

无线传感器网络中基于有限反馈的协同MIMO策略

张余^① 李子^② 蔡跃明^① 陈贤明^① 徐友云^①

^①(解放军理工大学通信工程学院 南京 210007)

^②(重庆通信学院 重庆 400035)

摘要: 该文针对无线传感器网络中能量有限问题,提出了一种基于有限反馈的协同MIMO策略。该策略基于梯度算法,用1bit反馈来自动地调整簇头节点和协同簇头节点的发射功率。对无线传感器网络中基于有限反馈的Alamouti码的协同MISO系统的误码率进行了理论分析,推导了基于有限反馈Alamouti码的协同MISO策略能耗的契尔诺夫上限表达式。理论分析和仿真结果都表明,该文提出的协同MISO策略与基于标准Alamouti码的协同策略相比,无线传感器网络的总能耗更低,能效更高,且当簇头节点和协同簇头节点一直选择较好信道对应的节点来发送信息时,即最优策略,无线传感器网络的总能耗更低。

关键词: 无线传感器网络; 协同MISO; Alamouti码; 有限反馈

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)01-0032-05

A Cooperative MIMO Scheme Based on Limited Feedback in WSNs

Zhang Yu^① Li Zi^② Cai Yue-ming^① Chen Xian-ming^① Xu You-yun^①

^①(Institute of Communications Engineering of PLAUST, Nanjing 210007, China)

^②(Chongqing Communication College, Chongqing 400035, China)

Abstract: A limited feedback-based cooperative MIMO scheme is proposed to reduce the total energy consumption in Wireless Sensor Networks (WSNs). In this scheme based on the gradient algorithm, cluster head and cooperative cluster head can automatically adjust their power using one-bit feedback. For the cooperative MISO scheme based on Alamouti-code with limited feedback in WSNs, the bit-error-rate and the energy consumption is analyzed and its energy-consumption expression about Chernoff bound is derived. Analysis and numerical results show that the proposed cooperative MISO scheme consumes less energy than the cooperative MISO scheme based on standard Alamouti-code, and obtains high energy-efficiency. If the one is always chosen, which can provide better channel to transmit data, it will reduce more energy-consumption in WSNs.

Key words: Wireless Sensor Networks (WSNs); Cooperative MISO; Alamouti-code; Limited feedback

1 引言

节能是低功耗无线传感器网络(WSNs)设计的关键,为延长WSNs的寿命,人们提出了许多能量有效策略。文献[1]以信道容量为目标函数,通过调整每个节点通信时隙来优化能效,获得了较大的能效增益。文献[2-7]利用多输入多输出(MIMO)技术能提高信道容量、减少传输能耗的特点,提出了利用协同MIMO来提高WSNs能效的策略,这些策略都是通过寻找协同节点,形成协同MIMO通信架构来提高WSNs的能效。Cui等人在文献[2]中分析了MIMO的能效和WSNs中采用协同MIMO后的能效,结果表明,进行中远距离通信时,采用协同MIMO策略能够减少WSNs的能耗,并分析了不同的数据速率对能耗的影响,得出了不同距离的最优传输速率;文献[3,4]中分别提出了在WSNs中利用空时分组码

(STBC)的协同传输策略来提高整个网络能效的方案;文献[3]同时也考虑了协同MIMO所带来的能量开销。文献[5]提出了分布式WSNs中基于V-BAST处理的一种能量有效的虚拟MIMO通信架构;文献[6]提出根据簇头节点与数据融合中心(FC)的距离不同来选择不同传输方式的最优策略;文献[7]提出了基于协同MIMO的自适应速率通信来均衡每个节点的能耗。由此可见,协同MIMO能够在某种程度上提高WSNs的能效,延长网络的寿命。

