

无线传感器网络中增加协作传输及其能量效率研究

王绍青 聂景楠

(解放军理工大学通信工程学院 南京 210007)

摘要: 该文研究了无线传感器网络中增加协作传输及其能量效率,解决了“何时协作”和“协作的能效”两个关键问题。导出了直接传输与协作传输的能效表达式,讨论了主要参数对协作传输性能的影响。仿真结果表明:当通信距离大于“门限距离”时,增加协作传输的能效优于直接传输的能效;通过优化所选中继节点的位置或调制阶数可以提高能效。

关键词: 无线传感器网络; 增加协作传输; 直接传输; 能量效率

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)03-0759-04

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01096

Research on Incremental Cooperation Transmission and Its Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks

Wang Shao-qing Nie Jing-nan

(Institute of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: The scheme of incremental cooperation transmission and its energy efficiency in wireless sensor networks are studied in this paper. Two important issues including ‘when to cooperate’ and ‘performance of cooperation’ are also solved. The expressions of energy efficiency of direct and cooperative transmission are deduced respectively and then the effects of key parameters on the performance of cooperative transmission are discussed. Simulation results demonstrate that the incremental cooperation transmission provides better energy efficiency than direct transmission when the communication distance is bigger than the threshold of the distance. Energy efficiency can be enhanced by optimizing the position of the relay node selected or the modulation level.

Key words: Wireless Sensor Networks (WSN); Incremental cooperation transmission; Direct transmission; Energy efficiency

1 引言

无线传感器网络(WSN)中的节点靠电池供电,因而提高 WSN 的能量效率是一个重要的设计指标。无线信道的多径衰落特性降低了 WSN 数据传输的可靠性,进而浪费了传输能量并降低了能效。文献[1-6]的研究表明:协作分集技术利用邻居节点的天线实现了空间分集,是一种克服多径衰落的有效方法,因而将协作分集技术引入 WSN,有利于提高系统能效。文献[3]提出了多种协作分集协议:基于放大前传(Amplify-and-Forward, AF)、译码前传(Decode-and-Forward, DF)的固定中继(fixed relaying)、选择中继(selection relaying)和增加中继(incremental relaying)协议。

文献[7-10]进一步研究了分簇 WSN 中基于空时编码的协作 MIMO 方案及其能效问题;其中,簇内

的传感器节点以协作的方式共享天线而形成一个虚拟天线阵列,可以获得虚拟 MIMO 的增益。但是,空时编码的使用需要同一簇内的协作传感器节点在时间上完全同步,因而实现复杂度较高。考虑到增加协作传输只在目的节点未成功接收源节点数据分组的条件下,才迫使中继节点重传分组,其频谱效率和能效较高^[11,12]。因此,为了降低协作分集的实现复杂度,提高系统能效,本文将增加协作分集引入 WSN,研究了“何时协作”及“协作的能效”两个问题。

由于 WSN 节点处理电路能耗在总能耗中占有重要的比率,因此,本文在考虑节点处理电路能耗的前提下,研究了 WSN 中增加协作通信及其能量效率——单位能量所支持的成功传输的分组数,导出了直接传输与协作传输两种模式下系统能效的表达式,深入讨论了通信距离、中继节点位置和调制阶数对协作传输性能的影响,通过仿真比较了直接传输与协作传输的能量效率,进而解决了何时采用

增加协作分集才能提高系统能效这一关键问题。

2 协议模型

2.1 增加协作传输协议

如图1所示,考虑一个由源节点 s , 目的节点 d 和中继节点 r 组成的3节点系统; 每节点只配备1个天线。增加协作传输协议的工作过程如下: 来自上层协议栈的分组在节点的发送缓存中排队, 节点 s 按照先入先出的规则和时隙方式发送数据分组至目的节点 d 。由于无线信道的广播本质, 节点 d 和中继节点 r 均可接收 s 发送的分组。假设接收节点可以通过完美的CRC校验判断分组接收的正确性, 若节点 d 接收分组正确, 则广播ACK报文(设ACK报文的传输无错无时延); 节点 r 收到ACK报文后, 认为 $s-d$ 间分组传输成功, 不进行分组转发, 节点 s 收到ACK报文后, 发送新的分组。若节点 d 接收分组错误, 则广播NACK报文(设NACK报文的传输无错无时延), 一方面, 若节点 r 在时隙1正确接收节点 s 发送的分组, 则在收到NACK报文后, 在时隙2重传数据分组至节点 d , 若节点 d 的CRC校验正确, 则广播ACK报文, 否则, 做丢包处理; 另一方面, 若节点 r 在时隙1未能正确接收节点 s 发送的分组, 则告知源节点 s 做丢包处理。

