

一种新的传感器网络能量收集优化技术

王艳丽¹ 阴国富¹ 金蓉²

(渭南师范学院网络安全与信息化学院 陕西 渭南 714000)¹ (西北工业大学电子信息学院 西安 710129)²

摘要 针对无线传感器网络能量严格受限和节点间能量不均衡的问题,建立无线信息和功率同时传输的协作 MIMO 通信模型;针对如何获取系统的最佳能量效率的问题,提出一种新的有效资源分配算法。仿真分析和原型实验结果表明,新的有效资源分配算法在迭代次数达到 12 时收敛,能量效率随发射功率额度的增加而迅速增加,当最大发射功率额度达到 3dBm 时能量效率趋向平稳;与 SISO 传输的能耗相比,采用协作 MIMO 信息和功率同时传输的技术能节省 1 个以上的能量级,并能得到较高的网络效用。

关键词 无线传感器网络,协作 MIMO,能量收集,能耗,网络效用

中图分类号 TP393.01,TP212.9 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.11.011

New Optimized Energy Harvesting Technology for Sensor Networks

WANG Yan-li¹ YIN Guo-fu¹ JIN Rong²

(School of Network Security and Informatization, Weinan Normal University, Weinan, Shaanxi 714000, China)¹

(School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)²

Abstract Aiming at the problems that the energy is strictly constrained and the energy among nodes is unbalanced in wireless sensor network, this paper constructed cooperative MIMO transmission model which transfers wireless information and power simultaneously. In order to solve the problem of how to obtain the optimal energy efficiency of system, this paper proposed a new effective resource allocation algorithm. Simulation analysis and prototypical experiment results show that the new algorithm can converge when the number of iterations reaches 12 and the energy efficiency quickly increases and keeps stable when the maximum transmission power allowance is 3dBm. Compared with SISO, the energy consumption of cooperative MIMO can save more than one energy level, meanwhile, the wireless information and power transfer technique can maximize network utility.

Keywords Wireless sensor network, Cooperative multiple-input multiple-output, Energy harvesting, Energy consumption, Network utility

近年来,无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)在军事目标追踪、环境监测和预报等众多应用领域得到了广泛应用^[1-2]。由于大部分传感器节点采用电池供电,不能达到持续提供足够能量的要求,因此节点的能量问题是 WSN 应用的瓶颈,能量效率成为 WSN 协议设计最基本的因素之一^[3]。

能量收集系统的出现解决了无线传感器网络长期工作的能量问题。传统的能量收集(Energy Harvesting, EH)技术可以从周围的自然环境中收集能量(如太阳能、风能、振动能等),但这种能量不能随时获得,也不易于控制^[4-6]。最近的研究表明,变化的通信环境会造成信息低能效传输^[7]。因此在网络数据的传输过程中可以引入能量收集技术,文献[8]提出了无线信息和功率同时传输技术。文献[9]研究了无线信息

和功率同时传输技术的双向传输中继系统的性能,再次验证了同时传输技术的有效性和可靠性。然而,上述文献没有分析能量效率问题。如何降低传感器节点发射功率,接收端如何获得最佳能量效率是本文研究的出发点,也为能量收集技术的应用提供了一种新的思路。

多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)技术可以提高通信系统的容量和频谱利用率,当系统容量一定时,可以利用 MIMO 技术降低无线传感器节点的发射功率^[10]。由于传感器节点的尺寸很小,采用虚拟天线阵列形成协作 MIMO 传输,能够获得发送阵列增益、接收阵列增益和分集增益,提高信噪比。

鉴于此,本文提出基于协作 MIMO 传输的无线信息和功率同时传输策略,并分析了最大限度地获取能量效率的方法,

到稿日期:2018-03-16 返修日期:2018-06-24 本文受国家自然科学基金(61172071),陕西省工业攻关项目(2017GY-204),渭南师范学院自然科学类研究项目(18YKS15),渭南师范学院教学改革研究项目(JG201718),渭南市科技计划项目(2017JCYJ-2-2)资助。

