

doi:10.3969/j.issn.1003-5060.2016.03.010

基于 MIMO 无线传感网络的充电优化模型

伍玉宝¹, 周国祥¹, 俞磊², 石雷¹

(1. 合肥工业大学 计算机与信息学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽中医药大学 医药信息工程学院, 安徽 合肥 230012)

摘要:为提高无线传感器网络的应用范围、传输速率和持续时间等,文章将 MIMO(multiple-input-multiple-output)无线通信技术和无线充电技术同时整合到无线传感器网络,并根据具体问题相应地提出了离散 $N+1$ 阶段非线性充电优化模型和离散 $N+1$ 阶段线性充电优化模型。最后根据离散 $N+1$ 阶段线性充电优化模型进行仿真实验,并对实验结果进行了分析,以确保该方案的可行性和有效性。

关键词:MIMO 技术;无线充电;离散 $N+1$ 阶段线性充电模型;无线传感器网络;仿真

中图分类号:TN925 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-5060(2016)03-0338-05

Charging optimization model for MIMO-based wireless sensor networks

WU Yu-bao¹, ZHOU Guo-xiang¹, YU Lei², SHI Lei¹

(1. School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. School of Medical Information Technology, Anhui University of Chinese Medicine, Hefei 230012, China)

Abstract:In order to improve the application range, transmission rate and duration of the wireless sensor network(WSN), the multiple-input-multi-output(MIMO) wireless communication technology and wireless charging technology are integrated into the WSN, and the discrete $(N+1)$ -phased linear charging optimization model and the discrete $(N+1)$ -phased nonlinear charging optimization model are put forward according to the specific problems. Finally, the simulation experiment based on the discrete $(N+1)$ -phased linear charging optimization model is conducted and the experimental results are analyzed in order to ensure the validity and feasibility of the scheme.

Key words:multiple-input-multiple-output(MIMO) technology; wireless charging; discrete $(N+1)$ -phased linear charging model; wireless sensor network(WSN); simulation

能量问题是无线传感器网络(wireless sensor networks, WSN)研究的一个关键问题^[1]。目前,一般采用一次性电池对传感器节点供电,节点必须定期更换电池,否则将会报废,这很不适合有特殊环境的行业应用,如环境监测、野外科考等,采用无线充电技术对 WSN 进行充电,可以很好地解决无线网络能量问题^[2]。

文献^[1]对 WSN 周期性充电技术优化进行了研究,提出了以最大化 WCE 驻站时间比为目标充电策略和数据传输策略,但仅限于普通设

备,没有扩展到基于 MIMO(multiple-input-multiple-output)的无线网络领域。收发端同时使用多天线的多输入多输出 MIMO 技术,能显著提高频谱效率^[3-5]。MIMO 技术利用各传输子路径间的统计独立性,建立空间并行矩阵传输通道,并通过先进的空时联合处理算法提高无线通信系统的容量与可靠性。目前对于 MIMO 的研究主要基于增益矩阵和空间自由度。基于矩阵的研究模型虽然很精确,但是矩阵的运算操作非常复杂,严重限制了 MIMO 技术的推广和成功^[6-7];基于

收稿日期:2015-01-12;修回日期:2015-05-25

基金项目:安徽省重点实验室开放基金资助项目(ACA1M150101)

作者简介:伍玉宝(1990-),男,安徽芜湖人,合肥工业大学硕士生;

周国祥(1956-),男,安徽合肥人,合肥工业大学教授,硕士生导师。

空间自由度(degrees-of-freedom, DOFs)^[8]的解决方案比较简单,所涉及的运算都是线性问题,比基于增益矩阵更有利于MIMO技术的推广^[9-10]。文献[11]提出的采用节点排序消除干扰(interference cancellation, IC)是一种基于空间自由度的研究,但是由于使用空间自由度的条件,即零强制模式、不考虑数组和分集增益,决定了这是一个次优方案^[2]。

