

基于协作 MIMO 的多跳 WSN 动态分簇选择算法研究

梁平元^{1,2} 刘星成¹ 石春¹ 罗锡璋¹

摘要 为解决基于协作多输入多输出 (Multi-input multi-output, MIMO) 的同构无线传感器网络 (Wireless sensor networks, WSN) 能量节省与能耗均衡问题, 建立了多跳分布式 WSN 系统模型. 对协作 MIMO 通信中的簇间长传输距离与簇内短传输距离进行了分析, 找到与传统单输入单输出 (Single-input single-output, SISO) 传输相比更节省能量的距离门限. 根据分析提出了一种新的基于剩余能量与距离门限的动态分簇 (Dynamic clustering based on remaining energy and distance thresholds, DCREDT) 选择算法, 在节省能量的前提下, 使剩余能量较大的节点优先成为簇首, 实现了簇首与其他节点之间的能耗均衡. 最后分析了采用 DCREDT 选择算法进行多跳传输的总能耗, 并仿真验证了该算法的合理性与有效性.

关键词 无线传感器网络, 协作多输入多输出, DCREDT 选择算法, 能耗均衡

DOI 10.3724/SP.J.1004.2010.01401

Research on Dynamic Clustering Selection Algorithm of Multi-hop WSN Based on Cooperative MIMO

LIANG Ping-Yuan^{1,2} LIU Xing-Cheng¹ SHI Chun¹ LUO Xi-Zhang¹

Abstract In order to solve the problem of energy saving and energy consumption balance in homogeneous wireless sensor networks (WSN) based on cooperative multi-input multi-output (MIMO), a multi-hop distributed WSN system model was built. The inter-cluster long transmission distance and intra-cluster short transmission distance in cooperative MIMO communication were analyzed, and the distance thresholds were found, with which more energy could be saved in communications than that in traditional single-input single-output (SISO) communications without the distance threshold condition. After that, a novel dynamic clustering based on remaining energy and distance thresholds (DCREDT) selection algorithm was proposed based on our analysis. Under the premise of saving energy, the nodes having more remaining energy would become cluster heads preferentially, so that energy consumption balances between cluster heads and other nodes were realized. Finally, by use of DCREDT selection algorithm, the total energy consumptions in multi-hop transmissions were analyzed. The reasonableness and validity of this algorithm were verified by simulations.

Key words Wireless sensor networks (WSN), cooperative multi-input multi-output (MIMO), dynamic clustering based on remaining energy and distance thresholds (DCREDT) selection algorithm, energy consumption balance

在无线传感器网络 (Wireless sensor networks, WSN) 中, 成千上万的无线传感器节点常常被随机地布署在人类难以接近的场所, 并通过自组织的方式快速构成一个有效、可靠的无线通信网络, 以完成数据采集、监测、跟踪和控制等任务. 要更换节点电池通常是不切实际的, 因此, 能量节省在 WSN 设计中非常重要, 它直接关系到网络的实际使用寿命^[1]. 多输入多输出 (Multi-input multi-output, MIMO) 技术可以有效地利用多径效应抑制衰落, 提高通信系统的容量和频谱利用率. 在系统容量一定时, 可以利用 MIMO 技术降低无线传感器节点的发射功

率. 然而, 由于无线传感器节点尺寸很小, 要单独在低功耗的节点上形成物理天线阵列是不现实的, 幸运的是, 单天线传感器节点同样可用协作方式构成一个虚拟天线阵列. 在考虑电路能耗的情况下, 采用协作 MIMO 技术在单跳传输距离大于一定值时, 相对于传统的单输入单输出技术 (Single-input single-output, SISO) 能更节省能量^[2-3]. 可见, 协作 MIMO 技术适合于中远距离传输的大面积监控. 在此情形下, 其簇首 (Cluster head, CH) 的电池更换同样是很困难的, 显然, 同构 WSN 比异构更容易布署. 然而, 在基于协作 MIMO 的同构 WSN 中, CH 要比其他节点消耗更多的能量. 随着网络中有的 CH 因能量耗尽而失效, 能耗的不均衡使网络的传感覆盖率减少, 并严重影响 WSN 的使用寿命, 因此, 基于协作 MIMO 的同构 WSN 在考虑能量节省的同时, 还要考虑 CH 与其他节点之间的能耗均衡问题^[4-7].

在基于协作 MIMO 的 WSN 分簇策略中, Li 等^[5] 提出把协作 MIMO 融合到 LEACH (Low en-

收稿日期 2010-01-27 录用日期 2010-05-13
Manuscript received January 27, 2010; accepted May 13, 2010
国家自然科学基金 (60673086, 60970041) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (60673086, 60970041)
1. 中山大学信息科学与技术学院 广州 510006 2. 吉首大学物理科学与信息工程学院 吉首 416000
1. School of Information Science and Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006 2. College of Physics Science and Information Engineering, Jishou University, Jishou 416000

ergy adaptive clustering hierarchy)^[6] 的传输方案. 即在簇划分后, 每个 CH 选择合适的协作节点 (Cooperative node, CN) 进行协作传输, 但方案中每个节点传输到基站 (Base station, BS) 的数据量变化幅度很大, 这样导致能耗不均衡. Gao 等^[7] 对此进行了改进, 提出了一种负载均衡的基于协作 MIMO 的传输方案, 并考虑了数据的融合. 另外还有 Tuan 等^[8] 提出了基于 LEACH 的删减分簇算法, Liang 等^[9] 提出了最大生成树搜索 (Maximum spanning tree searching, MASTS) 算法等. 然而, 这些算法在考虑 CH 能耗均衡的同时却没有考虑协作 MIMO 传输中距离受限的特点, 即当簇间长传输 (Inter-cluster long transmission, ILT) 距离小于一定值或簇内短传输 (Intra-cluster short transmission, IST) 距离大于一定值时, 将不能节省能量 (本文第 2 节将对此分析).