王艳丽(1978-),女,硕士,副教授,主要研究方向为无线通信信号处理、无线网络技术,E-mail:wylldgg@126.com(通信作者);阴国富(1980-),男,硕士,教授,主要研究方向为计算机网络,E-mail:wnlyj1@126.com;金蓉(1985-),女,博士生,讲师,主要研究方向为移动通信技术,E-mail:357262622@qq.com。

提出了一种新的有效资源分配算法,降低了数据传输能耗,实现了收集能量的后续传输。

1 系统模型

在发射功率相同的情况下,协作 MIMO 能传输更远的距离,减少数据转发的次数,降低数据传输能耗,更适合复杂环境的数据传输。由于环境复杂,替换节点或补充节点的能量是不现实的,射频信号既携带信息也携带能量,以能量收集为目标的基于协作 MIMO 传输的无线信息和功率同时传输系统模型如图 1 所示。

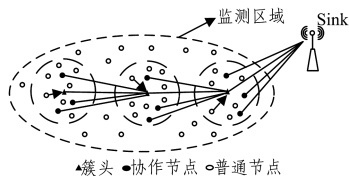


图 1 系统模型

Fig. 1 System model

簇头处于簇的中心,每个簇只有一个簇头。协作节点是簇头周围的节点,与簇头一起完成数据的协作 MIMO 传输。然而,簇头需要完成数据融合、与汇聚节点通信等工作,与其他节点相比将消耗更多的能量,能耗的不均衡使得网络的传感覆盖率减小,严重影响无线传感器网络的使用寿命^[11]。有效分簇方法^[12]中的每个簇有 2 个簇头,主要负责簇内通信,分簇由各簇的剩余能量决定。协作通信^[13-14]从网络的电路能耗和传输能耗出发,推导出簇间传输的最小能耗,从而得到到达汇聚节点的最优路径,以节省更多的网络能耗。在实现过程中,相比于其他节点,上述方法中的簇头能量消耗过快,难以在节点间获得能量的均衡。

由于簇头及其协作节点既是信息流的传播者,又是能量流的传播者,为了使节点间的能量均衡,簇头收集接收到的数据,将数据协作传输到下一个簇头,同时簇头从发送节点获得信号能量并储存于电池。为了能够从接收信号中同时译码和收集能量,接收节点由能量收集单元、信号处理单元和可充电电池组成,如图 2 所示。

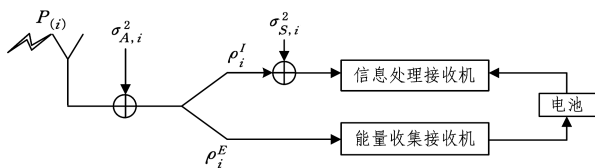


图 2 接收机结构

Fig. 2 Structure of receiver

发送方以功率 $P_i(t)$ 广播信息,其中,部分能量以能量分割因子 ρ_i^I 用于译码发送的信息,另一部分能量以分割因子 ρ_i^E 用于收集能量并储存于充电电池。 $\sigma_{A,i}^2$ 和 $\sigma_{S,i}^2$ 分别是接收天线和共信道干扰引入的加性高斯白噪声功率。

2 改进的数据传输策略

从图 1 可以看出,采用信息和功率同时传输的协作 MIMO 无线传感器网络将数据由发送节点传输到 Sink。

首先,需要在监测簇中选择簇头,簇头的主要作用是对数据进行空时分组编码(Space-Time Block Coding, STBC),根据与相邻簇的传输距离及能量门限值选择簇头,根据与相邻簇的传输距离选择适当的协作节点,簇头与协作节点一起将数据以协作 MIMO 方式传输到下一个簇头^[10]。通过对 IEEE 802.11 退避机制的修改来进行簇头的选择,假定某一次数据传递周期开始时节点的剩余能量为 E_r ,存储于接收方的能量为 E_r ,簇头的剩余能量门限为 E_{th} ,簇头选择算法在实现过程中需要发送 NCHR(Near Cluster Head Request)信号、NCHAM(Near Cluster Head Advertisement Message)信号和 FCHR(Far Cluster Head Request)信号,3 种信号分别表示附近节点发送请求、附近簇头广播信息和较远簇头请求。具体实现步骤如下:

(1)当有事件发生时,节点检测自身剩余能量,如果 $E_r + E_r > E_{th}$,则标识自身为簇头 CH(Cluster Head),否则向附近节点发出 NCHR 信号。

(2)附近节点收到 NCHR 请求后检查自身能量,若 $E_r + E_r > E_{th}$,则选择退避时间 T_R 进入退避。

(3)若节点在退避时间 T_R 内没有收到附近簇头的广播信息 NCHAM,则立即发出 NCHAM 信号;若节点在 T_R 时间内收到 1 个 NCHAM 信号,则立即返回归属信息 BM(Belonging Message);若同时收到 2 个及以上 NCHAM,则自身放弃成为簇头。节点采用全向天线,簇的周围将有多个 CH,每个 CH 处于簇的中心,为了避免 CH 的重复覆盖,所有收到 NCHAM 信号的节点将不再成为 CH。

(4)若发出 NCHAM 信号的节点在第二个 T_R 时间内收到自身的 BM 信号,则将其标识为簇头;若没有收到自身的 BM 信号,则需要等待一定的时间,参照文献^[10]的定义,给出循环时间 $j=0,1,\dots,7$,若循环时间结束时还未收到自身的 BM 信号,则将自身标记为孤立的 CH。

(5)成为簇头的节点发送较远簇头请求 FCHR 信号,若周围节点满足 $E_r + E_r > E_{th}$,则等待一段时间 T_R ,返回步骤(3),直到所有的簇头建立。

从监测簇的簇头出发,采用 Dijkstra 算法进行路由选择,在簇头与相邻簇头间进行路由表信息交换并升级路由表,寻找一条到达 Sink 节点的最短路径。

其次,为了实现节点之间能耗的均衡,根据信道状态信息选择协作节点,即选择 CSI(Channel State Information)较佳的节点参与协作传输。根据节点的剩余能量 $E_r + E_r$ 、节点间的距离 d ,以指标 q 为衡量标准^[13],将 q 值较大者作为第一个协作节点,将次大者作为第二个协作节点,依次类推。

$$q = (E_r + E_r) \cdot [1 + \beta \cdot \exp(-d/d_{\max})]$$

其中, $\beta \in (0,1)$ 为调节权值。

已选定的 CH 选取合适的协作节点,按照时分多址 TDMA(Time Division Multiple Access)方式以空时编码进行数据传输。但事实上,真正实现节点间的能耗均衡是比较困难的。在数据传输过程中,发送方的无线信号既携带了信息,也携带了能量,对于接收方的簇头而言,除了对接收的数据进行解码并恢复以外,还需要进行能量分割。

为了能够从硬件方面实现能量分割,图 2 所示结构图中,

对接收方而言,在任何时间,对同一时刻到达的信号能够进行能量收集并同时译码。

3 能量效率分析

3.1 最佳能量效率模型

下面对提出的无线协作能量收集方案的能量效率进行分析。用 $N = \{SN_1, \dots, SN_N\}$ 表示 WSN 中的一个簇头和 $N-1$ 个协作节点。假设接收方可以准确获得信道增益,其信道容量为:

$$C_i = W \log_2(1 + P_i r_i (\rho^i)) \quad (1)$$

其中, W 为带宽, $r_i(P_i^i) = \frac{\rho_i^i h_i |H_i|^2}{P_i^i (\sigma_{1,i}^2 + \sigma_{S,i}^2) + \sigma_{S,i}^2}$, h_i 是信道增益, H_i 是多径衰落系数, $P_i r_i$ 是接收信干噪比。

