

无线传感器网络中基于链的虚拟 MIMO 策略

李艳华, 彭蔓蔓, 曾凡仔

(湖南大学计算机与通信学院, 长沙 410082)

摘要: 无线传感器网络能量受限, 策略应尽可能地减少能量消耗, 以延长网络寿命。提出一种基于链的能量高效的虚拟 MIMO 传输策略, 对该传输策略进行能耗和时延建模, 确定最优的虚拟 MIMO 链的个数、协作节点个数以及传输速率等网络通信参数。仿真结果表明, 即使考虑到电路能耗和信道训练开销, 该传输策略也能有效节省能量, 提高网络生命期, 同时降低时延。

关键词: 虚拟 MIMO 技术; 网络生命期; 无线传感器网络; 能量高效; 时延

Chain-based Virtual MIMO Scheme for Wireless Sensor Networks

LI Yan-hua, PENG Man-man, ZENG Fan-zai

(Dept. of Computer & Communication, Hunan University, Changsha 410082)

【Abstract】 Since wireless sensor networks with limited energy, the transmission scheme must be energy efficient in order to prolong the lifetime of network. In this paper, an energy-efficient chain-based cooperative MIMO transmission scheme is proposed to maximize the network life-time. An optimization model is proposed to find the optimum number of cooperative nodes, transmission rates and number of chains. Simulation results prove that tremendous energy saving is possible with judicious choice of designed protocol parameters even considering the circuit energy cost and channel training overhead, and the scheme can reduce the latency.

【Key words】 virtual MIMO technology; network lifetime; wireless sensor networks; energy-efficiency; latency

1 概述

在无线传感器网络的很多应用中, 通信环境复杂, 存在多径衰落现象, 电池难以更换, 并且在一些应用中需要在最短的时间内收到数据, 因此, 能量效率和时延是无线传感器网络系统设计须考虑的重要因素。

近年来, MIMO 技术在无线通信领域受到了很大的关注。文献[1]提出在相同的发射功率和误码率的要求下, MIMO 技术的性能要优于 SISO 技术。利用无线传感器网络节点密度高的特点, 可通过多节点间的协作来实现 MIMO 技术^[2]。最近相关研究者提出了各种虚拟 MIMO 传输策略。文献[2]提出基于 STBC 的虚拟 MIMO 传输策略, 分析发现当传输距离大于一定值时, 虚拟 MIMO 传输策略在很大程度上降低了能量消耗。文献[3]提出基于簇的虚拟 MIMO 传输策略。

本文考虑信道训练对性能的影响, 提出一种基于链的虚拟 MIMO 传输策略。仿真实验显示, 该策略比传统的 PEGASIS 协议取得更高的网络生命期性能, 同时能有效降低数据收集时延。

2 系统模型

本文考虑 N 个节点随机均匀部署在 $M \times M$ 的区域内, 所有节点已定位好且不移动, 假设所有节点的通信距离都能满足与基站直接进行通信。基站分布在此区域内或外, 没有能量和体积限制, 因此, 可以安装一个或多个发送/接收天线, 为了简化分析, 假设基站只装有一个接收天线。

在分析具体的端到端传输能耗和时延时, 进行如下假设:

- (1) 节点能周期性地形成 k_c 条链。
- (2) 对于链内节点本地通信, 信道模型为平方律衰落的加

性高斯白噪声信道, 调制方式为 BPSK。

(3) 对于协作节点与基站的长距离通信, 信道模型为 k 阶瑞利平衰落信道, 调制方式采取 MQAM。

(4) 忽略协作节点的选取及基带信号处理所造成的能量消耗。

本文所提出的传输策略如图 1 所示。

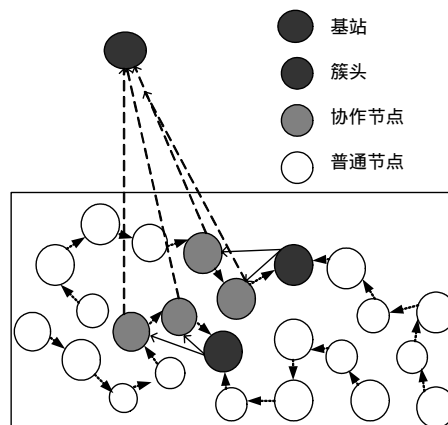


图 1 基于链的虚拟 MIMO 传输策略

假设与 PEGASIS 协议一样, 提出的传输策略的执行过程

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60673061); 湖南省自然科学基金资助项目(06JJ50111, 06JJ50113)