基于以上问题, 本文建立了基于协作 MIMO 的多跳分布式 WSN 模型. 在考虑信道估计的情况下, 对协作 MIMO 传输中 ILT 与 IST 距离的取值范围进行了定量分析, 确定了相对于传统 SISO 节省能量的下边界距离. 根据分析结果, 提出了一种新的基于剩余能量与距离门限的动态分簇 (Dynamic clustering based on remaining energy and distance thresholds, DCREDT) 选择算法. 算法中根据门限条件动态地选择 CH 和 CN, 在能量节省的前提下使剩余能量较大的节点优先成为 CH, 从而在动态选择中实现 CH 与其他节点之间的能耗均衡, 并进一步对采用 DCREDT 选择算法的多跳 WSN 的总能耗进行了分析. 实验仿真找出了 ILT、IST 传输距离与单跳传输中总能耗间的关系, 从而验证了 DCREDT 选择算法中采用 ILT 与 IST 距离门限的合理性. 在此基础上, 进一步考察了采用 DCREDT 选择算法进行多跳传输的总能耗与平均等距离多跳传输的最优化总能耗, 同时将有门限条件的多跳协作 MIMO 传输与无门限条件的多跳协作 MIMO 传输的总能耗进行比较, 从而验证了算法的有效性.

1 基于协作 MIMO 的多跳 WSN 模型

基于协作 MIMO 的多跳分布式 WSN 模型如图 1 所示. CH 为簇首, 处于簇的中心, 每个簇只有一个 CH. CN 为 CH 周围的协作节点, CN 与 CH 一起完成数据的协作 MIMO 传输. GN (General nodes) 为未参与协作传输的普通节点. MN (Monitor nodes) 为检测到事件发生的监测节点, MN 可以根据自身状态确定为 CH 或 CN. BCSI 表示信道状态信息 (Channel state information, CSI) 达不到要求的坏节点. BS 代表基站.

考虑一个数据采集周期, 即当突发事件出现时,

MN 进行数据采集, 并经多跳把数据传递到 BS, 由 BS 完成数据融合与处理的过程. CH 每传递一次数据, 定义为一个数据传递周期. 假设:

- 1) 所有节点都是同构的, 具备数据融合功能, 每个节点都有唯一的标识 (ID);
- 2) 在已知 CSI 和误码率要求的情况下, 可以把传输距离看成一个近似值^[2];
- 3) BS 的能量不受限制, 具有多根物理天线, 能处理复杂的接入与路由算法, BS 可以根据 CH 的 ID 及导频进行路由选择, 选择延时最小的路由, 从而确定由哪些 CH 组织协作 MIMO 通信^[10].

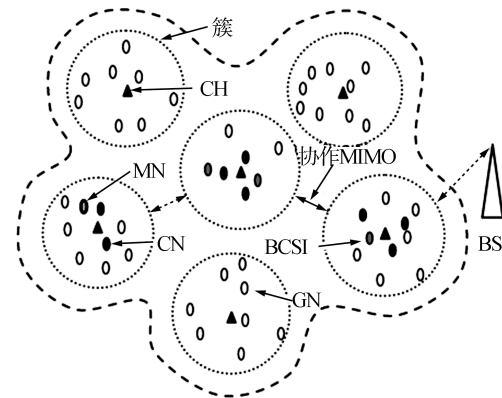


图 1 基于协作 MIMO 的多跳 WSN 模型
Fig. 1 Model of multi-hop WSN based on cooperative MIMO

节点之间的传输分为两种, 一种为 CH 之间的簇间长传输 ILT, 另一种是 CN 与 CH 之间的簇内短传输 IST. 当突发事件出现时, MN 采集的数据以 IST 方式在其周围寻找合适的 CH. 当然, 如果 MN 的剩余能量达到要求, 则 MN 也可以成为 CH. 成为 CH 的节点会在远处寻找新的 CH, 根据本文第 3 节提出的 DCREDT 选择算法, 所在 BS 周围的 CH 最终会找到 BS, 并由 BS 做出应答和路由选择. 成为 CH 的节点再在其周围选取符合条件的节点作为 CN, 若有准 CN 的 CSI 达不到条件, 则成为坏信道状态信息 (Bad channel state information, BCSI) 的节点而被放弃^[11]. 连接建立后, 未参与协作传输的节点会重新恢复到休眠状态以节省能量.

2 传输距离对能量节省的影响

当 IST 距离很小 (一般取值 1 ~ 2 m), ILT 距离大于一定值时, 基于 MIMO 或协作 MIMO 传输的 WSN 相对于传统的 SISO 传输能节省能量^[2]. 然而, 以往研究只在仿真中体现了这一结论, 并没有从理论上给出定量分析. 在基于协作 MIMO 的多跳 WSN 模型中, 由于要保证每一跳均要比 SISO 传输节省能量, 为简单起见, 下面从单跳情况定量分析

WSN 中协作 MIMO 传输节省能量的条件.

2.1 协作 MIMO 与 SISO 传输的能耗

首先考虑第 j 跳协作 MIMO 传输过程, N_T 为发送端的总天线数, N_R 为接收端的总天线数, 第 j 跳的 ILT 距离为 d_j , 总的功率消耗为 $P = (1 + a)P_{\text{out}} + P_c$, 其中 P_{out} 为传输功率, P_c 为功率放大器之外的其他电路消耗功率, $a = \xi/\eta - 1$, η 是漏极效率, ξ 是峰均比 (Peak to average ratio, PAR)^[2]. 对于 MQAM 调制, $\xi = 3(\sqrt{M} - 1)/(\sqrt{M} + 1)$, 每符号的比特数定义为 $b = \log_2 M$. 信道为 k 阶路径损耗, 且为加性高斯白噪声 (Additive white Gaussian noise, AWGN). 当进行信道估计时, 令有 pN_T 个导频被插入在数据块 F , p 为每根发射天线发射数据所附加的导频. 数据块的大小 $F = \text{floor}(T_c R_s)$, 这里 $\text{floor}(\cdot)$ 为下取整函数, R_s 是符号率, 相关衰落时间 $T_c = 3/(4f_m\sqrt{\pi})$, 最大的多普勒频移 $f_m = v/\lambda$, v 是相对移动速度. 令传输为 k 阶路径损耗, 根据 Cui 等使用的传输功率 P_{out} 式^[2], 且考虑到信道估计产生的影响, 可将传输功率 P_{out} 写成:

$$P_{\text{out}} = \bar{E}_b^{\text{MIMO}} R_b \times \frac{F - pN_T}{F} \times \frac{(4\pi)^2 d_j^k}{G_t G_r \lambda^2} M_l N_f \quad (1)$$