存储于接收方的能量 E_r 不大于接收天线接收的能量,即:

$$E_r \leq \sum_{j=1}^N P_j \rho_j^E \eta_j h_j |H_j|^2 \quad (2)$$

其中, $\eta_j (0 \leq \eta_j \leq 1)$ 是一个常数,表示能量转换效率。

采用相同的分析方法,接收方从天线噪声和干扰信号处获取的能量为:

$$E_i = (\sigma_{1,i}^2 + \sigma_{S,i}^2) \eta_i \rho_i^E \quad (3)$$

为了最大限度地提高数据传输的能量转换效率,借助文献[13]给出的定义1和定义2,推导最佳的能量转换效率。

定义1 对于接收簇头而言,其加权系统容量是发送方所有信道容量之和。

$$U(\mathcal{P}, \rho) = \sum_{i=1}^N \alpha_i C_i \quad (4)$$

其中, $\mathcal{P} = \{P_i \geq 0\}$, $\alpha_i \geq 0$ 是非负加权值, $\rho = \{\rho_i^I, \rho_i^E \geq 0\}$ 。

由于系统的电路消耗与数据速率成比例,系统的加权能量消耗 $U_{EC}(\mathcal{R}, \mathcal{P}, \rho)$ 为:

$$U_{EC}(\mathcal{R}, \mathcal{P}, \rho) = \sum_{i=1}^N P_i C_i R_i + \sum_{i=1}^N \epsilon P_i \quad (5)$$

其中, $\mathcal{R} = \{R_i \geq 0\}$; R_i 是数据速率, $R_i \leq W \log_2(1 + P_i r_i (P_i^I))$; $P_i C_i$ 是恒定的电路功耗,包含能量收集和译码两部分; $\epsilon (\epsilon \geq 1)$ 是一常数,表明发射端功率放大器的无效性。

定义2 加权能量效率是指成功发送到接收方的消耗每焦耳能量时传输的总平均比特数,即:

$$U_{eff}(\mathcal{R}, \mathcal{P}, \rho) = \frac{U(\mathcal{P}, \rho)}{U_{EC}(\mathcal{R}, \mathcal{P}, \rho)} \quad (6)$$

最佳能量转换效率以式(6)取最优值为目标,即:

$$\max_{\mathcal{R}, \mathcal{P}, \rho} U_{eff}(\mathcal{R}, \mathcal{P}, \rho) \quad (7)$$

假设:

$$P = \max_{\mathcal{R}, \mathcal{P}, \rho} U_{eff}(\mathcal{R}, \mathcal{P}, \rho) = \frac{U(\mathcal{P}, \rho)}{U_{EC}(\mathcal{R}, \mathcal{P}, \rho)}$$

为了解式(7),给出定理1作为铺垫。

定理1 假设:

$$P^* = \max_{\mathcal{R}, \mathcal{P}, \rho} U_{eff}(\mathcal{R}, \mathcal{P}, \rho) = \frac{U(\mathcal{P}^*, \rho^*)}{U_{EC}(\mathcal{R}^*, \mathcal{P}^*, \rho^*)}$$

那么,当且仅当 $\max_{\mathcal{R}, \mathcal{P}, \rho} U(\mathcal{P}, \rho) - P^* U_{EC}(\mathcal{R}, \mathcal{P}, \rho) = U(\mathcal{P}^*, \rho^*) - P^* U_{EC}(\mathcal{R}^*, \mathcal{P}^*, \rho^*) = 0$ 时,可以获得最大能量效率 P^* 。