本文借鉴文献[1]的无线充电模型和文献[11]的空间自由度模型,提出了基于MIMO网络下的无线充电技术解决方案。

1 问题描述

在监测区内分布 N 个基于MIMO技术的无线传感器节点和1个基站B,节点将自己采集的信息通过无线的方式传给基站B,充电汽车从维护站S出发,周期性遍布各个工作节点,沿途对各传感器节点进行充电,确保各节点一直工作在正常电压值范围内,使整个基于MIMO的WSN都能够正常工作下去,以汽车停留在维护站S的最大化驻站时间比为目标,求解出基于MIMO技术无线网络的链路传输情况。无线充电的MIMO网络结构如图1所示。其中,由于MIMO设备的半双工特性,假设一个节点包含2个MIMO设备,一个作为接收端,另一个作为发送端,保证一个传感器节点能够同时接收和发送数据。

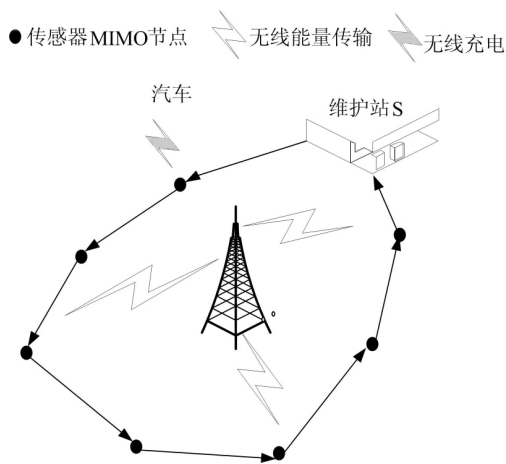


图1 无线充电的MIMO网络结构

2 离散 $N+1$ 阶段非线性充电模型

首先生成小汽车到达除基站外的其他节点的最短路径(哈密顿路径),将节点按生成路径的顺序依次生成节点序号,以维护站S为序号0开始,

生成的路径为 $(0, 1, 2, \dots, N, 0)$,确保小汽车路程上花费的时间最短。

小车沿着刚刚生成的哈密顿路径从维护站S出发,沿途给各个节点充电,再回到驻站,到下次再出发的整个过程定为一个周期。小车在整个充电周期中,总共只有3种状态:行驶、充电、驻站。其中行驶和驻站这2类状态下,整个MIMO网络没有能量补充,所以无线网络路由和传输状态都没有发生变化,可以归为一类。充电状态下,小车分别对 N 个节点进行充电,对应的无线网络就有 N 种情况,所以对整个无线网络的充电周期,可以分为 $N+1$ 个阶段进行讨论:假设每个阶段内路由恒定,当 m 不为 $N+1$ 时,第 m 阶段表示汽车正对第 m 个节点充电;当 m 为 $N+1$ 时,表示汽车在行走和驻站。

设一共有 N 个传感器节点,在第 m 阶段内,节点产生数据的速率为 R_i ,在一条数据链路上节点 i 向节点 j 传输的速率为 $g_{ij}[m]$,节点 i 与节点 j 之间的数据链路的个数为 $z_{ij}[m]$,节点 i 向节点 j 传输的总速率为 $g_{ij}[m]z_{ij}[m]$,那么在 m 阶段的任意时刻,节点 i 满足:

$$\sum_{k \in N, k \neq i}^{k \neq i} g_{ki}[m]z_{ki}[m] + R_i = \sum_{j \in N, j \neq i}^{j \neq i} g_{ij}[m]z_{ij}[m] + g_{iB}[m]z_{iB}[m] \quad (1)$$

在 m 阶段内,节点功率为 $p_i[m]$,单位为W;在接收数据时,节点在单位时间的功率参数记为 ρ ;在发送数据时,功率参数分别为 C_{iB} 和 C_{ij} 。节点 i 的功率为:

$$p_i[m] = \rho \sum_{k \in N, k \neq i}^{k \neq i} g_{ki}[m]z_{ki}[m] + \sum_{j \in N, j \neq i}^{j \neq i} C_{ij} g_{ij}[m]z_{ij}[m] + C_{iB} g_{iB}[m]z_{iB}[m] \quad (2)$$