这里, \bar{E}_b^{MIMO} 是在给定误比特率 (Bit error rate, BER) 情况下每比特传送的平均能量, R_b 是传输的比特率, d_j 是第 j 跳的传输距离, G_t 和 G_r 分别是发送与接收的天线增益, λ 为载波波长, M_l 是用于补偿硬件电路处理和加性背景噪声或干扰的链路裕量. N_f 是接收噪声系数, 定义为: $N_f = N_r/N_0$, 这里 N_r 为接收器输入端总的有效噪声功率谱密度 (Power spectral density, PSD), N_0 为室温下单边带热噪声 PSD. 传送每比特平均能耗^[2] 为

$$\bar{E}_b^{\text{MIMO}} = \frac{\gamma_b N_T N_0}{\|H\|^2} = \frac{2\gamma_b N_T N_0}{\chi_{2N_T N_R}^2} \quad (2)$$

其中, H 为信道矩阵, $\chi_{2N_T N_R}^2$ 是自由度为 $2N_T N_R$ 的卡方随机变量, γ_b 为接收信噪比. 对于二进制相移键控 (Binary phase shift keying, BPSK), 有 $\gamma_b = [Q^{-1}(P_b)]^2/2$, 其中, $Q^{-1}(P_b)$ 表示误码率对于 $Q(x)$ 的反函数^[12]. 总的电路功率^[2] 为 $P_c^{\text{MIMO}} \approx N_T(P_{\text{DAC}} + P_{\text{mix}} + P_{\text{filt}} + P_{\text{syn}}) + P_{\text{syn}} + N_R(P_{\text{LNA}} + P_{\text{mix}} + P_{\text{IFA}} + P_{\text{filr}} + P_{\text{ADC}})$, 这里 P_{mix} 是混合器功率, P_{syn} 是同步频率发生器功率, P_{filt} 和 P_{filr} 分别为发送和接收滤波器功率, P_{IFA} 为中频放大器功率, P_{DAC} 和 P_{ADC} 分别为 D/A 和 A/D 转换器的功率, P_{LNA} 为低噪声功率放大器功率. 令 $\rho = (F - pN_T)/F$, 忽略协作 MIMO 在发送与接收端内部传输的能耗, 每比特电路与 ILT 能耗之和为

$$E_{bt}^{\text{MIMO}}, \text{ 有} \\ E_{bt}^{\text{MIMO}} = \frac{(1+a)\bar{E}_b^{\text{MIMO}} \rho R_b \times \frac{(4\pi)^2 d_j^k}{G_t G_r \lambda^2} M_l N_f + P_c^{\text{MIMO}}}{\rho R_b} \quad (3)$$

对于 SISO 系统, 可以不考虑信道估计的影响, 则每比特能耗为^[2]:

$$E_{bt}^{\text{SISO}} = \frac{(1+a)\bar{E}_b^{\text{SISO}} R_b \times \frac{(4\pi)^2 d_j^k}{G_t G_r \lambda^2} M_l N_f + P_c^{\text{SISO}}}{R_b} \quad (4)$$

其中, P_c^{SISO} 为 SISO 系统除功率放大器之外的电路所消耗的功率, 且 $P_c^{\text{SISO}} \approx 2(P_{\text{mix}} + P_{\text{syn}}) + P_{\text{filt}} + P_{\text{LNA}} + P_{\text{IFA}} + P_{\text{DAC}} + P_{\text{ADC}} + P_{\text{filr}}$. 令 \bar{P}_b 为平均误码率, 采用 BPSK 传输时, 则传送每比特平均能耗^[2] 为 $\bar{E}_b^{\text{SISO}} = N_0/[1/(1 - 2\bar{P}_b)^2 - 1]$.

2.2 IST 与 ILT 距离对能量节省的影响

令发送端与接收端 IST 为等距离 d_m 的 SISO 传输, 每比特 IST 的能耗为 $E_{d_m}^{\text{SISO}}$, L 为一次传递周期中协作 MIMO 或 SISO 所传输的总比特数, L_i^{st} 为接收端 CH 接收到第 i 个 CN 的空时编码比特数, 与星座尺寸有关. 考虑发送和接收端 IST 的能耗, 则只有当满足下面条件时第 j 跳才能节省能量:

$$L(E_{bt}^{\text{SISO}} - E_{bt}^{\text{MIMO}}) \geq \left(L + \sum_{i=1}^{N_R-1} L_i^{st} \right) E_{d_m}^{\text{SISO}} \quad (5)$$

这里, $L \cdot E_{d_m}^{\text{SISO}}$ 为协作 MIMO 发送端 IST 的能耗, $\sum_{i=1}^{N_R-1} L_i^{st} E_{d_m}^{\text{SISO}}$ 为协作 MIMO 接收端 IST 的能耗. 令 $C = (1+a)\bar{E}_b^{\text{SISO}} R_b (4\pi)^2 M_l N_f / (G_t G_r \lambda^2)$, 由于所有情况均使用相同参数设置, C 可以被看成常数. 令 IST 为 k_s 阶路径损耗, 且其平均距离为 d_m , 将式 (3) 和式 (4) 代入式 (5), 则有:

$$\frac{\left(1 - \frac{\bar{E}_b^{\text{MIMO}}}{\bar{E}_b^{\text{SISO}}} \right) C d_j^{k_s} + P_c^{\text{SISO}} + \frac{P_c^{\text{MIMO}}}{\rho}}{C d_m^{k_s} + P_c^{\text{SISO}}} \geq 1 + \frac{\sum_{i=1}^{N_R-1} L_i^{st}}{L} \quad (6)$$

等号成立时即为能量节省 d_j 的下边界 $d_{j\min}$, 令 $\mu = \sum_{i=1}^{N_R-1} L_i^{st}/L$, $\psi = \bar{E}_b^{\text{MIMO}}/\bar{E}_b^{\text{SISO}}$, 则 $d_{j\min}$ 的 k 次方

$$d_{j\min}^k = \frac{C\rho(1+\mu)d_m^{k_s} + \mu\rho P_c^{\text{SISO}} + P_c^{\text{MIMO}}}{C\rho(1-\psi)} \quad (7)$$

从式 (6) 和式 (7) 可以看出, 第 j 跳的能量节省主要依赖于因素 d_j 与 d_m . 当 d_m 增大, 将增大 d_j

的下边界 $d_{j\min}$. 通常假设 $d_m \ll d_j$ 来忽略因虚拟天线阵列和 MIMO 天线之间距离差异而产生的影响^[2-3], 而在实际的传输中, 特别是当 WSN 中节点布署不够密集时, d_m 的大小往往不能忽略.