证明:

$$P^* = \max_{\mathcal{R}, \mathcal{P}, \rho} \frac{U(\mathcal{P}, \rho)}{U_{EC}(\mathcal{R}, \mathcal{P}, \rho)}$$

$$P^* \geq \frac{U(\mathcal{P}, \rho)}{U_{EC}(\mathcal{R}, \mathcal{P}, \rho)}$$

$$U(\mathcal{P}, \rho) \leq P^* U_{EC}(\mathcal{R}, \mathcal{P}, \rho)$$

$$U(\mathcal{P}, \rho) - P^* U_{EC}(\mathcal{R}, \mathcal{P}, \rho) \leq 0$$

同时,

$$U(\mathcal{P}^*, \rho) - P^* U_{EC}(\mathcal{R}^*, \mathcal{P}^*, \rho) = 0$$

$$U(\mathcal{P}, \rho) - P^* U_{EC}(\mathcal{R}, \mathcal{P}, \rho) \leq U(\mathcal{P}^*, \rho) - P^* U_{EC}(\mathcal{R}^*, \mathcal{P}^*, \rho)$$

可以推导出最佳能量效率为:

$$U(\mathcal{P}^*, \rho^*) - P U_{EC}(\mathcal{R}^*, \mathcal{P}^*, \rho^*) = 0 \quad (8)$$

其中, $\mathcal{R}^*, \mathcal{P}^*, \rho^*$ 表示最佳值。

3.2 新的有效资源分配算法

本文设计了一种新的有效资源分配算法,通过求解式(8)实现最佳能量效率,算法设计思路如下:

(1) 设定最大迭代次数为 K , 能量效率为 P , 任意最小值为 ϵ , $\{\mathcal{R}^*, \mathcal{P}^*, \rho^*\}$ 是最优资源分配方案, j 代表迭代次数。

(2) 计算能量效率 $U(\mathcal{P}, \rho) = \sum_{i=1}^N \alpha_i C_i$, $U_{EC}(\mathcal{R}, \mathcal{P}, \rho) = \sum_{i=1}^N P_i C_i R_i + \sum_{i=1}^N \epsilon P_i$ 。

算法以寻找最大能量效率为目标,具体步骤如下:

1. 初始化 $j=1, P=0$, 为了计算方便, 设定 $\alpha=1$ 。
2. 输入参数 $\epsilon=0.001, W=2$ Mbps, $K=20, H_1=0.5, \sigma_{1,i}^2=-128$ dBm, $\sigma_{S,i}^2=-115$ dBm, $h_1=10$ 。
3. 根据式(4)计算 $U(\mathcal{P}, \rho)$, 其中 C_i 通过式(1)计算。
4. 根据式(5)计算 $U_{EC}(\mathcal{R}, \mathcal{P}, \rho)$, 其中 $R_i = W \log_2(1 + P_i r_i (P_i^I))$ 。
5. While $j \leq K$, 进入主循环。
6. 根据给定的 P 计算 $\max_{\mathcal{R}, \mathcal{P}, \rho} U(\mathcal{P}, \rho) - P U_{EC}(\mathcal{R}, \mathcal{P}, \rho)$ 。
7. If $U(\mathcal{P}, \rho) - P U_{EC}(\mathcal{R}, \mathcal{P}, \rho) < \epsilon$, then $\{\mathcal{R}^*, \mathcal{P}^*, \rho^*\} = \{\mathcal{R}, \mathcal{P}, \rho\}$ and $P^* = \frac{U(\mathcal{P}, \rho)}{U_{EC}(\mathcal{R}, \mathcal{P}, \rho)}$ 。
8. else $P = \frac{U(\mathcal{P}, \rho)}{U_{EC}(\mathcal{R}, \mathcal{P}, \rho)}$ and $j=j+1$ 。
9. end if
10. end while

