harvesting rechargeable transmitter[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(2): 571-583
- [10] Antepi M A, Uusal-Biyikoglu E, Erkal H. Optimal packet scheduling on an energy harvesting broadcast link [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(8): 1721-1731
- [11] Ozel O, Yang J, Ulukus S. Optimal broadcast scheduling for an energy harvesting rechargeable transmitter with a finite capacity battery[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications,

- [12] Yang J, Ulukus S. Optimal packet scheduling in a multiple access channel with energy harvesting transmitters[J]. Journal of Communications and Networks, 2012, 14(2): 140-150
- [13] Tutuncuoglu K, Yener A. Sum-rate optimal power policies for energy harvesting transmitters in an interference channel[J]. Journal of Communications and Networks, 2012, 14(2): 151-161
- [14] Devillers B, Gunduz D. A general framework for the optimization of energy harvesting communication systems with battery imperfections[J]. Journal of Communications and Networks,

- [15] Orhan O, Gunduz D, Erkip E. Throughput maximization for an energy harvesting communication system with processing cost [C]// IEEE Information Theory Workshop (ITW). Lausanne, 2012: 84-88
- [16] Han T. A general coding scheme for the two-way channel[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1984, 30(1): 35-44
- [17] Sudevalayam S, Kulkarni P. Energy harvesting sensor nodes: Survey and implications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2011, 13(3): 443-461

(上接第 157 页)

均定位误差只增加了 0.06m, 平均定位误差减少了 0.11m。这说明本文提出的定位模型能有效降低在线和离线阶段使用不同标签产生的差异。随着时间的推移, 有源标签电池衰减信号强度减弱, 本文提出的模型也比较好地降低了这种影响。

**结束语** 本文提出的室内定位模型以差分的方法构建指纹, 解决了指纹方法定位中离线阶段和在线阶段因异构设备引起的信号强度差异带来的精度下降问题。同时引入了虚拟参考点, 根据信号传播模型计算信号强度, 减少了指纹采集的工作量, 降低了信号之间的干扰, 有效地抵抗了环境的干扰, 为目标提供了更加准确的位置。实验对比分析了在相同环境下异构标签信号强度的变化, 分别建立传统指纹库和本文提出的差分指纹库, 基于 K-NN 方法进行定位, 证明本文提出的定位模型有较高的定位精度。定位环境中可能存在强烈电磁干扰导致信号强度产生剧烈变化, 未来将更深入地研究室内的其他干扰因素, 以应对复杂的室内环境, 提高模型的健壮性。

### 参 考 文 献

- [1] Doufexi A. A comparison of the HIPERLAN/2 and IEEE 802.11a wireless LAN standards [M]// IEEE Communications Magazine, 2002: 172-180
- [2] Park N, Song You-jun. Policy and role based mobile RFID user privacy data management system [C]// IEEE Network Operations and Management Symposium, NOMS 2008, 2008: 1003-1006
- [3] Moewin S T. RFID-based intelligent bookshelves shelving system [C]// 2007 1st Annual RFID Eurasia, 2007: 1-5
- [4] Li S C, Hussein C, Wan Y. An RFID location tracking system based on SIP [C]// 2008 IEEE International Conference on RFID, 2008: 173-182
- [5] 李军怀, 孙转宜, 王一乐, 等. 基于虚拟参考标签的 RFID 定位系统构建方法[J]. 计算机科学, 2011, 38(4): 107-110  
Li Jun-huai, Sun Zhuan-yi, Wang Yi-le, et al. RFID Positioning System Construction Method Based on Virtual Reference Tags [J]. Computer Science, 2011, 38(4): 107-110
- [6] Hyochang Ahn Y-H L, Cho Han-Jin, Rhee S-B, et al. A RSSI-Based Approach for Localization of Wireless Sensor Network in Indoor [M]// Proceedings of the International Conference on IT Convergence and Security 2011. Springer Netherlands, 2012: 123-127

- [7] Yi-yang Z, Yun-hao L, Ni L M. VIRE: Active RFID-based Localization Using Virtual Reference Elimination [C]// 2007 ICPP 2007 International Conference on Parallel Processing, Sept 2007: 56-56
- [8] 邵成刚. 基于 RFID 虚拟标签的室内定位算法研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2013  
Shao Cheng-gang. The Study of Indoor Location Algorithm Based on RFID Technology [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013
- [9] 赵小荣, 钱秀芳. 基于 SSDOA 定位算法研究 [J]. 数据通信, 2009(5): 23-26  
Zhao Xiao-rong, Qian Xiu-fang. Research on Signal Strength Difference of Arrival Based Indoor Outdoor Geolocation [J] New Technology, 2009(5): 23-26
- [10] 刘辉亚, 徐建波. 无线传感器网络分布式的移动节点定位研究 [J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(17): 72-76  
Liu Hui-ya, Xu Jian-bo. Study of distributed mobile localization in wireless sensor network [J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(17): 72-76
- [11] 孔德强, 刘作学, 冯树芳. 室内无源定位算法研究 [C]// 全国第三届信号和智能信息处理与应用学术交流会, 2009. 2009: 20-22  
Kong De-qiang, Liu Zuo-xue, Feng Shu-fang. Study on indoor passive location algorithm [C]// Computer Engineering and Applications, 2009: 20-22
- [12] Hossain A K M M, Hien Nguyen V, Yunye J, et al. Indoor Localization Using Multiple Wireless Technologies [C]// IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS 2007). 2007: 1-8
- [13] Mahtab Hossain A K M, Yunye J, Wee-Seng S, et al. SSD: A Robust RF Location Fingerprint Addressing Mobile Devices' Heterogeneity [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2013, 12(1): 65-77
- [14] 王洁. 基于贝叶斯估计方法的无线定位跟踪技术研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2011  
Wang Jie. Wireless Localization and Tracking Based on Bayesian Estimation [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011
- [15] 谢代军. 无线局域网室内定位技术研究 [D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2013  
Xie Dai-jun. Research on WLAN Indoor Location Estimation Technology [D]. Zhengzhou: The PLA Information Engineering University, 2013