

WSN 中一种能量有效的自适应协同节点选择方案

张 余^{①②} 蔡跃明^{①③} 潘成康^① 徐友云^①

^①(解放军理工大学通信工程学院无线通信系 南京 210007)

^②(总参第63研究所 南京 210007)

^③(东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096)

摘 要: 该文针对能量有限的无线传感器网络, 提出了一种能量有效的自适应协同节点选择方案, 该方案先根据预设的能量阈值来确定协同节点的可选集, 再综合考虑可选节点的剩余能量和信道状况, 选出最佳节点作为簇头节点的协同节点。通过对总能耗的最小化, 获得不同传输距离对应的最优能量阈值; 根据簇头节点与数据融合中心间的距离自适应地预设最优能量阈值, 使总能耗最小。理论分析和仿真结果证明, 该文方案能在传输能耗和电路能耗间找到最佳平衡点, 有效地减小总能耗, 使总能耗达到最小。

关键词: 无线传感器网络; 协同通信; 节点选择; 自适应协同

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)09-2193-06

An Energy-efficient Adaptive Cooperative Node Selection Scheme in WSN

Zhang Yu^{①②} Cai Yue-ming^{①③} Pan Cheng-kang^① Xu You-yun^①

^①(Department of Radio Communication of Institute of Communications Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

^②(The 63rd Research Institute of the PLA General Staff Headquarters, Nanjing 210007, China)

^③(National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: An energy-efficient adaptive cooperative node selection scheme is proposed for energy-constrained wireless sensor networks. It determines the candidates of the Cooperative Node (CN) based on predetermined energy threshold, and then chooses the best node as the CN of Cluster Head Node (CHN) by considering the residual energy of the candidates as well as the channel state information. It can obtain the optimum energy threshold of different distances by minimizing the total energy consumption. Then the energy threshold is adaptively predetermined for minimizing the total energy consumption according to the distance between the CHN and the Data Fusion Center (DFC). The results of the theoretical analysis and simulation show that the proposed scheme can efficiently balance the transmission energy consumption and the circuit energy consumption so that it can efficiently reduce the total energy consumption, and can obtain the minimum of the total energy consumption.

Key words: Wireless Sensor Network (WSN); Cooperative communication; Node selection; Adaptive cooperation

1 引言

对于能量有限的无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)来说, 最小化能耗是网络设计需要考虑的最重要因素^[1]。WSN 中节点的能耗主要包括传感模块、处理器模块和无线通信模块的能耗, 无线通信模块的能耗是 WSN 中节点能耗的最主要部分。为减少无线通信模块的总能耗, 人们主要从通信带来的电路能耗和传输能耗两方面来降低总能耗。

协同传输技术因能获得较好的传输性能已被引入到 WSN 中用于减少能耗。基于协同 MIMO 技术的 WSN 结构成为近期研究的热点。所谓协同 MIMO 技术就是源节点与协同节点的联合传输, 与接收端构建一条虚拟 MIMO 信道。Cui 等人在文献[2]中分析了 MIMO (Multi-Input Multi-Output)系统的能耗并证明了在 WSN 中应用协同 MIMO 技术能够获得较高能效(energy efficiency)。Jayaweera 在文献[3]中提出了 WSN 中基于 V-BLAST 的协同 MIMO 结构并证明了其能量有效性和时延有效性, 此外还考虑协同开销对协同 MIMO 的影响^[4]。文献[5-9]在此基础上对无线传感器网络中的协同传输方案进行改进, 获得了较高的能效。以上网络结构的共同点

2008-11-03 收到, 2009-04-14 改回

江苏省自然科学基金(BK2007002), 国家自然科学基金(60672079)和东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金(N200814)资助课题