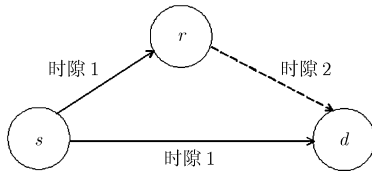


图1 增加协作传输示意图

2.2 信道模型与误分组率

假设源节点 s 和中继节点 r 采用相同的发送功率 P_t , $s-r$, $s-d$, $r-d$ 信道服从平坦瑞利衰落且互相独立, 在一个时隙内信道衰落保持不变, 相邻时隙的信道衰落随机变化; 那么, 各链路的接收信噪比服从负指数分布, 其概率密度函数可表示为

$$f_{\gamma_{ij}}(\gamma) = \frac{1}{\sigma_{ij}} \exp\left[-\frac{\gamma}{\sigma_{ij}}\right] \quad (1)$$

其中 i 表示发送节点 s 或 r , j 表示接收节点 r 或 d , σ_{ij} 为链路的平均信噪比。

令 r_{sd} , r_{sr} , r_{rd} 表示链路距离, 则有: $\sigma_{sd} = P_t \cdot (r_{sd})^{-\alpha} / N_0$, $\sigma_{sr} = P_t (r_{sr})^{-\alpha} / N_0$, $\sigma_{rd} = P_t (r_{rd})^{-\alpha} / N_0$ 。这里, α 为路径损耗指数, N_0 为高斯白噪声的平均功率。

若节点采用理想奈奎斯特脉冲和 M-QAM 调制方式, 则调制水平 $b = \log_2 M$, 那么, 各链路在瑞利

衰落信道下的误符号率可表示为^[13]

$$\text{PSR}_{ij} \approx 2(1 - 2^{-b/2}) \left(1 - \sqrt{\frac{3\sigma_{ij}}{2(2^b - 1) + 3\sigma_{ij}}} \right), \quad b \geq 2 \quad (2)$$

因此, $s-d$ 链路的误分组率, 即直接传输的平均误分组率为

$$\text{PER}^D = \text{PER}_{sd} = 1 - (1 - \text{PSR}_{sd})^{L/b} \quad (3)$$

其中 L 为分组长度。同理, $s-r$, $r-d$ 链路的平均误分组率可分别表示为

$$\text{PER}_{sr} = 1 - (1 - \text{PSR}_{sr})^{L/b} \quad (4)$$

$$\text{PER}_{rd} = 1 - (1 - \text{PSR}_{rd})^{L/b} \quad (5)$$

那么, 增加协作传输的平均误分组率可表示为

$$\text{PER}^C = \text{PER}_{sd} \text{PER}_{sr} + \text{PER}_{sd} (1 - \text{PER}_{sr}) \text{PER}_{rd} \quad (6)$$

3 能效分析

系统能耗由节点的功放能耗和电路能耗两部分组成。考虑功放损耗因子为 β , 发射节点电路功率开销为 P_{ct} , 接收节点电路功率开销为 P_{cr} , 那么, 直接传输模式下传输一个分组的平均能耗为

$$E^D = (P_t(1 + \beta) + P_{ct} + P_{cr})L / R_b \quad (7)$$

其中 $R_b = R_s \times b$ 为比特发送速率, R_s 为符号速率。

定义单位能耗所支持的成功传输的分组数为系统能效, 那么, 直接传输的能效为

$$\eta^D = \frac{1 - \text{PER}^D}{E^D} = \frac{(1 - \text{PER}^D)R_b}{(P_t(1 + \beta) + P_{ct} + P_{cr})L} \quad (8)$$

同理, 增加协作传输的平均能耗为

$$\begin{aligned} E^C &= (1 - \text{PER}_{sd})(P_t(1 + \beta) + P_{ct} + 2P_{cr})L / R_b \\ &+ \text{PER}_{sd} \text{PER}_{sr} (P_t(1 + \beta) + P_{ct} + 2P_{cr})L / R_b \\ &+ \text{PER}_{sd} (1 - \text{PER}_{sr})(2P_t(1 + \beta) + 2P_{ct} + 3P_{cr}) \\ &\cdot L / R_b \end{aligned} \quad (9)$$