作者简介: 李艳华(1983-), 女, 硕士研究生, 主研方向: 无线传感器网络; 彭蔓蔓, 教授、博士; 曾凡仔, 副教授、博士

收稿日期: 2009-01-20 **E-mail:** yanhuaili19117@163.com

按轮进行，每一轮包括 2 个阶段：

(1) 链形成阶段

N 个节点形成多条链，每条链的长度为 CL ，链的数目 k_c 为 N/CL (如果 $N \bmod CL=0$) 或 $N/CL+1$ (如果 $N \bmod CL \neq 0$)。链的形成利用贪心算法，第 1 条链的形成过程如下：距离基站最远的节点寻找距离自己最近的节点 (此节点不是任何链的成员且是活的) 作为邻居节点，并把此节点加入到链中，此节点再按距离基站最远的节点的方式寻找自己的另一个邻居节点，并把另一个邻居节点加入到此链中，如此直到此链的长度等于 CL ；此时再按第 1 条链的方式开始新的链的组建，如此直到所有的节点都加入到链中。当有节点死亡时重新组链。

每条链的节点按照与基站距离的大小从 0 开始进行编号，此编号用 ID_0 表示，同时随机赋予另一个编号，用 ID 表示， ID 的取值范围为 $[0, CL-1]$ ，并且同一条链的每个节点的 ID 不同。假设轮数记为 $round$ ，协作节点的个数为 M_t ， ID 为 $round \% CL$ 的节点为首领，假设此首领的 ID_0 为 ID_1 ，如果 $CL-1-ID_1 < M_t$ ， ID_0 从 ID_1+1 开始到 ID_1+M_t 的所有节点为协作节点；如果 $CL-1-ID_1 > M_t$ ， ID_0 从 ID_1+1 到 $CL-1$ ， ID_0 从 ID_1-1 到 $CL-1-M_t$ 的所有节点都是协作节点。每一轮进行首领与协作节点的选取。

(2) 数据传输阶段

节点首先将采集到的数据按 PEGASIS 协议中的 ToKen 传输机制进行传输，在每一轮的开始，首领向其 2 个端节点传输 ToKen，每个端节点收到 ToKen 后向其邻居节点传输数据，每个节点将收到的数据与自己采集到的数据进行数据融合，再传输到其另一个邻居节点，如此直到首领收到数据。每个链的首领接收到 2 个邻居节点的数据后进行数据融合，再广播给此链的 M_t 个协作节点。 M_t 个协作节点将接收到的数据进行分布式 STBC 编码以及协作式传输 (本文假设所有协作节点均已完成同步)。

根据上述分析，此方案的能量消耗可分为 2 个主要部分：

- (1) 链内节点之间本地距离通信消耗的能量，记为 E_{local} ；
- (2) 协作节点与基站之间的长距离通信消耗的能量，记为 E_{ctos} 。每个部分能量又包括数据传输能量 E_t 和电路能量 E_c ，得到

$$E_{local} = E_{t_local} + E_{c_local} \quad (1)$$

$$E_{ctos} = E_{t_ctos} + E_{c_ctos} \quad (2)$$

其中， E_{t_local} 与 E_{c_local} 分别代表一条链的本地数据传输能量消耗与电路能量消耗； E_{t_ctos} 与 E_{c_ctos} 分别代表一条链的协作节点与基站通信的数据传输能量消耗与电路能量消耗。

时延主要包括 2 个部分：(1) 节点与邻居 (下一跳) 节点、首领与协作节点通信的总时延 T_{local} ；(2) 协作节点与基站之间的通信时延 T_{ctos} 。