3 DCREDT 选择算法

WSN 中, 路由协议包括簇的建立阶段与数据稳定传输阶段, 前者所占延时要远小于后者, 且不同的分簇策略决定了不同的传感覆盖率, 所以这里主要考虑传递簇的建立阶段. DCREDT 选择算法包括两部分: 即 CH 选择算法与 CN 选择算法. 在 CH 选择算法中, 在能量节省的前提下, 动态地使剩余能量较大的节点优先成为 CH, 从而实现能耗均衡. 而在 CN 选择算法中, 选择距离最近且 CSI 较好的节点作为 CN, 进一步节省能量. 先作如下假设:

1) 所有的传感器节点具有相同的初始能量 E_0 , 第 i 次数据传递周期开始时节点剩余能量为 E_i , CH 剩余能量门限为 E_{th} , 低于 E_{th} 的节点不能成为 CH;
2) d_i 为 CH 在第 i 次数据传递周期的最大 ILT 距离, d_i 随着 E_i 减小而减小, d_{lth} 为 ILT 距离门限, d_{sth} 为 IST 距离门限.

从上一节可以看出, 对于 d_{lth} , 有 $d_{j\min} < d_{lth} < d_i$. 当 d_{lth} 减小时, 能量节省减小, 而如 d_{lth} 增大, 则可被选择为 CH 的节点数减少. 对于 d_{sth} , 有 $0 < d_{sth} < d_m$, d_m 为 IST 最大传输距离. d_{sth} 增大则能量节省减小, 如 d_{sth} 减小, 则可能选不到足够多 CSI 较好的 CN^[7], d_{lth} 与 d_{sth} 的设置与传感器节点实际的布署密度有关.

3.1 CH 的选取

CH 的选取与能量门限值及 ILT 距离门限值有关. CH 因数据处理和参与长传输等原因比其他节点要消耗更多的能量, 因此, 节点必须有最小剩余能量 E_{th} 才能被选取为 CH. 而在采用协作 MIMO 传输时, 只有在 ILT 距离门限 d_{lth} 以上时, 才能与传统的 SISO 相比节省更多的能量. 基于剩余能量与传输距离门限条件, CH 选择算法如下:

步骤 1. MN 检测到有事件发生, 则检测自身剩余能量. Case 0: 如 $E_i > E_{th}$, 则标识自身为 CH; Case 1: 否则发出请求 NCHR (Near CH request) 到 MN 附近节点.

步骤 2. MN 附近节点收到 NCHR 请求后检查自身能量. Case 0: 如 $E_i < E_{th}$ 或 $d > d_{sth}$, 则休眠; Case 1: 如 $E_i > E_{th}$ 且 $d < d_{sth}$, 则随机等待一段时间 T_R .

步骤 3. 步骤 2 与步骤 5 中的 Case 1 之后分为三种情况. Case 10: 如在 $0 < t \leq T_R$ 时间内收到 0 个 NCHAM (Near CH advertisement message), 则

立即发出 NCHAM 信号; Case 11: 如在 $0 < t \leq T_R$ 内某个时隙收到 1 个 NCHAM 信号, 则立即返回归属信息 BM (Belonging message); Case 12: 如果同时收到 2 个以上的 NCHAM, 则不发送 BM, 且自身放弃成为 CH.

步骤 4. 如节点发出 NCHAM 信号后, 在第二个 T_R 随机时间周期内收到自身的 BM 返回信息, 则标识为 CH. 而发出 NCHAM 信号的节点如在 T_R ($j = 0, 1, 2, \dots, 7$) 时间内没有收到 BM 信号, 则等待. 当 $j = 7$ 时, 还没有收到自身 BM 反馈信号, 则确定自身为孤立 CH.

步骤 5. 成为 CH 的节点发送 FCHR (Far CH request) 信号. Case 0: 周围节点如不满足 $d_{lth} < d < d_i$ 或 $E_i > E_{th}$, 则放弃成为 CH; Case 1: 如果满足 $d_{lth} < d < d_i$ 且 $E_i > E_{th}$, 则随机等待一段时间 T_R .

步骤 6. 返回步骤 3, 以此循环到所有的 CH 建立.

NCHR 为 MN 发出的近距离 CH 请求信息, 表示需要寻找附近的节点作为 CH. T_R 为退避时间, 对 IEEE 802.11 中的退避机制^[13] 加以修改, 有 $T_R = 2^j \cdot Rand \cdot [(E_0 - E_i)/E_i]$ ($j = 0, 1, 2, \dots, 7$), 其中, $Rand$ 为 $(0, 1]$ 均匀分布随机变量. 当 E_i 比较大时, T_R 的统计平均较小, 表明剩余能量较大的节点将优先成为 CH. NCHAM 为近距离 CH 广告信息, 表示宣告满足成为 CH 的条件. BM 为归属信息, 表示发现已有别的节点宣告成为 CH 后, 节点自动放弃成为 CH 的请求, 并处于等待状态而不再发送 NCHAM. 孤立 CH 表示其周围没有其他节点与它竞争成为 CH. FCHR 为远距离 CH 请求信息, 表示 CH 在远距离寻找其他可以成为 CH 的节点, 从而建立新的簇. BS 如收到 FCHR 或 NCHR 信号, 则立即发出 BSAM (BS advertisement message) 信号, 其周围节点收到 BSAM 信号后自动放弃成为 CH. 由于所有节点采用的是全向天线, 故一个簇的周围将建立多个 CH, 且每个 CH 处于簇的中心位置, 而所有收到 NCHAM 的节点不再成为 CH, 这样避免了 CH 的重复覆盖. BS 最终将收到邻近簇中 CH 传来的信号, 并检测到路由信息, 从而选择传输延时最小的簇间路由来完成 MN 和 BS 之间的数据传输.