图3给出了本文算法的主要流程。

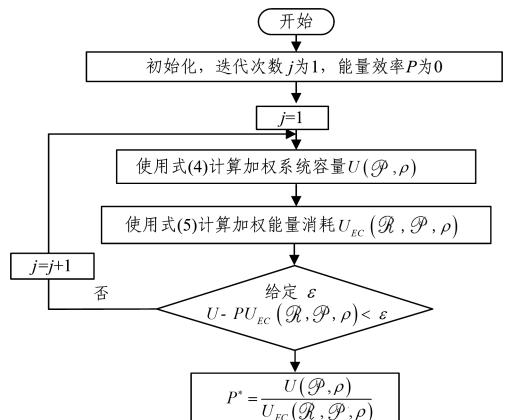


图3 算法的主要流程

Fig. 3 Flowchart of algorithm

4 性能评估

4.1 仿真评估

实验采用图 1 所示的模型,设网络覆盖区域的大小为 $100\text{m} \times 100\text{m}$,随机部署 100 个节点,每个节点既能获得能量又能译码,假设所有节点都有相同的初始能量 2 J,能量由电池提供。在基于协作 MIMO 传输时,统一使用 2×2 Alamouti 空时编码,信道为平坦瑞利衰落,采用 BPSK 调制。同时,给定数据速率为 0.5 kbps;用于译码和收集能量的分割因子的最大值取 1,最小值取 0;从发送方到接收方所需的最小能量为 0 dBm,最大能量为 20 dBm。其他的参数设置如表 1 所列。

表 1 参数设置表

Table 1 Setting of parameters

参数	数值	参数	数值
ϵ	0.001	W	2 Mbps
K	20	H_i	0.5
$\sigma_{I,i}^2$	-128 dBm	$\sigma_{S,i}^2$	-115 dBm
j	20	h_i	10

仿真 1 算法收敛性分析

对本文提出的有效资源分配算法进行仿真,为了分析其收敛性,给出不同 INR (Interference-to-signal Processing Noise Ratio)和最大发射功率额度 P_{\max} 的仿真结果,结果如图 4 所示,其中接收天线数为 2。

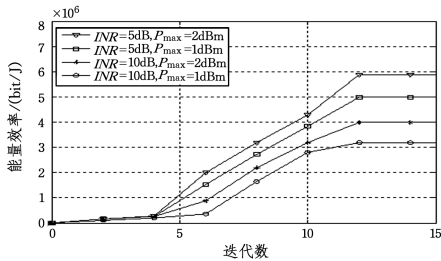


图 4 有效资源分配算法的收敛性分析

Fig. 4 Convergence analysis of efficient resource allocation algorithm

从图 4 可以看出,当迭代次数达到 12 时,本文算法收敛。能量效率随着 INR 的降低而增加,其主要原因为:对接收端而言,来自邻居节点的总信道干扰降低了接收器成功解码的总平均比特数。同时,对于给定的 INR,能量效率与 P_{\max} 成比例,其主要原因是较高的发射功率额度允许产生更大的发射功率和数据速率。

仿真 2 发射功率额度对能量效率的影响

为了进一步验证本文算法的系统性能,在不同的 INR 条件下,仿真 P_{\max} 和能量效率的关系,结果如图 5 所示。

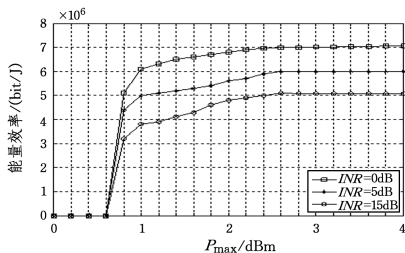


图 5 发射功率额度与能量效率的关系

Fig. 5 Relationship between transmission power allowance and energy efficiency

从图 5 可以看出,当 $P_{\max} \leq 0.6\text{ dBm}$ 时,能量效率为 0,分析其原因,从式(7)可以看出,较低的发射功率额度是不能解决最优问题的,随着发射功率额度的不断增加,能量效率迅速增大,当 $P_{\max} \geq 3\text{ dBm}$ 时,能量效率达到平稳。

4.2 原型实验

为了验证协作 MIMO 及信息和功率同时传输技术的有效性,利用 11 个 DHT11 温湿度传感器在实验室搭建一个小型室内环境监测系统,设 1 个簇包含 5 个节点,其中 1 个节点为簇头,其余 4 个节点为协作节点,簇头的选择以剩余能量为标准,剩余能量较大者优先成为簇头。协作 MIMO 通信模型如图 6 所示。