都是选择部分邻近节点作为协同节点,协同节点的选择策略会因不同性能准则有所不同。对于 WSN 而言,现有的研究都是将节点的剩余能量^[7-10]和邻近节点间的距离^[11,12]作为其协同节点选择准则,在一定电路能耗基础上研究协同传输技术对传输能耗的影响。基于剩余能量的节点选择还能均衡网络中节点的能耗,延长网络寿命。文献[13]针对能量不受限的无线网络,给出了两种基于信道状态信息的三节点网络协同节点选择准则,该节点选择准则能获得比文献[2-12]更好的误码性能,即所需的传输能耗更少。然而 WSN 中的节点能量有限,节点间的剩余能量值的相差可能较大,根据文献[13]的选择准则选出的协同节点很有可能是网络中剩余能量较小的节点,这样一来剩余能量较小的节点能量的大量消耗将会导致网络中节点的能耗极不均衡,使得信道质量较好的节点的能量很快耗尽,能量效率反而降低。为提高能量效率,在保证能耗均衡度的基础上降低总能耗,Bravos 等人联合考虑邻近节点的剩余能量和簇头节点与邻近节点间的本地信道状态信息,提出了一种协同节点选择方案,获得了一定的能量效率^[14],但并未考虑源节点与远端节点间的信道状况。

如前所述,基于协同 MIMO 的 WSN 传输结构中的节点选择还只是基于本地信息,并未考虑簇头节点与数据融合中心间的链路质量。本文借鉴文献[13]考虑中继节点与目的节点间的瞬时链路状态信息能够提高 MIMO 系统传输性能的思想,针对 WSN 提出了一种能量有效的自适应协同节点选择方案,该方案将 3 节点网络间的协同简化为 MISO 模型,首先根据簇内节点的剩余能量选择出能量大于预设能量阈值的簇内节点,再综合考虑节点的剩余能量和链路质量选出最优的节点作为协同节点,接着通过对总能耗的最小化,获取了不同距离对应的最优能量阈值,最后再根据簇头节点与数据融合中心间的距离自适应地选择不同的能量阈值,使能效达到最优。此方案的特点在于通过设置剩余能量的阈值选择协同节点,在传输能耗与电路能耗间找到了一个平衡点,同时考虑了部分节点的剩余能量信息与对应的链路质量,避免了局部最优;通过自适应选择能量阈值使总能耗最小,最大限度地减少总能耗;将节点选择的主要实现过程转移到数据融合中心,使能耗转移到能量可补给的数据融合中心,减少能量受限节点的能耗。

本文结构安排如下:第 2 节给出了系统模型,并对节点选择方案进行了详细的说明;第 3 节,从理论上分析了所提的协同节点选择方案在协同节点

选择和协同传输两阶段的能耗以及能量更有效的自适应协同传输的能耗;第 4 节给出了性能仿真及性能分析;最后对全文进行了总结。

2 系统模型与节点选择方案

2.1 系统模型

不失一般性,本文在 Cui 等人在文献[2]提出的 WSN 中的协同 MIMO 模型的基础上,建立了一个以分簇网络为基础的簇头节点(Cluster Head Node, CHN)与数据融合中心(Data Fusion Center, DFC)进行通信的协同 MISO(Multi-Input Single-Output)系统模型,如图 1 所示。

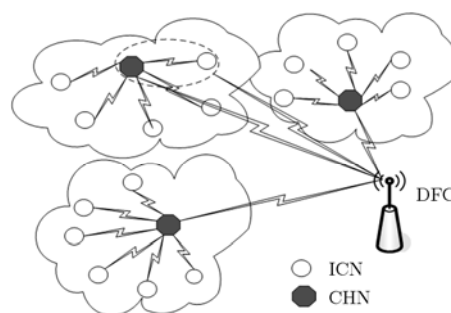


图 1 基于分簇网络结构的协同传输模型

假设接收端为能量可补给仅配置一根天线的 DFC,且可准确估计每个节点对应的信道状态信息;CHN 和簇内成员节点(Intra-Cluster Nodes, ICNs)的能量有限且只配置一根天线,簇内节点间的距离相对 CHN 与 DFC 间的距离来说非常小,簇内节点间的信道设为加性高斯白噪声信道,信道系数服从均值为 0,方差为 1 的标准复正态分布;CHN 和 ICNs 与 DFC 间的信道为 Rayleigh 平坦衰落信道,信道系数 $h_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 服从均值为 0,方差为 1 的复正态分布且 DFC 端忍受加性复高斯白噪声,同簇内各信道相互独立且同分布。