其中, 第1项表示在 $s-d$ 链路上分组传输成功条件下的能耗, 第2项表示在 $s-d$ 和 $s-r$ 链路上分组均传输失败条件下的能耗, 第3项表示在 $s-d$ 链路上分组传输失败, 但在 $s-r$ 链路上分组传输成功条件下的能耗。结合式(6)和式(9), 可得增加协作传输的能效为

$$\eta^C = \frac{1 - \text{PER}^C}{E^C} \quad (10)$$

综合式(9), 式(10), 增加协作传输相对于直接传输的能效增益可表示为

$$G = \eta^C / \eta^D \quad (11)$$

显然, 若上式中 $G > 1$, 则表明增加协作传输的能效优于直接传输的能效。

4 仿真结果与讨论

依据第3节的理论推导, 本节通过仿真, 研究协作传输的能效在何种情况下优于直接传输的能效, 并讨论主要参数对能效增益的影响。不妨设节点 s, r, d 位于一条直线上, 定义中继节点 r 至 d 的距离 $r_{rd} = q \times r_{sd} (0 < q < 1)$ 。除特别说明外, 主要参数取值如下: $\alpha = 4, \beta = 0.3, L = 2048 \text{ bit}, R_s = 10 \text{ k}, P_t = 0.001 \text{ W}, P_{ct} = 10^{-4} \text{ W}, P_{cr} = 5 \times 10^{-5} \text{ W}, N_0 = 10^{-13.5}, M = 4, q = 0.5$ 。

4.1 通信距离和中继节点位置对能效的影响

图2比较了通信距离(即源节点至目的节点距离 r_{sd})和中继节点位置对能效的影响。当 r_{sd} 大于41 m时, 增加协作传输的能效高于直接传输能效; 反之, 协作传输能效低于直接传输能效。本文称此距离为“门限距离 r_{th} ”。这是由于当 r_{sd} 较小时, 直接传输的 PER^D 较小, 协作传输降低系统误分组率的能力有限, 而其能耗却高于直接传输的能耗, 因而, 直接传输的能效高于协作传输的能效; 当 r_{sd} 增大时, PER^D 随之增大, 直接传输能效迅速变小, 而协作传输的误分组率可以保持较低水平, 其能效自然高于直接传输的能效。此外, 若 r_{sd} 大于门限距离, 中继节点位于 $s-d$ 中间位置时 ($q=0.5$), 协作传输能效最高。此结论对中继节点的选择具有一定的指导意义。图3比较了中继节点位置对能效增益的影响。显然, $q=0.5$ 时, 协作传输能效增益最大; 因为此时, PER_{sr} 和 PER_{rd} 均可保持较低水平。而当中继节点距离源节

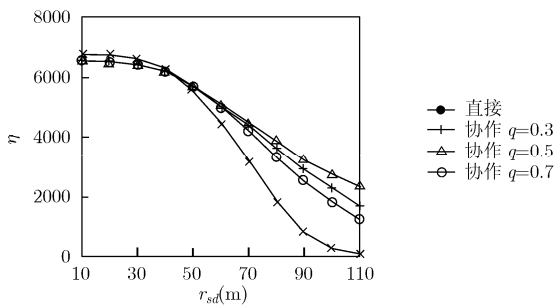


图2 中继节点位置对协作传输能效的影响

点 ($q=0.7$) 或目的节点 ($q=0.3$) 较近时, 会分别导致 PER_{rd} 或 PER_{sr} 较高, 此时, 协作传输的误分组率 PER^C 高于 $q=0.5$ 时的 PER^C , 因而能效增益低于 $q=0.5$ 时的能效增益。

4.2 门限距离的确定方法

若令式(11)等于1, 则可解出门限距离 r_{th} , 但其表达式十分复杂。如图3所示, 能效增益随通信距离 r_{sd} 单调递增, 因此, 可用简单的一维搜索算法导出门限距离 r_{th} 的近似解。算法如下:

```

r_sd=10; %通信距离初始化
G=0; %能效增益初始化
K=1; %步长
while (G < 1)
do {
    r_sd=r_sd+K};
r_th = r_sd;
    
```

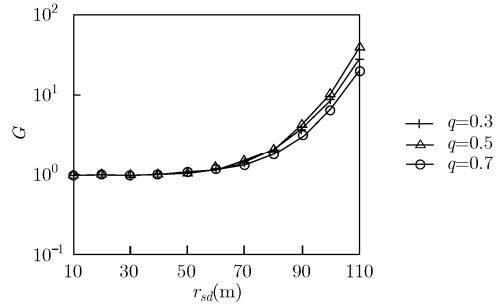


图3 中继节点位置对能效增益的影响

4.3 调制阶数对能效的影响

图4给出了调制阶数对能效的影响。从图中可以看出: 调制阶数越高, 门限距离值越小。 $M=4, 8, 16$ 的距离门限值分别为: 41, 34, 30 m。此外, 当 r_{sd} 较小时, 调制阶数越高, 能效越高。对于不同的通信距离 r_{sd} , 以能效最大化为目标, 存在优化的调制阶数。因此, 针对不同的通信距离 r_{sd} , 通过优化调制阶数, 可以提高能效。图5是不同调制阶数下的能效增益性能曲线。从图5可得结论: 调制阶数越高, 能效增益越大。