以上策略均假设各个协同节点以相同功率发送信息,未考虑各个协同节点发射功率不同的情况。从文献[7]可知,在总功率约束下,发送端调整每根天线的发射功率进行传输可提高Alamouti码的误码率性能。要对发送端天线的发送功率进行调整,必须通过反馈把信道状态信息反馈给发送端,但要获知全部信道信息很难,尤其是在能量有限的WSNs中。因此,本文将MIMO系统中的有限反馈策略拓展到WSNs中,提出了一种基于有限反馈的协同MIMO策略,该策略通过调整节点的发送功率,在给定误码率条件下,降低WSNs的总

2007-12-10 收到, 2008-07-11 改回

国家自然科学基金(60672079)和江苏自然科学基金(BK2007002, BK2006701)资助课题

能耗。为进一步降低网络总能耗并便于实现, 本文以1bit反馈Alamouti码的协同MISO系统为例, 分析有限反馈的协同MIMO策略的能效, 因MISO与MIMO系统有相同的理论基础, 以MISO为例分析MIMO是合理的。

本文首先给出了有限反馈的协同MISO的通信模型; 第3节分析了有限反馈Alamouti码的协同MISO系统误码率, 推导了误比特率的契尔诺夫上限表达式; 在第3节推导出误码率上限的基础上, 第4节对1bit反馈Alamouti码的协同MISO策略的能耗进行了分析, 导出了能耗表达式; 第5节给出了基于有限反馈Alamouti码与基于标准Alamouti码的两种协同策略性能仿真结果及其分析; 最后得出了结论。

2 系统模型

这里把文献[8]的反馈模型拓展为一个基于簇头的1bit反馈的协同MISO通信模型。如图1所示, 每个簇头节点(CH)先收集并融合簇内成员节点(CN)所采集到的数据, 再按照文献[1]的算法, 采用时分多址(TDMA)方式把数据发送到能量可补充的数据融合中心(FC)。在簇形成后, CN把采集到的数据发送给CH, 同时CH利用接收信号强度指示来寻找离CH最近且符合能量要求的节点(协同节点)形成协同多天线, CH联合协同节点(CCH)对所发送的信号进行Alamouti编码, 然后发送给FC。本文主要关注CH与FC间的通信, 忽略CN向CH发送数据阶段的能耗。另外, 1bit反馈所消耗的能量非常小, 可忽略不计。因而, 整个通信过程的能耗主要集中在本地通信(CH与CCH间的通信)和远距离通信(CCH与FC间的通信)两个阶段。

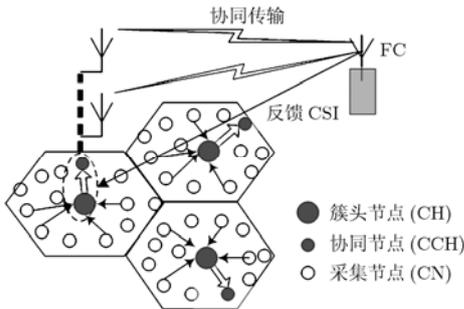


图1 基于反馈的协同MISO通信系统

本文提出的基于有限反馈的协同MIMO策略的步骤如下:

步骤1 CH找到CCH后, 按照图2格式把待发送的数据 $\mathbf{s}(n) = [s_1(n), s_2(n)]^T$ 和其他信息发送给CCH。CH和CCH再对 $\mathbf{s}(n)$ 进行Alamouti编码, 得 $\mathbf{s}(n) = [s_1(n), s_2(n); -s_2^*(n), s_1^*(n)]$, 其中, 第1列为CH编的码, 第2列为CCH编的码, *表示共轭。