3.2 CN 的选取

在满足 IST 距离门限的前提下, 应找到足够多 CSI 较好的节点作为 CN 参与协作传输^[3]. CN 选择算法如下:

步骤 1. CH 发送 CNRM (CN request message), GN 收到 CNRM 之后, Case 0: 如 $d < d_{sth}$, 则标识为准 CN, 并返回应答信号 (Acknowledge,

ACK) 与导频给 CH; Case 1: 否则放弃成为准 CN.

步骤 2. CH 根据收到的 ACK 与导频, 进行信道估计, 选择 CSI 较好的准 CN 作为正式的 CN. 再次发送确认信息 CNACK (CN acknowledge) 信号给被选中的准 CN, 使之成为 CN. 未收到 CNACK 信号的准 CN 将进入休眠状态.

当每个 CH 被选定之后, 各 CH 将根据 CN 选择算法在簇内选取合适的 CN, 然后按 TDMA (Time division multiple access) 的方式以 $N_T \times N_R$ 空时编码进行数据传输, 数据传输将根据 CN 的个数来确定空时编码算法^[14]. 由于传感器节点随机分布, 在选取 CH 后并不能保证其周围有足够的 CN, 而在 CH 交换算法 (Clustering-CH-exchange-method, CCEM) 中^[15], 如果 CH 找不到足够的 CN, 则可以和附近的节点交换角色.

4 基于 DCREDIT 选择算法的多跳传输

假设在一次数据采集周期中, MN 有 L 比特数据经 M 跳传递到 BS. 由于 MN 到附近 CH 为 SISO 传输, 所以不用考虑其能量节省. 在 DCREDIT 选择算法中, 如果 CH 发送 FCHR 信号后收到 BSAM 的应答, 则立即确定 BS 为 CH, 并建立协作 MIMO 通信. 由于 BS 具有多根天线, 最后一跳中可不考虑接收端内部传输的能耗. 对于多跳协作 MIMO 传输, 每比特总能耗为

$$E_{mbt}^{MIMO} = \sum_{j=1}^M E_{bt}^{MIMO} + \frac{\sum_{j=1}^{M-1} \sum_{i=1}^{N_R-1} L_i^{st} E_{in}^{cr}}{L} + \sum_{j=1}^M E_j^{ct} - \frac{\sum_{i=1}^{N_R-1} L_i^{st} P_c^{mr}}{\rho R_b L} \quad (8)$$

其中, E_j^{ct} 表示第 j 跳 CH 内部发送数据的能耗, E_{in}^{cr} 表示接收端 CN 的 IST 能耗, 接收端 CN 节点的内部电路功率 $P_c^{mr} \approx P_{LNA} + P_{mix} + P_{IFA} + P_{filr} + P_{ADC}$.

而对于多跳 SISO 传输, 每比特多跳 SISO 传输的总能耗为 $E_{mbt}^{SISO} = \sum_{j=1}^M E_{bt}^{SISO}$ (忽略接收端 BS 节省的电路消耗). 如考虑平均等距离传输, 假设多跳传输中每一跳的 ILT 距离同为 d_j , 总的路由路径距离为 D_t , 则跳数 $M = D_t/d_j$. 代入式 (4), 则有

$$E_{mbt}^{SISO} = \frac{CD_t^k M^{1-k} + MP_c^{SISO}}{R_b} \quad (9)$$

显然, E_{mbt}^{SISO} 是一个关于跳数 M 的函数, 因此, 存在优化 $M = \arg \min_M E_{mbt}^{SISO}$, 令 $\frac{\partial E_{mbt}^{SISO}}{\partial M} = 0$, 从而可获得多跳 SISO 传输的每比特最小总能耗.

对于多跳协作 MIMO 等距离传输, 采用与 SISO 相同的假设, 且令 IST 为 k_s 阶路径损耗的 SISO 传输, 距离为 d_m , 再令 $\sum_{i=1}^{N_R-1} L_i^{st} P_c^{mr} / (\rho R_b L) = \Omega$, 该 Ω 与跳数 M 无关. 代入式 (3) 和式 (4), 得

$$E_{mbt}^{MIMO} = \frac{M[\rho C(1+\mu)d_m^{k_s} + P_c^{MIMO} + \rho(1+\mu)P_c^{SISO}]}{\rho R_b} \times \frac{\psi C D_t^k}{R_b M^{k-1}} - \frac{\mu(C d_m^{k_s}) + P_c^{SISO}}{R_b} - \Omega \quad (10)$$

从式 (10) 可以看出, E_{mbt}^{MIMO} 是一个关于跳数 M 和 d_m 的函数, 因此, 当给定 d_m 的值时, 则存在优化 $M = \arg \min_M E_{mbt}^{MIMO}$. 令 $\frac{\partial E_{mbt}^{MIMO}}{\partial M} = 0$, 从而可获得多跳协作 MIMO 传输每比特最小总能耗.

5 实验仿真与分析

实验中, 我们采用 Matlab 7.0 对 DCREDIT 动态分簇选择算法的合理性与有效性进行了仿真验证与分析.