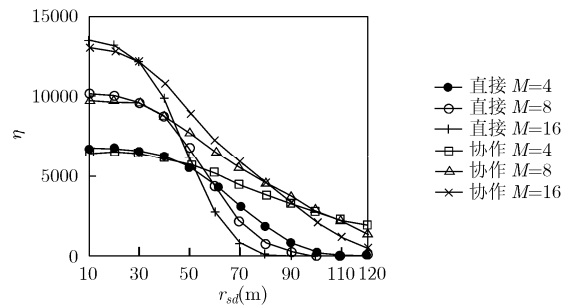


图4 调制阶数对协作传输能效的影响

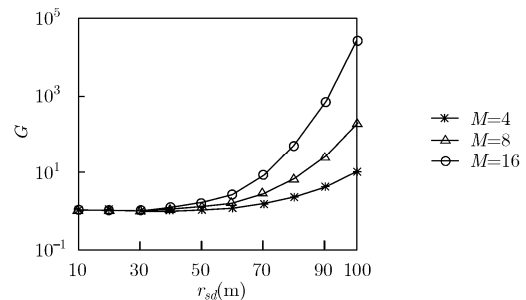


图5 调制阶数对能效增益的影响

5 结论

本文提出了一种增加协作传输的能量效率分析方法, 导出了增加协作传输与直接传输的能效表达式, 进而探讨了何时采用增加协作才能提高系统能效这一关键问题。结果表明: 当通信距离大于门限距离时, 增加协作传输的能效才优于直接传输的能效; 调制阶数越高, 门限距离值越小, 针对不同的通信距离 r_{sd} , 通过优化调制阶数可以提高能效; 最后, 中继节点的位置对能效增益有重要影响。下一步, 我们将研究多节点中继选择情况下增加协作传输的能效增益。

参考文献

- [1] Sendonaris A, Erkip E, and Aazhang B. User cooperation diversity—part I: System description [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2003, 51(11): 1927–1938.
- [2] Sendonaris A, Erkip E, and Aazhang B. User cooperation diversity—part II: Implementation aspects and performance analysis [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2003, 51(11): 1939–1948.
- [3] Laneman J N, Wornell G W, and Tse D N C. Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2004, 50(12): 3062–3080.
- [4] Afari M and Murat Uysal M. Cooperative diversity over Log-normal fading channels: performance analysis and optimization [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(5): 1963–1972.
- [5] Ikki S S and Ahmed M H. Performance of cooperative diversity using equal gain combining (EGC) over Nakagami- m fading channels [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(2): 557–562.
- [6] 颜振亚, 郑宝玉, 林志伟. 无线传感器网络中机会协作传输及其性能研究 [J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(1): 215–218.
Yan Zhen-ya, Zheng Bao-yu, and Lin Zhi-wei. Research on opportunistic cooperation transmission and its performance in wireless sensor network [J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2009, 31(1): 215–218.
- [7] Cui Su-guang, Goldsmith A, and Bahai A. Energy-efficiency of MIMO and cooperative MIMO techniques in sensor networks [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2004, 22(6): 1089–1098.
- [8] Jayaweera S K. Virtual MIMO-based cooperative communication for energy-constrained wireless sensor networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2006, 5(5): 984–989.
- [9] Gai Y, Zhang Lin, and Shan Xiu-ming. Energy efficiency of cooperative MIMO with data aggregation in wireless sensor networks [C]. Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2007). Hong Kong, 11–15, March 2007: 791–796.
- [10] Jamshidi A and Nasiri-Kenari M. Performance analysis of transmitter-side cooperation-receiver-side-relaying schemes for heterogeneous sensor networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(3): 1548–1563.
- [11] Liu K J R, Sadek A K, Su W, and Kwasinski A. Cooperative Communications and Networking [M]. Cambridge, U. K. Cambridge University Press, 2008: 133–137.
- [12] Hwang K S, Ko Y C, and Alouini M S. Performance analysis of incremental opportunistic relaying over identically and non-identically distributed cooperative paths [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(4): 1953–1961.
- [13] Goldsmith A. Wireless Communications [M]. Cambridge, U. K. Cambridge University Press, 2005: 170–171.

王绍青: 男, 1982年生, 博士生, 研究方向为无线传感器网络中的协作通信技术。

聂景楠: 男, 1962年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线传感器网络、移动通信中的信号处理。