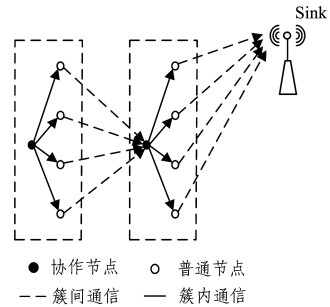


图 6 协作 MIMO 通信模型

Fig. 6 MIMO model of cooperative communication

首先,对协作 MIMO 传输和 SISO 传输的能耗进行分析。传感器的测量范围为 $20\% \sim 90\% \text{ RH}$ (Relative Humidity), $0 \sim 50^\circ\text{C}$,测湿精度 $\pm 5\% \text{ RH}$,测温精度 $\pm 2^\circ\text{C}$ 。设传感器每 5 s 采集一次数据,则在 1000 次数据采集周期中,协作 MIMO 传输和 SISO 传输每次每比特能耗的对比曲线如图 7 所示。

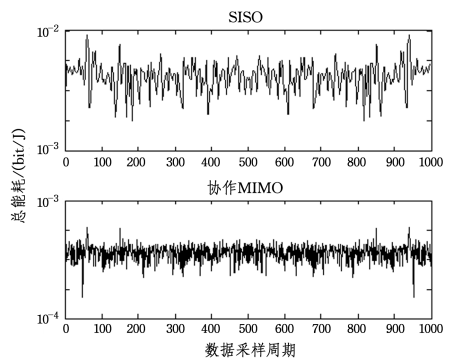


图 7 数据采集周期数与每比特总能耗的关系

Fig. 7 Relationship between cycles of data gathering and total energy consumption per bit

从图 7 可以看出,基于协作 MIMO 传输每比特数据的能耗保持平稳,相对于 SISO 传输而言,其能耗可以节省 1 个以上能量级,这主要是由于协作 MIMO 传输有多个节点协作传输,簇头的选择考虑了剩余能量,节点之间的能量得到了均衡。

其次,在上述分析中,虽然各节点的能量得到了均衡,但计算节点剩余能量的过程会导致复杂度提高。本文对簇头采用信息和功率同时传输技术,改变了簇头的广播功率。传统传播技术与本文新技术的网络效用对比如图 8 所示。可以看

出,在相同的广播功率下,采用本文提出的传输技术具有较高的网络效用,这是由于其不仅协作传输能量,还优化分配了各节点的资源。

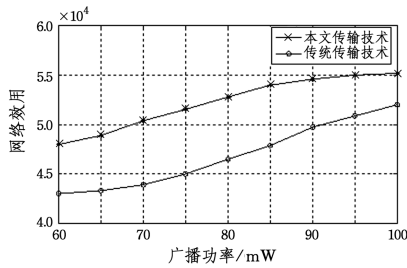


图8 网络效用分析

Fig. 8 Analysis of network utility

结束语 本文采用信息和功率同时传输技术提高了协作MIMO传输系统的能量传输效率,解决了网络中部分簇头因能量耗尽而失效以及能耗的不均衡使网络的传感覆盖率减小并严重影响WSN的使用寿命的问题。同时,本文通过有效资源分配算法实现最佳能量效率,通过仿真和实验验证了算法的有效性。