2.1 一条链传输数据的能量消耗与时延

E_{t_local} 和 E_{c_local} 可进一步分别表示为

$$E_{t_local} = E_{t_ltoi} + E_{t_ltoc} \quad (3)$$

$$E_{c_local} = E_{c_ltoi} + E_{c_ltoc} \quad (4)$$

其中， E_{t_ltoi} 表示节点传输数据给其邻居节点的传输能量消耗； E_{t_ltoc} 表示首领广播数据给协作节点的传输能量消耗； E_{c_ltoi} 和 E_{c_ltoc} 分别表示其相应的电路能量消耗。

根据文献[4]的分析，对于 BPSK 调制方式而言，其误码率性能可表示为

$$p_b = Q(\sqrt{2r}) \quad (5)$$

其中， r 为接收端信噪比， r 可表示为

$$r = \frac{P_{r_ltoi}}{2B\sigma^2 N_f} \quad (6)$$

其中， P_{r_ltoi} 为接收端的信号功率； B 为信号带宽； σ^2 为信道的噪声功率谱密度； N_f 为接收机噪声系数。

误码率 $p_b = Q(\sqrt{2r}) e^{-r}$ ，根据 Chernoff 上界，在高信噪比区域，可以近似认为 $p_b = e^{-r}$ ，则发射功率满足：

$$P_{t_ltoi} = P_{r_ltoi} G_d = -2B\sigma^2 N_f \ln(p_b) G_1 d_{ltoi}^2 M_t \quad (7)$$

其中， G_d 是功率增益； M_t 为一常数用于补偿由于硬件偏差，加性噪声及干扰造成的衰减； G_1 是在 $d=1$ m 处的功率增益^[4]； d_{ltoi} 是节点与其邻居节点 (下一跳节点) 的距离。假设每个节点产生 L bit 数据，经数据融合后，每个节点传输同样大小的数据到其邻居节点，则传输时延 T_{on} 表示为

$$T_{on} = L / B \quad (8)$$

根据文献[3]的分析，发送能量消耗 E_{t_ltoi} 可以表示为

$$E_{t_ltoi} = -2(1+\alpha) \sum_{CL-1} \sigma^2 N_f \ln(p_b) G_1 d_{ltoi}^2 M_t L \quad (9)$$

其中， α 是反映射频功率放大器效率的参数。

电路能量消耗 E_{c_ltoi} 可表示为

$$E_{c_ltoi} = \sum_{CL-1} (P_{cr} + P_{ct}) \times T_{on} \quad (10)$$

其中， P_{ct} 及 P_{cr} 分别为发射机与接收机的电路功率消耗，其计算方法参见文献[3]。

首领广播数据的能量分析与节点传输数据到其邻居节点的能量分析类似， E_{t_ltoc} 表示为

$$E_{t_ltoc} = -2(1+\alpha) \sigma^2 \ln(p_b) G_1 d_{max}^2 M_t L \quad (11)$$

其中， d_{max} 表示首领与协作节点的最大距离； M_t 个协作节点接收首领的广播数据。电路能量消耗可表示为

$$E_{c_ltoc} = (P_{ct} + M_t P_{cr}) \frac{L}{B} \quad (12)$$

总时延 T_{local} 可表示为

$$T_{local} = \sum_{CL} T_{on} \quad (13)$$

2.2 虚拟 MIMO 的能量消耗与时延

当链内所有节点收到链内首领的融合数据后，每个协作节点按正交 STBC 空时处理方案对传输序列进行编码并传递给基站。根据文献[2]的分析，在高 SNR 区域， \bar{E}_b 可表示为

$$\bar{E}_b = M_t \times \frac{2}{3} \left(\frac{P_b}{4} \right)^{\frac{1}{M_t}} \frac{2^b - 1}{b^{\frac{1}{M_t} + 1}} N_0 \quad (14)$$

为在接收端获得 \bar{E}_b 的平均每比特能量，每个协作节点总传输功率可以表示为

$$P_{t_ctos} = \bar{E}_b R_b (4\pi)^2 d_{ctos}^k M_t N_f / (G_t G_r \lambda^2 \times M_t) \quad (15)$$