2.2 节点选择方案

协同节点选择是 WSN 中应用协同传输技术的基础,在现有的协同节点选择和 3 节点网络的基础上,基于以上系统模型,综合考虑 ICNs 的剩余能量和 ICNs 与 DFC 间链路的信道增益,本文提出了一种协同节点选择方案。假设簇内有 N 个 ICNs,从较多的 ICNs 中选择一个信道增益最大的来协助 CHN 传输数据,传输性能可能提高较大,传输能耗减小比较明显,但是处于活动状态的节点较多,对应的电路能耗较大;如可选的节点数减少,传输性能可能下降,传输能耗可能增大,但处于活动状态的节点数减少,电路能耗减少。可见,传输能耗与

电路能耗是一对矛盾。为能在电路能耗和传输能耗间找到一个最佳平衡点, 本文在进行协同节点选择时, 设置了一能量阈值 E_{th} , 只有剩余能量大于预设能量阈值时, 才被列入可选的对象。因此, 本文提出的协同节点选择方案可分为以下两个阶段:

阶段 1: 确定可选集: $\mathcal{D}(r): \{r_i \in \mathcal{D}(r): E_{left,i} \geq E_{th}\}$ 。其中, r_i 为第 i 个 ICN, $E_{left,i}$ 为第 i 个 ICN 的剩余能量初始值。按照 LEACH 协议的思想, 在选出 CHN 后, CHN 与其他 ICNs 进行信息交互, 形成簇。同时, 各节点将自己的剩余能量 $E_{left,i}$ 与预设能量阈值 E_{th} 进行比较, 如 $E_{left,i} \geq E_{th}$, 则将节点 r_i 归为可选集 $\mathcal{D}(r)$, 否则, 转入睡眠状态以节约能量。

阶段 2: 从可选集 $\mathcal{D}(r)$ 中选择最佳节点 $r_k = \arg \max_{r_i \in \mathcal{D}(r)} \frac{E_{left,i}}{\max_{r_j \in \mathcal{D}(r)} E_{left,j}} |h_i|^2$ 作为 CHN 的协同节点 (CN)。CHN 已获知 ICNs 的剩余能量和 ID, 只需将能量比值进行编码, 然后再发送给可选集里的 ICNs, 再一起协作发送给 DFC, DFC 通过收到的信息进行信道估计, 并译出比值信息, 最后按照 $r_k = \arg \max_{r_i \in \mathcal{D}(r)} \frac{E_{left,i}}{\max_{r_j \in \mathcal{D}(r)} E_{left,j}} |h_i|^2$ 准则确定最佳 CN, 然

后再将最佳节点 ID 通过反馈信道反馈给 CHN 和处于可选集里的 ICNs, 收到自己 ID 的节点将作为 CHN 的 CN, 其他节点为节省能量转入睡眠状态。

如果在最佳的 CN 和 CHN 之间选择信道增益较大的来单独发送数据, 将会导致单个节点的负担较重, 能量消耗较大, 节点容易因能量耗尽而死亡, 因此在选择出最佳 CN 后, CHN 与 CN 按照 Alamouti 码联合编码, 然后通过 MISO 信道进行传输, 从以上两个阶段可知, 此节点选择方案在信道增益和节点的剩余能量间找到一个平衡, 使得选择出来的节点为全局最佳节点, 下文将对此方案的能耗进行分析。