参考文献

- [1] LIU H R, SUN Y J, LIU B, et al. Energy Consumption Balanced Scale-free Fault-Tolerant Topology Model for Wireless Sensor Networks [J]. Chinese Journal of Computers, 2017, 40(8): 1843-1855. (in Chinese)
刘浩然, 孙雅静, 刘彬, 等. 能耗均衡的无线传感器网络无标度容错拓扑模型[J]. 计算机学报, 2017, 40(8): 1843-1855.
- [2] DONG H J, WEI S Y, LIU X C, et al. Review of Wireless Sensor Network Routing Method for Environment Perception [J]. Computer Science, 2018, 45(1): 14-23. (in Chinese)
董海俊, 韦素媛, 刘兴成, 等. 面向环境感知的无线传感网络路由方法综述[J]. 计算机科学, 2018, 45(1): 14-23.
- [3] TIAN X Z, HE J C, GUO M, et al. Mobile charging and data collection strategy in wireless sensor networks[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(1): 216-224. (in Chinese)
田贤忠, 何佳存, 郭敏, 等. 无线传感器网络中移动充电和数据收集策略[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(1): 216-224.
- [4] ZHANG W P, GUO Y H, WANG M. Forest based data collection in MR-MC wireless sensor networks[J]. Journal on Communications, 2016, 37(3): 40-47. (in Chinese)
张伟平, 郭亚红, 王蒙. MR-MC无线传感器网络基于森林的数据收集研究[J]. 通信学报, 2016, 37(3): 40-47.
- [5] WANG Y L, DANG G G. Forest Fire Detection System Based on Wireless Sensor Network and the Energy Saving Algorithm [J]. Computer Systems & Applications, 2015, 24(5): 210-214. (in Chinese)

- 王艳丽, 党国刚. 秦岭北麓森林火灾监测系统及节能算法[J]. 计算机系统应用, 2015, 24(5): 210-214.
- [6] YANG F, CHEN M L, WU X, et al. Warning system for forest-fire based on sensor information fusion technology[J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2013, 41(2): 22-25. (in Chinese)
杨帆, 陈茂林, 吴迅, 等. 基于传感器信息融合技术的森林火灾报警系统[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(2): 22-25.
- [7] KUO Y H, CHEN G S, CHEN J. Energy Management Policy of Wireless Energy Harvesting Sensor[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(6): 122-128. (in Chinese)
阔永红, 陈国帅, 陈健. 能量收集的无线传感器节点能量管理策略[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(6): 122-128.
- [8] RAGHUNATHAN V, GANERIWAL S, SRIVASTAVA M. Emerging techniques for long lived wireless sensor networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2006, 44(4): 108-114.
- [9] DU G Y, XIONG K, QIU Z D. Outage performance of multiuser transmission network with energy harvesting cooperative relay [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2015, 45(3): 979-985. (in Chinese)
杜冠瑶, 熊轲, 裴正定. 基于能量收集的协作中继传输性能[J]. 吉林大学学报(工学版), 2015, 45(3): 979-985.
- [10] LIANG P Y, LIU X C, SHI C, et al. Research on Dynamic Clustering Selection Algorithm of Multi-ho WSN Based on Cooperative MIMO[J]. Acta Automatic Sinica, 2010, 36(10): 1401-1408. (in Chinese)
梁平元, 刘星成, 石春, 等. 基于协作MIMO的多跳WSN动态分簇选择算法研究[J]. 自动化学报, 2010, 36(10): 1401-1408.
- [11] ZHOU X, ZHANG R, HO C K. Wireless information and power transfer architecture Design and Rate-Energy tradeoff[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(11): 4754-4761.
- [12] SIAM M Z, KRUNZ M, YOUNIS. Energy-efficient Clustering/routing for cooperative MIMO operation in sensor networks[C]// Brazil: IEEE INFOCOM. 2009: 621-629.
- [13] HU Q S, WU L X, ZHANG S, et al. Energy-saving data transmission scheme for event-driven disaster monitoring sensor networks[J]. Journal of Jilin University, 2014, 44(5): 1404-1409. (in Chinese)
胡青松, 吴立新, 张申, 等. 事件驱动的危害监测传感网中的节能数据传输[J]. 吉林大学学报, 2014, 44(5): 1404-1409.
- [14] FENG C W. Data Transmission Strategy for Wireless Sensor Network Based on Virtual MIMO[J]. Journal of Xiamen University of Technology, 2015, 23(3): 51-56. (in Chinese)
冯陈伟. 基于虚拟MIMO的无线传感网数据传输策略[J]. 厦门理工学院学报, 2015, 23(3): 51-56.