设小车行驶的速度为 v , τ_i 为小车对节点 i 的充电时间,即第 i 阶段的持续时间。由于第 $N+1$ 个阶段为驻站和行驶的组合, τ_{vac} 、 τ_{isp} 分别为驻站时间和行驶时间,那么 τ_{N+1} 应该满足:

$$\tau_{N+1} = \tau_{vac} + \tau_{isp} \quad (3)$$

在整个周期内节点的能量消耗应该等于在这个周期内得到的能量补充,那么节点 i 需要满足

$$\sum_{m \in M} p_i[m] \tau_m = U \tau_i \quad (4)$$

在整个周期内需要保证节点工作在最低能量 E_{min} 以上,使节点一直正常工作。节点在一个周期内所具有的最高能量在小车刚充完电后,记为 E_{up} ;最低能量在小车刚到达节点的时刻,记为

E_{down} , 所以节点 i 满足:

$$E_{\text{max}} - E_{\text{min}} \geq E_{\text{up}} - E_{\text{down}} = \sum_{m \in M} p_i[m] \tau_m \quad (5)$$

由于采用的是 MIMO 设备, 且一个节点包含 2 个 MIMO 设备, 所以需要对 MIMO 设备进行节点排序消除干扰(IC)和空间复用(spatial multiplexing, SM)自由度分析。一个 MIMO 设备的自由度等于它所具有的天线数目, 假设节点 i 的 2 个 MIMO 设备天线数目均为 A_i , 节点的接收数据流总数为 $\sum_{k \in N} z_{ki}[m]$, 发送数据流总数为 $\sum_{j \in N} z_{ij}[m] + z_{iB}[m]$, 那么这些都不应该超过其自由度, 即

$$1 \leq \sum_{j \in N} z_{ij}[m] + z_{iB}[m] \leq A_i \quad (6)$$

$$0 \leq \sum_{k \in N} z_{ki}[m] \leq A_i \quad (7)$$

节点排序的条件限制为对于任何一个节点排序 $\pi[m]$, 节点 i 在序列中位置应该满足(8)式, 即

$$1 \leq \pi_i[m] \leq N \quad (8)$$

文献[11]采用的空间自由度模型是基于相对顺序, 节点 j 在 $\pi[m]$ 中的顺序应满足:

$$\pi_i[m] - N\theta_{ji}[m] + 1 \leq \pi_j[m] \leq \pi_i[m] - N\theta_{ji}[m] + N - 1,$$

$$1 \leq i \leq N; j \in \xi_i; 1 \leq t \leq T \quad (9)$$

其中, $\theta_{ji}[m]$ 为 1 表示节点 j 排在节点 i 之前, 为 0 表示在节点 i 之后; ξ_i 为在节点 i 干扰范围内所有节点的集合。

自由度消耗限制为节点 i 的发送端数据流和在节点 i 干扰范围内、所有在 $\pi[m]$ 序列中排在 i 前的节点 j 接收端的数据流总数不能超过节点 i 的自由度, 即

$$\sum_{k \in N} z_{ik}[m] + z_{iB}[m] + \sum_{j \in \xi_i} \theta_{ji} \sum_{t \in N} z_{tj}[m] \leq A_i \quad (10)$$

同理, 接收端也需满足:

$$\sum_{k \in N} z_{ki}[m] + \sum_{j \in \xi_i} \theta_{ji} \sum_{t \in N} z_{jt}[m] \leq A_i \quad (11)$$

其中, 不考虑同一个节点中的 2 个 MIMO 设备的干扰。

链路数据流量限制为在一个链路中所传输的最大比特流不应该超过该链路的最大负荷, 记为 c_1 , 约束表示为:

$$g_{ij}[m] \leq c_1, g_{iB}[m] \leq c_1 \quad (12)$$

由优化目标 $\max \frac{\tau_{\text{vac}}}{\tau}$ 和约束条件(1)~(12)