2.3 自适应协同传输

CHN 与 DFC 间的信道不但要忍受 Rayleigh 平坦衰落的影响, 还受自由空间衰减因子的影响, 在接收端要获得相同信噪比条件下, 两者间的距离越大, 发射端的功率越大。因此, CHN 与 DFC 间的距离对整个网络的能耗有很大的影响。当距离较小时, 节点的电路能耗为主要能耗, 而当距离较大时, 传输能耗为主要能耗。由 2.2 节可知剩余能量阈值越大, 传输能耗越大, 反之, 电路能耗越大, 因此, 要使总能耗最小, 需要在不同的距离设置不同的能量阈值。通过对总能耗的最小化, 获取 CHN 与 DFC

间不同距离对应的最优能量阈值, 然后通过距离自适应地设置最佳能量阈值, 使得总能耗最小。

3 能耗分析

为证明本文提出的节点选择方案能够进一步减少协同 MISO 传输的性能, 我们对该方案的能耗进行理论分析。相比文献[2]的协同传输模型的能耗, 本文方案增加了 CN 选择阶段的能耗, 下面就 CN 选择和协同传输模型两阶段的能耗进行分析。

3.1 CN 选择阶段的能耗

CN 选择阶段主要是将可选集中 ICNs 的剩余能量信息和 ID 发送给 DFC, DFC 通过接收到的信息估计出信道状态信息和能量信息, 根据估计出来的信息选择最佳的 CN, 因 DFC 的能量可补给, 可不考虑 DFC 的能耗。因此, 此阶段的总能耗可以表示为

$$E_{CN} = E_{CN-cir} + E_{CN-trans} \quad (1)$$

其中 E_{CN-cir} 为 CN 选择阶段的电路能耗, 包括 CHN 和可选集 $\mathcal{D}(r)$ 中 ICNs 的电路能耗, 可表示为

$$E_{CN-cir} = N_{sel} N_{sup} ((P_{cir-Tx} + N_{sel} P_{cir-Rx}) / b_{local} B + (N_{sel} + 1) P_{cir-Tx} / b_{long} B) \quad (2)$$

其中 N_{sel} 为可选集中 ICNs 数; N_{sup} 为每个 ICN 的剩余能量与 ID 的信息长度; b_{local} 和 b_{long} 分别为簇内通信和协同传输的调制星座大小; B 为协同 MISO 系统的调制带宽; P_{cir-Tx} 和 P_{cir-Rx} 为发送和接收数据的电路消耗的功率, 计算方式见文献[2]。

式(1)中 $E_{CN-trans}$ 为 CN 选择阶段的传输能耗, 包括簇内通信和协同传输两部分能耗, 可表示为

$$E_{CN-trans} = N_{sel} N_{sup} \cdot \left[(1 + \alpha) \xi_{bit} \frac{(4\pi)^2 d^\tau}{G_{Tx} G_{Rx} \lambda^2} M_{link} N_f + \xi_{local-trans} \right] \quad (3)$$

其中当采用 MQAM 调制时, $\alpha = (3/\eta)(2^{b/2} - 1) / (2^{b/2} + 1) - 1$, η 为 RF 功放的耗用率, b 为调制星座大小; M_{link} 为链路预留(link margin); d 为 CH 与 FC 间的距离; G_{Tx} 和 G_{Rx} 分别为发射端和接收端的天线增益; λ 为载波波长; $\tau = 2 \sim 4$ 为衰落因子; ξ_{bit} 为 CN 选择阶段, 在给定误码率条件下未考虑 Rayleigh 衰落时接收端的比特能量, 可通过文献[2]求得; $\xi_{local-trans}$ 为簇内通信在一定误码率条件下传输 1 bit 的传输能耗, 由系统模型可知, 当簇内节点间距离很小时, 采用 SISO(Single-Input Single-Output)传输模型的性能比 MISO 传输模型的性能好^[15], 因此, 本文簇内通信采用文献[15]的模型, 由