步骤2 CH和CCH编码后, CCH按照步骤1接收到的FC地址与CH一起把 $\mathbf{s}(n)$ 发送给FC, FC收到信息后对信道进行

编码方式	列序号	CH地址	FC地址	$\mathbf{s}(n)$
------	-----	------	------	-----------------

图2 CH发送给CCH的数据格式

评估, 再把评估结果反馈给CH, 如此构成一个闭环系统。

FC接收到CH和CCH联合编码后发送的信号可表示为

$$\mathbf{r} = \mathbf{sw}\mathbf{h} + \mathbf{v} \quad (1)$$

其中 $\mathbf{r} = [r(n), r(n+1)]^T$ 为FC在连续两个时刻收到的信号; $\mathbf{w} = [\sqrt{w_1}, 0; 0, \sqrt{w_2}]$ 是 2×2 的功率权值矩阵, 下一节将对其进行讨论; $\mathbf{v} = [v(n), v(n+1)]^T$ 为噪声向量; $\mathbf{s} = \mathbf{s}(n)$ 为CH和CCH进行Alamouti编码后在第 n 和 $n+1$ 时刻待发送的数据; $\mathbf{h} = [h_1, h_2]^T$, 且 h_i ($i = 1, 2$) 表示Rayleigh信道的信道衰落系数。为简化分析, 假设: (1) FC能获取完全信道状态信息; (2) CH、CCH和FC之间完全同步; (3) $h_1(n)$ 和 $h_2(n)$ 独立同分布, $h_i(n) = h_i(n+1) = h_i, i = 1, 2$, 且都服从均值为0, 方差为1的复正态分布, 且 $h(n)$ 、 $v(n)$ 和 $s(n)$ 间也相互独立; (4) $E[v(n)] = 0$, $E[|v(n)|^2] = \sigma_n^2$, 其中 $E[\cdot]$ 表示统计均值, $|\cdot|$ 表示复数的模。

3 基于有限反馈的协同MISO系统误比特率分析

为获得基于1bit反馈Alamouti码的协同MISO策略(下文简称本文策略)的能耗计算方式, 首先对其误比特率进行分析。Alamouti码的正交性可使译码算法更加简单, 采用线性最大似然检测就能获得很好的性能^[9], 根据等式(1)的模型, 可知接收端符号瞬时信噪比为

$$\gamma_s = (w_1|h_1|^2 + w_2|h_2|^2)E_s/N_0 \quad (2)$$

其中 E_s 为接收端未考虑瑞利衰落的符号能量, $N_0 = 2\sigma^2$ 为接收端噪声功率谱密度。

当发送端不知道信道状态信息时, 发送端等功率发送, 不带反馈的Alamouti码简称为标准Alamouti码, 即 $w_1 = w_2 = 0.5$ 。当发送端获得1bit反馈信息时, CH和CCH采用梯度算法来调整自己的发送功率。在此, 梯度算法是指当反馈比特 $bf = 1$ 时, CH的发射功率的权值增加 Δw , CCH发射功率的权值减少 Δw ; 当 $bf = 0$ 时, CH的发射功率的权值减少 Δw , CCH的功率的权值增加 Δw 。其中, Δw 可根据不同的信道环境来确定。本文采用文献[10]提出的对角权重来分析1bit反馈Alamouti码, 则第 n 个时刻的权值矩阵 \mathbf{w}_n 可表示为

$$\mathbf{w}_n = \begin{cases} \text{diag}\{\sqrt{w_{n-1} + \Delta w}, \sqrt{w_{n-1} - \Delta w}\}, & bf = 1 \\ \text{diag}\{\sqrt{w_{n-1} - \Delta w}, \sqrt{w_{n-1} + \Delta w}\}, & bf = 0 \end{cases} \quad (3)$$

且满足 $0 \leq \Delta w \leq 0.5$, $0 \leq w_n \leq 1$ 。即当 w_n 增大至1时, w_n 就不再增加; 当减小至0时, w_n 就不再减小。此时, Alamouti码简化为两节点选择好的信道交替发送, 即类似于MISO中的天线选择, 如 w_n 只能为0或1, 则选择好的信道对应的节点交替发送, 本文方案达到最优, 为比较起见, 下文单独进行了讨论, 简称最优策略。为推导出误码率与比特能量间的