式可建立离散 $N+1$ 阶段非线性充电优化模型。

3 离散 $N+1$ 阶段线性充电模型

利用所得到离散 $N+1$ 阶段非线性模型进行线性化处理。设 $\eta_m = \tau_m / \sum_{k \in M} \tau_k, \eta_{\text{vac}} = \tau_{\text{vac}} / \sum_{k \in M} \tau_k, q_{ki} = g_{ki}[m] \eta_m z_{ki}[m], q_{ij} = g_{ij}[m] \eta_m z_{ij}[m]$, 将条件代入(1)~(5)式, 化简可得:

$$\sum_{k \in N} q_{ki}[m] + R_i \eta_m = \sum_{j \in N} q_{ij}[m] + q_{iB}[m] \quad (13)$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{k \in N} \rho q_{ki} + \sum_{m \in M} \sum_{j \in N} C_{ij} q_{ij}[m] + \sum_{m \in M} C_{iB} q_{iB}[m] - U \eta_i = 0 \quad (14)$$

$$\sum_{m \in M} \eta_m = 1 \quad (15)$$

$$\eta_{\text{vac}} \leq \eta_{N+1} - \frac{\tau_{\text{tsp}}}{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}} (U \eta_i - \sum_{k \in N} \rho q_{ki}[i]) - \sum_{j \in N} C_{ij} q_{ij}[i] + C_{iB} q_{iB}[i] \quad (16)$$

由于(12)式, $\eta_m \leq 1, z_{ki}[m] \leq A_i$, 所以有:

$$0 \leq q_{ki}[m], q_{ij}[m] \leq A_i c_1 \quad (17)$$

令 $\lambda_{ji}[t] = \theta_{ji}[m] \sum_{t \in N} z_{tj}[m]$, 代入(10)式得到的不等式如下:

$$\sum_{k \in N} z_{ik}[m] + z_{iB}[m] + \sum_{j \in \xi_i} \lambda_{ji}[m] \leq A_i \quad (18)$$

由于 $\theta_{ji}[m] = \{0, 1\}$ 和 $0 \leq \sum_{t \in N} z_{tj}[m] \leq A_j$, 可得:

$$\lambda_{ji}[m] \leq \sum_{t \in N} z_{tj}[m] \quad (19)$$

$$\lambda_{ji}[m] \leq A_j \theta_{ji}[m] \quad (20)$$

$$\lambda_{ji}[m] \geq A_j \theta_{ji}[m] + \sum_{t \in N} z_{tj}[m] - A_j \quad (21)$$

同理, 令 $\mu_{ji}[t] = \theta_{ji}[m] \sum_{t \in N} z_{jt}[m]$, 代入(11)式可得:

$$\sum_{k \in N} z_{ki}[m] + \sum_{j \in \xi_i} \mu_{ji}[m] \leq A_i \quad (22)$$

$$\mu_{ji}[m] \leq \sum_{t \in N} z_{jt}[m] \quad (23)$$

$$\mu_{ji}[m] \leq A_j \theta_{ji}[m] \quad (24)$$

$$\mu_{ji}[m] \geq A_j \theta_{ji}[m] + \sum_{t \in N} z_{jt}[m] - A_j \quad (25)$$

$$0 \leq \eta_m, \eta_{\text{vac}} \leq 1$$

$$m \in M; i, j \in N; i \neq j \quad (26)$$

其中, $\rho, C_{ij}, R_i, \tau_{\text{tsp}}, E_{\text{max}}, E_{\text{min}}, U, A_i, A_j, c_1$ 均为常

数,其他为优化变量。

由优化目标 $\max \eta_{vac}$ 、(6)~(9)式和(13)~(26)式组成离散 $N+1$ 阶段线性充电模型。

4 仿真实验

4.1 仿真参数

采用离散 $N+1$ 线性模型进行仿真实验,设在 $800\text{ m}\times 900\text{ m}$ 的范围内,有 10 个 MIMO 传感器节点、1 个基站 B、1 个维护站 S 和 1 辆可提供无线充电的汽车(汽车的速度假设为 5 m/s),节点干扰的距离假设为 170 m , $c_1 = 50\text{ kb/s}$, $A_i = 8$, $E_{\max} = 10.8\text{ kJ}$, $E_{\min} = 540\text{ J}$, $U = 5\text{ W}$, $\rho = 50\text{ nJ/bit}$, $C_i = \varphi_1 + \varphi_2 D_i^4$, $\varphi_1 = 50\text{ nJ/bit}$, $\varphi_2 = 0.0013\text{ pJ}/(\text{bit}\cdot\text{m}^4)$,将节点序号按哈密顿路径的顺序生成,以维护站为起始点(其中 11 号节点不参加生成哈密顿路径运算,因为汽车不会到达该节点),节点的坐标和产生速率 R_i 见表 1 所列。其中,0 表示维护站、1~10 表示节点、11 表示基站。