5.1 仿真环境与参数设置

在 DCREDIT 算法中, 由于 WSN 为无限延伸的网络结构, 传感器节点所布署的面积大小没有限制. 为简单起见, 在基于协作 MIMO 传输时, 统一使用 2×2 Alamouti 空时编码, 即传感器节点的布署密度只要保证发送端与接收端有一个参与协作传输的 CN 即可. 这样, WSN 在进行协作 MIMO 传输时相当于为点到点通信, 在传输中每比特总能耗只与簇内参与协作传输的 CH 和 CN 的个数有关. 传感器节点均匀布署, 节点密度足够大 (假设每个簇内至少有一个满足条件的 CN), 由于 ILT 最小距离有门限的限制, 而 IST 平均距离越小越好, 因此在节点布署时, 其相互间最小距离的大小不受限制 (可以接近为 0). 信道为平坦的瑞利衰落, 频带利用率为 1 bps/Hz, 因此 $R_b = 10$ Kbps, 采用 BPSK 调制. 系统的其他参数 (除 $G_t G_r$ 略大) 与文献 [2] 和文献 [12] 中参数设置相同, 如表 1 所示 (所有实验使用相同参数, 除非另有说明).

5.2 DCREDIT 选择算法的合理性

考虑传输能耗与内部电路能耗, 令 IST 有 k_s 阶路径损耗, IST 的平均距离为 2 m, ILT 为 k 阶路径损耗. 利用式 (3) 和式 (4), 当 $p = 0, 10, 20$ 时, 协作 MIMO 与传统 SISO 每比特能耗的对数曲线如图 2 所示. 可以看出, 当长传输距离大于 53 m 时, 协作 MIMO 相对于传统的 SISO 会节省能量. 随着 ILT 距离的增大, 协作 MIMO 每比特能耗增加非常

缓慢, 而 SISO 每比特能耗随 ILT 距离增加而迅速增加. 信道估计中增加的导频头对协作 MIMO 的能耗影响很小, 当 p 增大时, 能耗略有增加. 但增加信道估计可以有效地选择 CSI 较好的 CN 参与协作, 从而可节省更多的能量^[3].

表 1 系统参数设置

Table 1 System parameters setting

$f_c = 2.5 \text{ GHz}$	$\eta = 0.35$
$G_t G_r = 7 \text{ dBi}$	$N_0 = -171 \text{ dBm/Hz}$
$N_f = 10 \text{ dB}$	$M_l = 40 \text{ dB}$
$k_s = 2$	$k = 3$
$B = 10 \text{ kHz}$	$P_b = 10^{-3}$
$P_{LNA} = 20 \text{ mW}$	$P_{syn} = 50 \text{ mW}$
$P_{IFA} = 3 \text{ mW}$	$P_{mix} = 30.3 \text{ mW}$
$P_{filt} = 2.5 \text{ mW}$	$P_{filr} = 2.5 \text{ mW}$
$P_{ADC} = 7 \text{ mW}$	$P_{DAC} = 15.4 \text{ mW}$

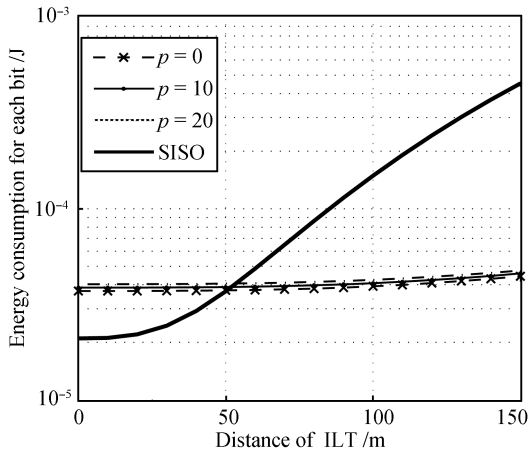


图 2 协作 MIMO 与 SISO 每比特能量消耗
Fig.2 Energy consumption per bit over d_j
(cooperative MIMO versus SISO)

如果令 $L = L_i^{st} = 10 \text{ Kbit}$ (后面设置相同), 图 3 给出了 IST 平均距离 d_m 与 ILT 最小距离门限 $d_{j \min}$ 之间的关系. 可以看出, 当 d_m 在 50 m 以内时, $d_{j \min}$ 在不同导频的情况下变化不到 0.5 m. 这表明, d_m 对 $d_{j \min}$ 影响很小. 取 $p = 10$, 考虑当 IST 距离较远时同样为 k 阶路径损耗, 且考虑所有电路能耗和 IST 能耗, 不同 d_m 与 d_j 下的协作 MIMO 与 SISO 相比, 每比特能量节省为 ΔE , 则 IST 平均距离 d_m 、ILT 距离 d_j 和 ΔE 之间的关系如图 4 所示. 图中平面 ($\Delta E = 0$) 以上部分表示协作 MIMO 传输所节省的能量, 以下部分为与传统 SISO 传输相比多消耗的能量. 当 d_m 一定时, d_j 越大节省能量越多, 而当 d_j 一定时, d_m 越小节省能量也越多. 可以看出, 在传感节点布署密度允许的条件下, 协作 MIMO 传输中一般应尽量减小 d_m , 并在可允许的

距离范围内尽量增大 d_j 才能节省更多的能量. 因此, 所提出的 DCREDT 选择算法是合理的.