关系, 设 $\xi = \sqrt{w_n}|h_1|^2 + \sqrt{1-w_n}|h_2|^2$ 。由文献[11]可容易地推导出 ξ 的概率密度函数, 如式(4)。

$$f(\xi) = \begin{cases} \left(\frac{\exp(-\xi/(1-w_n)) - \exp(-\xi/w_n)}{(1-2w_n)}, \right. \\ \quad \left. 0 < w_n < 1 \text{ 且 } w_n \neq 0.5, \xi \geq 0 \right. \\ 2(\exp(-\xi) - \exp(-2\xi)), & w_n = 0, 1, \xi \geq 0 \\ \xi \exp(-\xi), & w_n = 0.5 \text{ 且 } \xi \geq 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

如采用M-QAM调制, 瞬时误符号率^[12]可表示为

$$\text{Pr}_{s,M}(\mathbf{H}) \approx 4(1-M^{-1/2})Q(\sqrt{3\gamma_s/(M-1)}) \quad (5)$$

其中 $M = 2^b$ 且 b 为偶数; 当 b 为奇数时, 只需将 $(1-M^{-1/2})$ 去掉; b 为星座点数。式(5)中 Q 函数很难积分出具体表达式, 在此用契尔诺夫上界来进行理论分析。由式(4)和式(5)可推导出, 本文策略的平均误码率的契尔诺夫边界为

$$\bar{\text{Pr}}_{\text{Bf},b} = E_{\mathbf{H}} \{ \text{Pr}_b(\mathbf{H}) \} \leq \begin{cases} \left(\frac{4(1-M^{-1/2})}{b(w_n(1-w_n))} \right) \left(\frac{3bE_b}{((M-1)N_0)} \right)^{-2}, & 0 < w_n < 1 \\ \left(\frac{4(1-M^{-1/2})}{b} \right) \left(\frac{3bE_b}{(2(M-1)N_0)} \right)^{-2}, & w_n = 0, 1 \end{cases} \quad (6)$$

当 $w_n = 0.5$ 时, 退化成标准Alamouti码的协同传输方式。其中 E_b 为接收端未考虑瑞利衰落的比特能量。因而, 从式(6)可导出比特能量的表达式, 如式(12)和式(16)。采用BPSK调制的本文策略的平均误码率的契尔诺夫上限表达式也可根据相同的理论获得。

4 基于有限反馈的协同MISO的能耗分析

CH在采用协同MISO策略和FC进行通信的过程中, 能耗主要集中在两个阶段: 本地通信和远距离通信。假设FC的能量是可补充的, 在分析本文策略的能耗时, 不考虑接收端的电路能耗。为简化分析, 与文献[2]类似, 忽略数字信号处理模块和编译码模块的能耗。基于1bit反馈Alamouti码的协同MISO策略的总能耗可表示为

$$E_{\text{Bf},\text{total}} = E_{\text{total-long}} + E_{\text{total-local}} \quad (7)$$

其中 $E_{\text{total-local}}$ 为本地通信的能耗, $E_{\text{total-long}}$ 为远距离通信的能耗。 $E_{\text{total-local}}$ 由电路能耗 $E_{\text{c-local}}$ 和传输能耗 $E_{\text{t-local}}$ 组成, $E_{\text{c-local}}$ 为节点的DAC, ADC等模块的能耗总和, 如式(8)。

$$E_{\text{c-local}} = N_b(P_{\text{ADC}} + P_{\text{mix}} + P_{\text{filt}} + 2P_{\text{syn}} + P_{\text{DAC}} + P_{\text{mix}} + P_{\text{filr}} + P_{\text{LNA}})/(bB) \quad (8)$$

其中 N_b 为CH需要传输数据的比特数; B 为信道带宽; P_{ADC} , P_{mix} , P_{filt} , P_{syn} , P_{DAC} , P_{filr} 和 P_{LNA} 分别表示模数转换器、混频器、发送端滤波器、同步器、数模转换器、接收端滤波器和低噪放大器的功耗。参数设置及 P_{ADC} 和 P_{DAC} 的计算式见文献[12]。对于短距离通信, 单跳SISO(单输入单输出)传输技术是能量最有效的技术^[2]。因此, CH与CCH间采用单跳SISO通信, 并设两者之间的信道为加性高斯白噪声信道,