其中， R_b ($R_b = bB$, $b=2$) 为采用 MQAM 调制方式下的数据传输速率； k 表示协作节点与基站通信的大尺度衰落系数； N_0 为噪声单边功率谱密度； G_t 和 G_r 分别为发射天线及接收天线的增益； λ 为载波波长； d_{ctos} 表示协作节点与基站的距离。

在分析协作式 MIMO 技术的能耗时，须考虑由于信道训练及 STBC 编码速率所造成的开销^[3]，根据信道的慢衰落假设，假设信道在一个符号集 (F 个符号) 的传输间隔中保持不变，同时假设在该符号集中包含有 pM_t 个信道训练符，其中， p 用来训练每个发射-接收天线对，有效传输速率表示为

$$R_b^{eff} = (F - pM_t) R_b / F \quad (16)$$

R 为 STBC 编码速率，传输时延表示为

$$T_{ctos} = L / R_b^{eff} \quad (17)$$

虚拟 MIMO 的传输能量消耗表示为

$$E_{t_ctos} = M_t \times (1 + \alpha) p_{t_ctos} \times L / R_b^{eff} \quad (18)$$

基站接收的电路能量消耗可以忽略,则虚拟 MIMO 的电路能量消耗可以表示为

$$E_{c_ctos} = M_t \times p_{ct} L / R_b^{eff} \quad (19)$$

2.3 联合优化模型

根据等式(9)~式(13)、式(17)~式(19),此传输策略每轮系统的总能量与时延的乘积可表示为

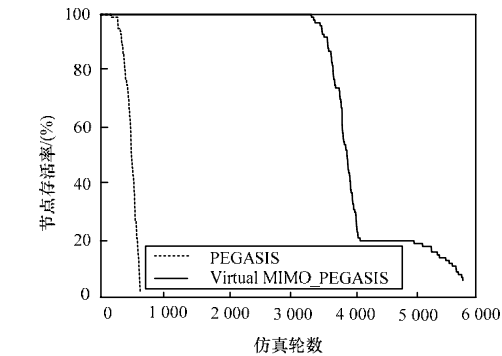
$$ET_{total}(b, k_c, M_t) = k_c \times (T_{local} + T_{ctos}) \times (E_{t_local} + E_{c_local} + E_{t_ctos} + E_{c_ctos}) \quad (20)$$

式(20)是关于变量 b , k_c 和 M_t 的函数。根据实验, M_t 通常不大于 12。根据文献[5], 调制级数 b 通常设为偶数值, 如 2, 4, 6 等。通过解决式(21)表示的最优化问题, 获取通信参数的最佳值, 式(21)所示优化模型的搜索空间不大, 采用穷举法对其求解。

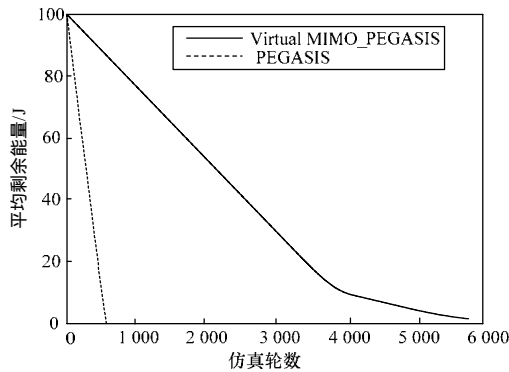
$$\begin{aligned} (b, k_c, M_t) &= \arg \min ET_{total}(b, k_c, M_t) \\ \text{s.t.} \quad & 2 \leq b \leq 10 \\ & 2 \leq k_c \leq N / M_t \\ & 2 \leq M_t \leq 12 \end{aligned} \quad (21)$$