文献[15]即可求得 $\xi_{\text{local-trans}}$ 。

3.2 协同 MISO 传输的能耗

CN 选择完成后, CHN 和 CN 与 DFC 形成协同 MISO 信道, CHN 和 CN 通过协同 MISO 信道将需要发送的信息协同发送给 DFC, 与 CN 选择阶段类似, 不考虑 DFC 的能耗, 此阶段的总能耗可表示为

$$E_{\text{MISO}} = N_b \left((1+\alpha) \xi_{\text{bit-long}} \frac{(4\pi)^2 d^r}{G_{\text{Tx}} G_{\text{Rx}} \lambda^2} M_{\text{link}} N_f + P_{\text{cir-Tx}} / b_{\text{long}} B \right) + E_{\text{local}} \quad (4)$$

其中 E_{local} 为簇内通信的总能耗, 无论哪种协同传输方式, 在传输相同数据时, E_{local} 相同; 在此不予讨论; N_b 为需要传输的比特数; $\xi_{\text{bit-long}}$ 为协同 MISO 传输阶段, 在接收端满足一定误码率要求时未考虑 Rayleigh 衰落时的比特能量, 可通过数值仿真获得。由于从理论上很难获得 $\xi_{\text{bit-long}}$ 的具体表达式, 为从理论上分析能耗, 在此只讨论 $\xi_{\text{bit-long}}$ 的契尔洛夫上限。

调制方式对 CN 选择方案的分析影响不大, 为简便起见, 协同 MISO 传输阶段采用 BPSK 调制, 以下定理给出了采用 BPSK 调制的平均误码率的契尔洛夫上限。对定理中所述的表达式求反函数即可得 $\xi_{\text{bit-long}}$ 的契尔洛夫上限, 即

$$\xi_{\text{bit-long}} f^{-1}(\overline{\text{Pr}}_{\text{bit}}) \quad (5)$$

但很难从式(5)得出精确表达式, 只有通过数值仿真得出 $\xi_{\text{bit-long}}$ 的契尔洛夫上限值。然后将获取的 $\xi_{\text{bit-long}}$ 代入式(4)即可得协同 MISO 传输阶段的总能耗。

定理 如采用 BPSK 调制, 基于能量阈值的节点选择方案的协同传输阶段的平均误码率的契尔洛夫上限可用下式表示

$$\overline{\text{Pr}}_{\text{bit}} \approx \sum_{l \in \text{Num}(D(s))} C_N^l e^{-\lambda E_{\text{th}} l} (1 - e^{-\lambda E_{\text{th}}})^{N-l} \frac{1}{\xi_b / 2N_0 + 1} \cdot \int_0^\infty \exp\left(-\frac{\xi_{\text{bit-long}}}{2N_0} h_m\right) m(1 - e^{-h_m})^{m-1} e^{-h_m} dh_m \quad (6)$$

定理的证明略。

从式(4)-式(6)可知, E_{MISO} 随着 d 的增大而增大, 随着 E_{th} 的减小而减小。要想使 E_{MISO} 减小, 只有减少 E_{th} , 但是随着 E_{th} 的减小, 可选集的节点数增加, CN 选择的能耗 E_{CN} 将增大, 因此, E_{MISO} 与 E_{CN} 是一对矛盾, 要想使本文方案的总能耗 $E_{\text{total}} = E_{\text{CN}} + E_{\text{MISO}}$ 最小, 必须要在 E_{MISO} 和 E_{CN} 找到一个平衡点。通过式(7)求出最小的总能耗, 并得

出了不同距离对应的最优能量阈值, 即

$$E_{\text{th-opt}} = \arg \min_{E_{\text{th}}} E_{\text{total}} \quad (7)$$

CHN 根据与 DFC 间的距离自适应地选择最佳能量阈值, 使得网络的总能耗最小。

4 性能仿真

为验证本文方案的有效性, 在此给出了性能仿真。无线传感器网络中现有的协同节点选择方案主要有基于节点剩余能量^[2-10]、邻居节点间的距离^[11,12]和联合节点剩余能量与簇内节点间的信道状态信息^[14]的节点选择方案, 簇内邻居节点之间的距离较小且信道质量相差不大, 后两种节点选择方案对于分簇无线传感器网络而言意义不大, 而各节点剩余能量的差别较大, 对能量效率有很大的影响。因此, 我们比较了本文方案与基于剩余能量的协同节点选择方案的性能。为便于说明, 我们将基于剩余能量的协同节点选择方案简称为传统方案, 具体的实现过程可参照文献[7]。