衰落因子 $\kappa = 2$ 。因此, 由文献[12]中基于单跳SISO模型可得CH与CCH间传输能耗 $E_{\text{t-local}}$, 可表示为

$$E_{\text{t-local}} = \frac{2(1+\alpha)(2^b-1)}{3b} N_b N_f N_0 G_1 \ln \frac{4(1-2^{-b/2})}{b\text{Pr}_b} \quad (9)$$

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^[2]; G_1 为 $d_m = 1\text{m}$ 处的增益因子, N_f 为接收机噪声系数, Pr_b 为接收端能忍受的误码率。

当CCH收到CH的数据后与CH一起构成协同MISO向FC发送信息, 即远距离通信。此阶段的总能耗可表示为

$$E_{\text{total-long}} = N_b(P_{\text{PA-long}} + P_{\text{c-long}})/(bB) \quad (10)$$

其中电路功耗 $P_{\text{c-long}}$ 可表示为 $P_{\text{c-long}} = P_{\text{ADC}} + P_{\text{mix}} + P_{\text{filt}} + P_{\text{syn}}$; 射频功放的功耗 $P_{\text{PA-long}}$ 是传输能耗的体现, $P_{\text{PA-long}} = \alpha P_{\text{out}}$, P_{out} 为发送功率, 有

$$P_{\text{out}} = \bar{E}_{\text{Bf}} R_b (4\pi)^2 d^\kappa M_1 N_f / (G_t G_r \lambda^2) \quad (11)$$

其中 $\kappa = 2 \sim 4$, R_b 为比特速率; M_1 为链路预留; d 为CH与FC间的距离; G_t 为发送端的天线增益; G_r 为接收端的天线增益; λ 为载波波长; \bar{E}_{Bf} 为本文策略在接收端满足一定误码率要求时所需的比特能量, 由式(6)推导出 $w_n \in (0, 1)$ 内比特能量的契尔诺夫上限值为

$$E_{\text{Bf},b\text{-bound}} \approx \frac{(2^b-1)}{3b} N_0 \left(\frac{4}{b\text{Pr}_b w_n (1-w_n)} (1-2^{-b/2}) \right)^{1/2} \quad (12)$$

然而, 在采用梯度算法时, w_n 是一个瞬时值, 仅对上式求均值才能得到平均比特能量的契尔诺夫上限, 平均比特能量的契尔诺夫上限可表示为

$$\bar{E}_{\text{Bf},b\text{-bound}} \approx \frac{3.15}{3} \frac{(2^b-1)}{b} N_0 \left(\frac{4}{b\text{Pr}_b} (1-2^{-b/2}) \right)^{1/2} \quad (13)$$

把式(8)-式(13)代入式(7)可得出本文策略总能耗的契尔诺夫上限。

若 $\mathbf{w} = \text{diag}\{1, 0\}$ 或 $\mathbf{w} = \text{diag}\{0, 1\}$, 本文策略可达最优, 此时先按照基于标准Alamouti码的协同MISO策略发送一帧 (N_{frame} 比特)给FC, FC接收到信息后对信道进行估计, 然后把估计结果反馈给CH。如 $\text{bf} = 1$, 则直接发送信息, 不再发送给CCH; 如 $\text{bf} = 0$, 则CH不直接发送数据给FC, 而先把数据发送给CCH, 再通过CCH转发给FC。因此, 最优策略的总能耗分为以下两部分: 采用标准Alamouti码的协同MISO策略传输一帧的能耗和获得反馈后的能耗。因前者的能耗与标准Alamouti码的协同MISO策略的能耗计算方式一样, 不予介绍。因 $h_1(n)$ 和 $h_2(n)$ 独立同分布, 则 $|h_1|^2 \geq |h_2|^2$ 与 $|h_1|^2 < |h_2|^2$ 的概率各为0.5。所以总能耗为

$$E_{\text{opt-total}} = 0.5E_{\text{direct}} + 0.5E_{\text{forward}} + N_{\text{frame}} E_{\text{Sib},\text{total}} \quad (14)$$