表 1 节点信息

序号	x/m	y/m	$R_i/(\text{kb}\cdot\text{s}^{-1})$
0	0	0	0
1	20	20	17
2	90	50	19
3	750	50	8
4	590	480	19
5	520	540	18
6	560	560	12
7	850	700	20
8	800	700	19
9	650	750	20
10	470	700	19
11	220	490	0

4.2 仿真结果

汽车充电运行图如图 2 所示。

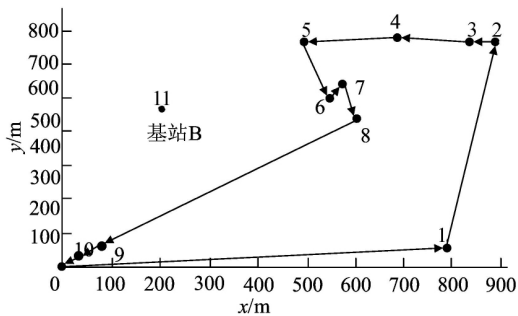


图 2 汽车充电运行图

汽车沿着逆时针方向遍历所有的节点(行走

的路径是哈密顿回路),其中,汽车在路径上的运行时间 τ_{isp} 为 573.133 s ,整个运行周期为 14949.86184 s ,汽车在所有节点之间行走的最短路径长度为 2865.945 m ,最优化驻站时间比 η_{vac} 为 30.15% 。

由于一共有 11 个阶段对应 11 个不同的路由和节点传输信息,以第 5 个阶段为例。第 5 阶段各节点消除干扰序列见表 2 所列,第 5 阶段最佳路由、最佳 MIMO 链路分配策略与节点传输速率如图 3 所示。各传感器节点都通过表 2 所列的节点相对顺序去消除它们之间进行 MIMO 数据传输时造成的数据干扰(IC),并按图 3 中标明的传输速率传输,以确保不会超过链路负载,实现在第 5 阶段内,最优化数据传输。其他阶段皆和第 5 阶段相似。

表 2 第 5 阶段各节点消除干扰序列

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\pi_i[5]$	5	3	2	9	8	4	1	10	7	6

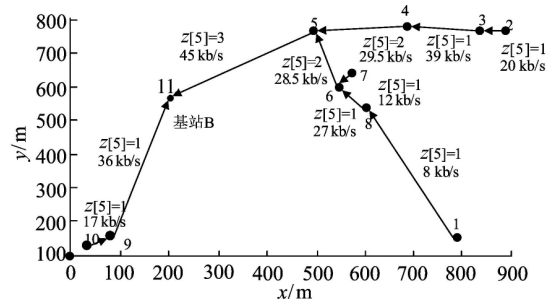


图 3 第 5 阶段的最佳 MIMO 链路分配策略和节点传输速率

5 结束语

本文结合最优化路由生成了离散 $N+1$ 阶段线性模型和基于 MIMO 的空间自由度线性模型,并基于 2 个 MIMO 设备的组合可以实现节点同时发送和接收数据的条件,提出了一种基于 MIMO 无线充电技术的解决方案。不足之处在于所选择的 MIMO 模型是一种次最优模型,必须在满足零强制、不考虑数组和分集增益的条件下才可以使用。

[参 考 文 献]

[1] 韩江洪,丁 煦,石 雷,等.无线传感器网络时变充电和动态数据路由算法研究[J].通信学报,2013,33(12):1-10.