图2给出了本文提出的 CN 选择方案传输 1 bit 的传输能耗上限随误码率的变化曲线, 并与传统方案的 2 发 1 收和 3 发 1 收的协同 MISO 进行了比较。设 $N = 20$, $N_{\text{sup}} = 16$ bit, 节点剩余能量初始值均为 120 J, 传输距离为 50 m, 其他参数见文献[2]。由图可知, 在相同误码率条件下, 传输 1 bit 信息时, 本文方案比传统方案的能耗小, 甚至比 3 发 1 收的 MISO 的传输能耗还小, 且预设的能量阈值越小, 需要的比特能量越少。

图3给出的传输能耗与能量阈值的关系曲线更能说明这一现象, 图3还显示出当预设的能量阈值为 0 时, 传输能耗最小, 此时, 相当于从簇内的 N 个节点中选择最佳的节点, 这样能充分地利用较好信道对应的节点来协助簇头发送信息, 但又引入新的问题, 如图4, 能量阈值较小将导致处于活动状态的节点数增多, CN 选择阶段的电路能耗增多, 在进行短距离传输时, 电路能耗的增多将会使整个能耗上升, 达不到减少总能耗的效果。图5给出了传输距离为 200 m, 传输比特为 10 kbit 时, 电路能耗、传输能耗和总能耗随能量阈值的变化曲线, 从图中可以看出传输能耗小时, 电路能耗大; 传输能耗大时, 电路能耗小, 总能耗不一定最小。当能量阈值取合适值时, 即 $E_{\text{th}} = 80$ J 总能耗才能达到最小, 由此可见电路能耗与传输能耗是一对矛盾, 只有在两者之间取得较好的平衡才能在某种程度上降低总能耗。

图6中给出了在固定能量阈值时, 总能耗与传输距离的变化曲线, 从图中可看出, 当 CHN 与 DFC

间的距离小于 50 m 时,传统方案的能耗比本文方案的能耗小;当 CHN 与 DFC 间的距离大于 50 m 小于 250 m 时,能量阈值为 120 J 时 CN 选择方案的能耗最小;当传输距离大于 250 m 时,能量阈值为 0 J 时 CN 选择方案的能耗最小。可见,在不同的距离设置不能的能量阈值才能使网络的总能耗最小。图 6 同时给出了对应的统计仿真曲线,从虚线可以得出与理论限分析相同的结论。

根据式(7)可求出不同的距离对应的最佳能量阈值,如表 1。根据这些能量阈值,在进行不同距离传输时,自适应地选择不同的能量阈值,使得网络的总能耗最小。图 7 给出了采用自适应协同传输后,网络的最小总能耗随传输距离的变化曲线,从图中可看出,自适应协同传输相比传统的 2 发 1 收

的协同 MISO 传输策略有更小的能耗,且在远距离传输时,比能量阈值设定为 120 J 时的能耗小,此外,还比传统的 3 发 1 收的协同 MISO 传输策略的能耗小且随着距离的增大,减少的能耗越多。综上所述,本文方案能有效减少网络总能耗。

5 结束语

本文针对无线传感器网络提出了一种基于预设的能量阈值的协同节点选择方案,该方案通过对簇头节点与数据融合中心之间通信的总能耗的最小化,得出最优能量阈值,根据距离自适应地设置最佳的能量阈值,使得总能耗最小。本文建立了基于此协同节点选择方案的能耗模型,分析了节点选择中能量阈值对传输能耗和电路能耗的影响,给出了