3 比较分析与仿真结果

采用 Omnet++ 模拟验证基于链的虚拟 MIMO 传输策略, 并与 PEGASIS 协议进行比较。假设 100 个节点随机分布在 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ 的方形区域内, 每个节点的初始能量相等。实验参数设置为: $\alpha=0.47$; $\sigma_2=-134 \text{ dBm/Hz}$; $M_t=40 \text{ dB}$; $B=20 \text{ kHz}$; $P=2$; $P_{cr}=112.6 \text{ mW}$; $P_{ct}=98.2 \text{ mW}$; $L=2 \text{ kb}$; $R=0.75$; $N_f=10 \text{ dB}$; $G_t=30 \text{ dB}$; $f_c=2.5 \text{ GHz}$; $P_b=10^{-3}$; $N_0/2=-134 \text{ dBm/Hz}$; $F=200$; $G_r G_t=5 \text{ dbi}$ 。根据基站的位置设置了 2 个不同的仿真场景, 在所有的通信参数和网络条件相同的情况下, 分别运行这 2 个协议, 仿真结果如图 2~图 4 所示。

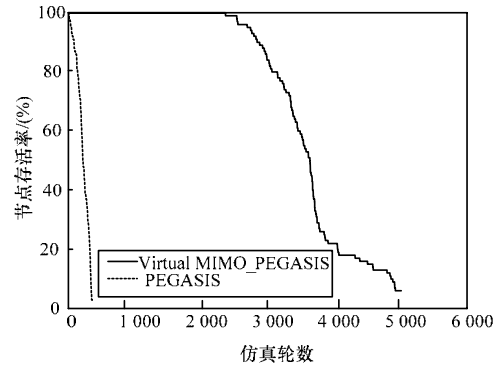


(a)节点存活率

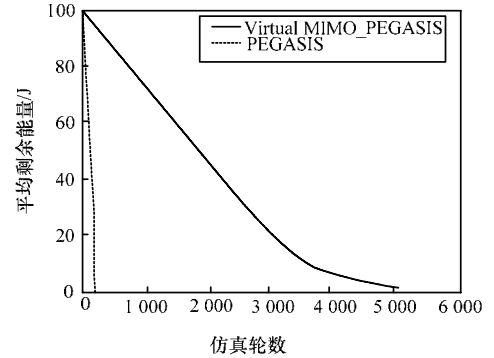


(b)平均剩余能量

图 2 基站位置为(25, 40)时 2 种协议的性能比较



(a)节点存活率



(b)平均剩余能量

图 3 基站位置为(25, 65)时 2 种协议的性能比较

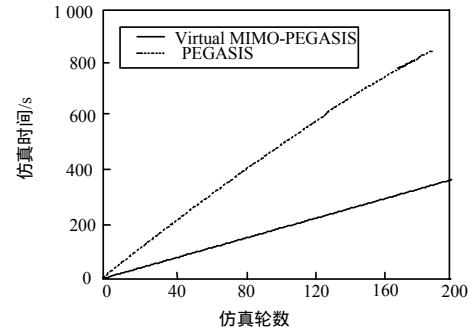


图 4 2 种协议的仿真时间比较

如果将网路生命期定义为从初始布置网络后到还有 60% 节点存活的周期数, 从图 2(a)可以看出, 当基站位于区域内时, 基于链的虚拟 MIMO 传输策略网络生命期大约是传统 PEGASIS 协议的 8 倍。从图 3(a)可以看出, 当基站位于区域外时, 基于链的虚拟 MIMO 传输策略网络生命期大约是传统 PEGASIS 协议的 17 倍。因此, 所提出的传输策略能提高网路生命期的性能, 并且当基站与网络区域的距离增加时, 所提出的策略的网路生命延长得特别明显。由图 4 可知, 基于链的虚拟 MIMO 传输策略的时延低于传统 PEGASIS 协议。

4 结束语

本文提出一种基于链的虚拟 MIMO 传输策略, 基于降低网络能量的消耗和缩短时延的目标, 分析该策略的端到端的能量消耗和时延, 建立能耗 \times 时延的优化模型, 通过该模型确定了传输策略参数最优值。实验结果表明, 在多径衰落的通信环境下, 本文所提出的策略与 PEGASIS 协议相比, 性能明显提高, 能显著提高网络生命期, 缩短时延。

(下转第 144 页)