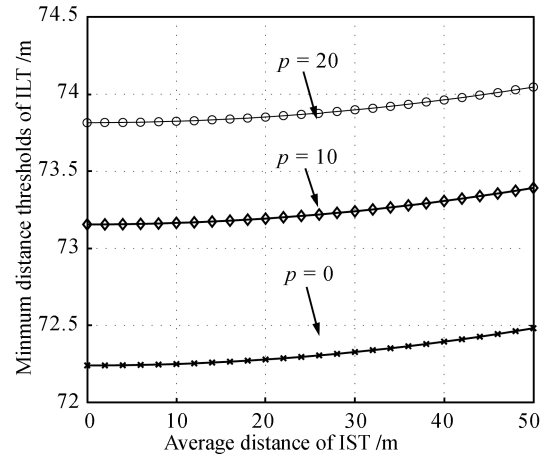


图 3 d_m 与 $d_{j \min}$ 的关系
Fig.3 Relationship between d_m and $d_{j \min}$

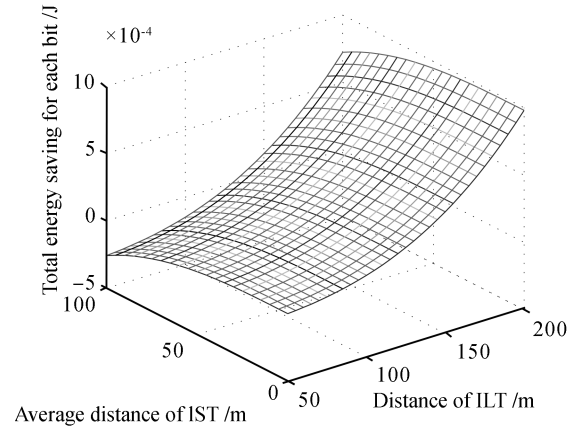


图 4 d_m 、 d_j 和 ΔE 的关系
Fig.4 Relationship among d_m , d_j , and ΔE

5.3 DCREDT 选择算法的有效性

设每次数据采集周期总的的路由路径距离为 1000 m, $p = 10 \text{ m}$, $d_m = 80 \text{ m}$. 再令 $d_i = 300 \text{ m}$, $d_{lth} = (d_{j \min} + d_i)/2$, $d_{sth} = d_m/2$, 且 IST 距离在 $(0, d_m]$ 均匀分布, ILT 距离在 $(d_{j \min}, d_i]$ 均匀分布, 基于 DCREDT 算法, 则在 1000 次数据采集周期中, 每次每比特总能耗的对数曲线如图 5 所示. 可以看出, 基于协作 MIMO 的多跳传输每比特总能耗保持平稳, 相对于 SISO 传输在一个数据采集周期能节省一个以上数量级的能量. 在数据采集周期内, 协作 MIMO 传输每比特的总能耗在 $(2.5 \sim 4) \times 10^{-4} \text{ J}$.

如果采用平均距离传输, 则每一跳的 ILT 距离相等. 同样令总路由路径距离为 1000 m, $d_m = 40 \text{ m}$, $p = 10$, 且 ILT 距离不受 d_{lth} 门限值的限制. 根据式 (9) 和式 (10), 则对于一次数据采集周期内

的跳数与多跳传输中每比特的总能耗, 其对数曲线关系如图 6 所示. 从图 6 可以看出, 对于 SISO, 总能耗随着跳数的增大而减小. 但当跳数增大到 27 跳左右时, 总能耗会增加, 这主要是因为除发射功率放大器以外的其他电路能耗增加. 对于多跳协作 MIMO, 当跳数为 5 时每比特的总能耗最小. 在 3 ~ 9 跳之间每比特总能耗为 $(2.7 \sim 3.9) \times 10^{-4} \text{ J}$. 将图 5 和图 6 相比较得出, 在采用多跳协作 MIMO 传输时, 采用 DCREDIT 选择算法每比特平均总能耗非常接近于采用平均等距离传输时的最小能耗. 图 5 中之所以出现比图 6 中的最小能耗更低的情况, 是因为在给定总路由路径距离的情况下, 图 6 中每一跳的平均距离受到跳数为整数的限制.

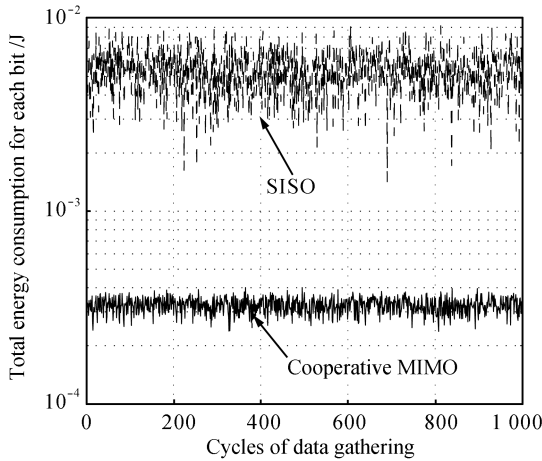


图 5 数据采集周期数与每比特总能耗的关系

Fig. 5 Relationship between the cycles of data gathering and total energy consumption per bit

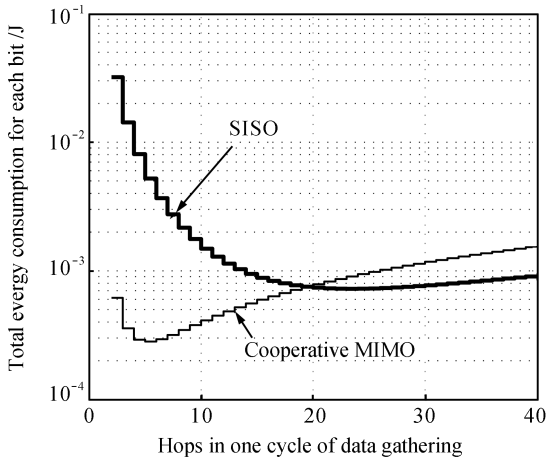


图 6 跳数与每比特总能耗关系

Fig. 6 Relationship between hops and total energy consumption per bit

在平均等距离传输过程中, 每一跳的传输距离未受 DCREDIT 算法中的距离门限的限制, 这样, 当

每一跳的距离达到门限值且总能耗处于最优值时, 会与采用 DCREDIT 算法的总能耗相当. 而如果每一跳的传输距离不相等, 且不受距离门限的限制, 则与采用距离门限的 DCREDIT 算法总能耗相比较, 其关系如图 7 所示. 为了清晰表明两者之间的关系, 这里只运行了 200 次数据采集周期. 可以看出, 当未采用距离门限进行限制时, 每比特传输所花费的总能耗, 要比采用距离门限限制的 DCREDIT 算法中每比特所花费的总能耗要高, 在统计平均上高出 $5 \times 10^{-5} \text{ J}$ 左右, 且网络能耗的平稳性与 DCREDIT 算法相比较而言要差很多. 其中, 无门限限制时有少数的数据采集周期出现总能耗比有门限限制时还低的情况, 是因为有门限限制时并不能保证每个数据采集周期均能达到最优化能耗, 而且无门限随机选择节点进行协作 MIMO 通信时, 如果传输距离合适, 则有可能产生较低的能耗. 总而言之, 基于协作 MIMO 传输的 DCREDIT 选择算法在能量节省与能耗均衡上是有效的.