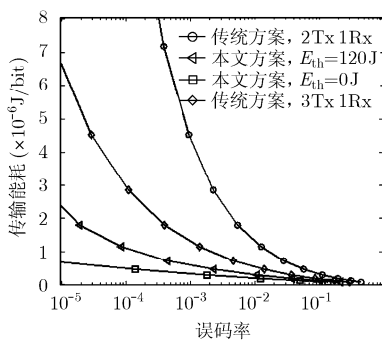


图 2 传输 1bit 的传输能耗上限随误码率变化的曲线

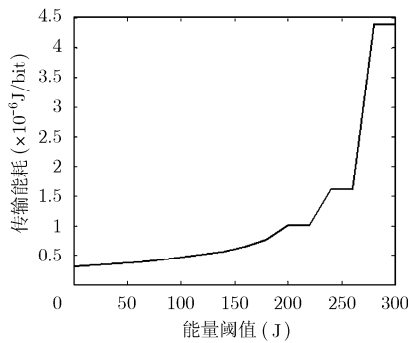


图 3 在误码率为 0.001 时,传输 1bit 的传输能耗上限受能量阈值的影响曲线

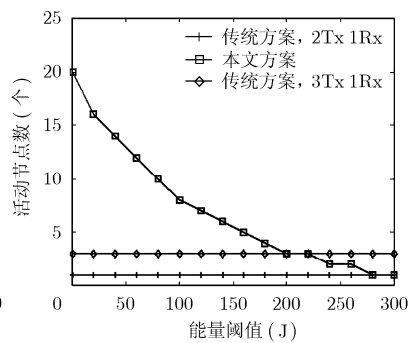


图 4 簇内活动节点数随能量阈值的变化曲线

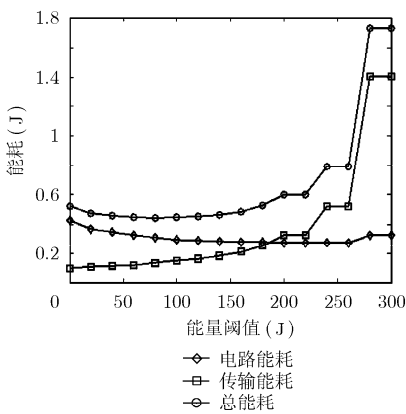


图 5 电路能耗、传输能耗和总能耗随能量阈值的变化曲线

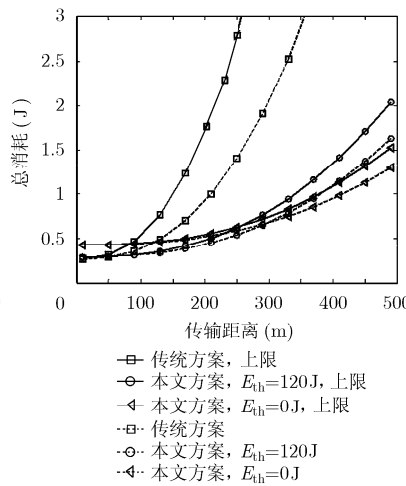


图 6 固定能量阈值时,传输距离对总能耗的影响曲线

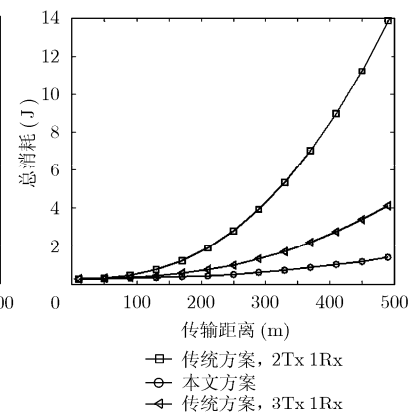


图 7 自适应协同传输的总能耗最小值与传输距离的变化关系

表 1 不同距离对应的最优能量阈值

| | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $d(m)$ | 10 | 50 | 90 | 130 | 170 | 210 | 250 | 290 | 330 | 370 | 410 | 450 | 490 |
| $E_{th}(J)$ | 280 | 200 | 160 | 120 | 100 | 80 | 60 | 60 | 40 | 40 | 20 | 20 | 20 |