(下转第 409 页)

- melanin from *Lachnum* YM-346 [J]. Food Chemistry, 2012, 135(4): 2490—2497.
- [15] Lu Ying, Ye Ming, Song Sheng, et al. Isolation, purification, and anti-aging activity of melanin from *Lachnum singerianum* [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2014, 174(2): 762—771.
- [16] Ye Ming, Guo Gengyi, Lu Ying, et al. Purification, structure and anti-radiation activity of melanin from *Lachnum* YM404[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2014, 63: 170—176.
- [17] 叶明,朱立,杨柳,等. *Plectania* YM421 胞内黑色素提取及其生物功能[J]. 食品与生物技术学报, 2009, 28(2): 229—233.
- [18] Ye Ming, Wang Yan, Qian Meishuang, et al. Preparation and properties of the melanin from *Lachnum singerianum* [J]. International Journal of Basic and Applied Sciences, 2011, 11(3): 51—58.
- [19] Turkoglu A, Duru M E, Mercan N, et al. Antioxidant and antimicrobial activities of *Laetiporus sulphureus* (Bull.) Murrill[J]. Food Chemistry, 2007, 101(1): 267—273.
- [20] Suryanarayanan, T S, Ravishankar J P, Venkatesan G, et al. Characterization of the melanin pigment of a cosmopolitan fungal endophyte[J]. Mycological Research, 2004, 108(8): 974—978.
- [21] Nofsinger J B, Weinert E E, Simon J D. Establishing structure-function relationships for eumelanin[J]. Biopolymers, 2002, 67(4/5): 302—305.
- [22] Yang J, Du Y, Wen Y, et al. Sulfation of Chinese lacquer polysaccharides in different solvents[J]. Carbohydrate Polymers, 2003, 52(4): 397—403.
- [23] Bilinska B. Progress of infrared investigations of melanin structures[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 1996, 52(9): 1157—1162.
- [24] Babitskaya V G, Shcherba V V, Filimonova T V, et al. Melanin pigments from the fungi *Paecilomyces variotii* and *Aspergillus carbonarius*[J]. Applied Biochemistry and Microbiology, 2000, 36(2): 128—133.
- [25] Guo T, Wei L, Sun J, et al. Antioxidant activities of extract and fractions from *Tuber indicum* Cooke & Massee[J]. Food Chemistry, 2011, 127(4): 1634—1640.
- [26] 叶明,许庆平,陈晓,等. *Lachnum* YM-223 产黑色素发酵及其黑色素抗氧化活性研究[J]. 食品科学, 2009, 30(17): 185—189.

(责任编辑 闫杏丽)

(上接第 341 页)

- [2] 王文光, 刘士兴, 谢武军. 无线传感器网络概述[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2010, 33(9): 1416—1419, 1437.
- [3] Biglieri E, Calderbank R, Constantinides A, et al. MIMO wireless communications[M]. London: Cambridge University Press, 2007: 2326—2330.
- [4] Tse D, Viswanath P. Fundamentals of wireless communication[M]. London: Cambridge University Press, 2005: 40—45.
- [5] Gesbert D, Shafi M, Shiu D, et al. From theory to practice: an overview of MIMO space-time coded wireless systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2003, 21(3): 281—302.
- [6] Chu S, Wang X. Opportunistic and cooperative spatial multiplexing in MIMO ad hoc networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2010, 18(5): 1610—1623.
- [7] Cao M, Wang X, Kim S J, et al. Multi-hop wireless backhaul networks: a cross-layer design paradigm [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(4): 738—748.
- [8] Shiu D S, Foschini G J, Gans M J, et al. Fading correlation and its effect on the capacity of multielement antenna systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2000, 48(3): 502—513.
- [9] Choi L U, Murch R D. A transmit preprocessing technique for multiuser MIMO systems using a decomposition approach[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2004, 3(1): 20—24.
- [10] Mundarath J C, Ramanathan P, Van Veen B D. Exploiting spatial multiplexing and reuse in multi-antenna wireless ad hoc networks[J]. Ad Hoc Networks, 2009, 7(2): 281—293.
- [11] Shi Yi, Liu Jia, Jiang Canming, et al. A DoF-based link layer model for multi-hop MIMO networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2014, 13(7): 1395—1408.

(责任编辑 胡亚敏)