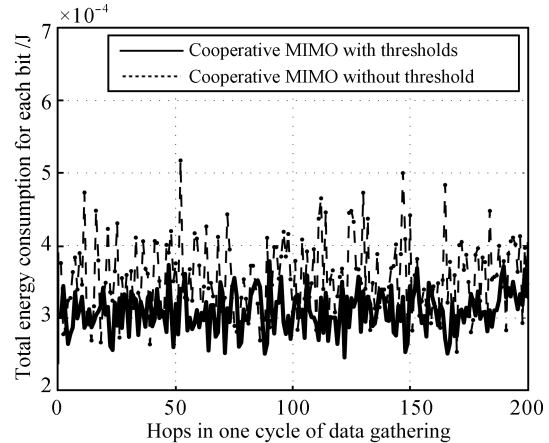


图 7 有门限与无门限时每比特总能耗比较

Fig. 7 Comparison of total energy consumptions per bit under the situations with and without threshold

6 结论

本文通过分析基于协作 MIMO 传输的 WSN 距离门限对能量节省的影响, 提出了一种新的 DCREDIT 选择算法. 该算法考虑了距离门限与剩余能量门限条件, 在 CH 与 CN 的动态选择中实现了 WSN 的能量节省与能耗均衡, 从而达到延长网络寿命的目的. 最后对采用 DCREDIT 选择算法的多跳 WSN 系统进行了总能耗分析, 仿真验证了 DCREDIT 选择算法的合理性与有效性.

References

1 Akyildiz I F, Su W L, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(8): 102-114

- 2 Cui S G, Goldsmith A J, Bahai A. Energy-efficiency of MIMO and cooperative MIMO techniques in sensor networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2004, **22**(6): 1089–1098
- 3 Jayaweera S K. Virtual MIMO-based cooperative communication for energy-constrained wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2006, **5**(5): 984–989
- 4 Shi Wei-Ren, Yuan Jiu-Yin, Lei Lu-Ning. Research on wireless sensor network coverage control algorithm. *Acta Automatica Sinica*, 2009, **35**(5): 540–545
(石为人, 袁久银, 雷露宁. 无线传感器网络覆盖控制算法研究. *自动化学报*, 2009, **35**(5): 540–545)
- 5 Li X H, Chen M, Liu W Y. Application of STBC-encoded cooperative transmissions in wireless sensor networks. *IEEE Signal Processing Letters*, 2005, **12**(2): 134–137
- 6 Heinzelman W B, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2002, **1**(4): 660–670
- 7 Gao T S, Zhang L, Gai Y, Shan X M. Load-balanced cluster-based cooperative MIMO transmission for wireless sensor networks. In: Proceedings of the 4th International Symposium on Wireless Communication Systems. Trondheim, Norway: IEEE, 2007. 602–606
- 8 Tuan C C, Lee J H, Chao S J. Using nearest neighbor method and subtractive clustering-based method on antenna-array selection used in virtual MIMO in wireless sensor network. In: Proceedings of the 10th International Conference on Mobile Data Management: Systems, Services and Middleware. Taipei, China: IEEE, 2009. 496–501
- 9 Liang J, Liang Q L. Channel selection in virtual MIMO wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2009, **58**(5): 2249–2257
- 10 Bian X X, Liu X C, Cho H. Study on a cluster-chain routing protocol in wireless sensor networks. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Communications and Networking. Hangzhou, China: IEEE, 2008. 964–968
- 11 Cavalcante R L G, Yamada I. Multiaccess interference suppression in orthogonal space-time block coded MIMO systems by adaptive projected subgradient method. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, **56**(3): 1028–1042
- 12 Zhao Bao-Hua, Li Jing, Zhang Wei, Qu Yu-Gui. MIMO-based energy-efficient wireless sensor networks. *Acta Electronica Sinica*, 2006, **34**(8): 1415–1419
(赵保华, 李婧, 张炜, 屈玉贵. 基于 MIMO 的节能无线传感器网络. *电子学报*, 2006, **34**(8): 1415–1419)
- 13 IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, ANSI/IEEE Standard 802.11a, 1999
- 14 Nguyen T D, Berder O, Sentieys O. Cooperative MIMO schemes optimal selection for wireless sensor networks. In: Proceedings of the 65th IEEE Vehicular Technology Conference. Dublin, Ireland: IEEE, 2007. 85–89
- 15 Wang Q H, Qu Y G. An effective organizing method for wireless sensor networks based on MIMO. In: Proceedings of the 2007 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Shanghai, China: IEEE, 2007. 2775–2778



梁平元 中山大学信息科学与技术学院博士研究生, 吉首大学物理科学与信息工程学院副教授. 主要研究方向为无线传感器网络与光通信.

E-mail: liangpingyuan123@163.com

(**LIANG Ping-Yuan** Ph.D. candidate at the School of Information Science and Technology, Sun Yat-sen University and associate professor at the College of Physics Science and Information Engineering, Jishou University. His research interest covers wireless sensor networks and optical communication.)



刘星成 博士, 中山大学信息科学与技术学院副教授. 主要研究方向为信息理论与编码与无线传感器网络. 本文通信作者. E-mail: isslxc@mail.sysu.edu.cn

(**LIU Xing-Cheng** Ph.D., associate professor at the School of Information Science and Technology, Sun Yat-sen University. His research interest covers information theory and coding, and wireless sensor networks. Corresponding author of this paper.)



石春 中山大学信息科学与技术学院博士研究生. 主要研究方向为无线自组织网络与无线局域网.

E-mail: byshichun@tom.com

(**SHI Chun** Ph.D. candidate at the School of Information Science and Technology, Sun Yat-sen University. His research interest covers wireless Ad Hoc networks and WLAN.)



罗锡璋 中山大学信息科学与技术学院教授. 主要研究方向为亚毫米波技术与光通信.

E-mail: isslxz@mail.sysu.edu.cn

(**LUO Xi-Zhang** Professor at the School of Information Science and Technology, Sun Yat-sen University. His research interest covers sub-millimeter wave technology and optical communication.)