自适应的协同传输策略, 并对其性能进行了分析与仿真。理论分析与仿真结果表明, 本文提出的协同节点选择方案能在传输能耗和电路能耗间找到了一个较好平衡点使总能耗达到最小。例如在簇头节点与数据融合中心的距离为 300 m, 传输数据比特数为 10 kbit, 误码率为 0.001 时, 本文方案的能耗比传统 2 发 1 收的 MISO 传输方案的能耗约少 3.5 J, 比传统 3 发 1 收的 MISO 传输方案约少 0.6 J。虽然本文提出的方案只针对于基于分簇的无线传感器网络, 但是本文提出的节点选择方案在能量有限的网络中有一定的相通性, 可推广到其他能量有效的网络中去, 具有一定的扩展性。

参考文献

- [1] Akyildiz I F, Su W, and Sankarasubramaniam Y, *et al.* A survey on sensor networks [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(8): 102-114.
 - [2] Cui S, Goldsmith A J, and Bahai A. Energy-efficiency of MIMO and cooperative MIMO techniques in sensor networks [J]. *IEEE Journal Selected Areas Communication*, 2004, 22(6): 1089-1098.
 - [3] Jayaweera S K. V-BLAST-based virtual MIMO for distributed wireless sensor networks [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2007, 55(10): 1867-1872.
 - [4] Jayaweera S K. Virtual MIMO-based cooperative communication for energy-constrained wireless sensor networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communication*, 2006, 5(5): 984-989.
 - [5] Kim J and Lee W J. Cooperative relaying strategies for multi-hop wireless sensor networks [C]. COMSWARE 2008, Bangalore, 2008, 1: 103-106.
 - [6] Simić L, Berber S M, and Sowerby K W. Energy-efficiency of cooperative diversity techniques in wireless sensor networks[C]. PIMRC'07, Athens, 2007, 9: 1-5.
 - [7] Nguyen T D, Berder O, and Sentieys O. Cooperative MIMO schemes optimal selection for wireless sensor networks[C]. VTC2007-Spring, Dublin, 2007, 4: 85-89.
 - [8] Ahmed I, Peng M, and Wang W. Uniform energy consumption through adaptive rate communications in cooperative MIMO based wireless sensor networks[C]. IEEE WiCom 2007. Shanghai, 2007, 10: 1-4.
 - [9] Bravos G N, Efthymoglou G, and Kanatas A G. MIMO-based and SISO Multihop Sensor Networks: Energy Efficiency Evaluation[C]. WiMOB 2007, White Plains, NY, 2007, 10: 13-20.
 - [10] Himsoon T, Siriwongpairat W P, and Han Z, *et al.* Lifetime maximization by cooperative sensor and relay deployment in wireless sensor networks [C]. 2006 WCNC. Alaska, 2006, 4: 439-444.
 - [11] Lin Z, Erkip E, and Stefanov A. Cooperative regions and partner choice in coded cooperative systems [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2006, 54(7): 1323-1334.
 - [12] Zhao B and Valenti M C. Practical relay networks: A generalization of hybrid-ARQ [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, 23(1): 7-18.
 - [13] Bletsas A, Khisti A, and Reed D P, *et al.* A simple cooperative diversity method based on network path selection [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2006, 24(3): 659-672.
 - [14] Bravos G N and Kanatas A G. Energy efficiency of MIMO-based sensor networks with a cooperative node selection algorithm [C]. ICC2007, Glasgow, 2007, 6: 3218-3223.
 - [15] Cui S, Goldsmith A J, and Bahai A. Energy-constrained modulation optimization [J] *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2005, 4(5): 2349-2360.
- 张 余: 男, 1983年生, 硕士, 助理工程师, 研究方向为认知无线电、无线传感器网络、协同传输技术等。
- 蔡跃明: 男, 1961年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为下一代移动通信、数字通信等。
- 潘成康: 男, 1978年生, 博士生, 研究方向为网络信息理论、下一代无线资源管理技术等。
- 徐友云: 男, 1966年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为信息论与编码、无线资源管理、下一代无线通信网络等。