其中 $E_{\text{Sib},\text{total}}$ 为基于标准Alamouti码的协同MISO策略的比特能耗, E_{direct} 为CH直接发送数据给FC的能耗, 由以上分析易知

$$E_{\text{direct}} = (N_b - N_{\text{frame}}) \left((1+\alpha) \bar{E}_{\text{opt},b} \frac{(4\pi)^2 d^\kappa}{G_t G_r \lambda^2} M_1 N_f + P_{\text{c-long}} / (bB) \right) \quad (15)$$

其中 $\bar{E}_{opt,b}$ 为采用最优策略时，接收端满足一定误码率要求所需的比特能量；由式(6)可导出 $\bar{E}_{opt,b}$ 的契尔诺夫上限为

$$\bar{E}_{opt,b-bound} \approx \frac{4(2^b - 1)}{3b} N_0 \left(\frac{4(1 - 2^{-b/2})}{bP_{r_b}} \right)^{1/2} \quad (16)$$

$E_{forward}$ 为CH通过CCH转发数据给FC所消耗的能量，易知

$$E_{forward} = (N_b - N_{frame}) \cdot (E_{b-local} / N_b + P_{c-local} / (bB)) + E_{direct} \quad (17)$$

把式(15)-式(17)代入式(14)可求得出最优策略总能耗的契尔诺夫上限值。

此外，还可通过数值仿真来计算 \bar{E}_{Bf} 或 $\bar{E}_{opt,b}$ ，根据 $\bar{P}_{r_b} = E_H [P_{r_b}]$ ，通过10000次随机产生信道抽样来计算 \bar{P}_{r_b} ，根据所要求的 \bar{P}_{r_b} 找出 \bar{E}_{Bf} 或 $\bar{E}_{opt,b}$ 。再联合式(7)-式(11)算出 $E_{Bf-total}$ ，联合式(14)，式(15)和式(17)算出 $E_{opti-total}$ 。在第5节对 $E_{Bf-total}$ ， $E_{opti-total}$ 和标准Alamouti码协同MISO策略的总能耗进行了分析比较。

5 仿真结果分析

为证明理论分析，在此给出了仿真结果及其分析。图3给出了基于标准Alamouti码的协同MISO策略(简称标准Alamouti码策略)和本文策略的误码率性能曲线，假设在发送一帧数据时间内，信道是不变的，即两个节点的功率在一帧内不变，帧间按照权重值呈梯度变化。由图3可知，在相同信噪比条件下，本文策略的误码率性能比标准Alamouti码策略的误码率性能好。换句话说，在相同的误码率条件下，本文策略需要的信噪比比标准Alamouti码策略小，且当梯度的步长较小时，性能改善不大，当步长较大时，性能接近最优策略。

图4给出在采用BPSK调制，相同误码率条件下，SISO模型、标准Alamouti码策略和本文策略的总能耗与传输距离之间的变化曲线。可知，本文策略的总能耗比标准Alamouti码策略的总能耗少，并且有比标准Alamouti码策略更松的上限。最优策略(即 $w_n = 0,1$)的能耗更小。此外，图5还给出了在给定误码率，CH与FC间的距离为10m的条件下，不同的调制方式对3种策略的影响曲线，3种策略的最优星座大小分别为5, 6和6。同样，可以得出其他距离的最优星座大小，如表1， b_{st} ， b_{bf} 和 b_{opt} 分别为3种策略的最优调制星座大小。

图6示出了根据不同距离而采用最优调制方式后，标准Alamouti码策略与本文策略的能耗比较，从图可知，本文策略在某种程度上能降低总能耗，而最优策略采用最优调制传输时，能大幅度地减少整个网络的能耗，即提高了无线传感器网络的总能效。

6 结束语

本文提出了一种基于有限反馈Alamouti码的协同MIMO策略。文中主要对基于1bit反馈Alamouti码的协同MISO策略的总能耗进行了分析，推导出了该策略总能耗的

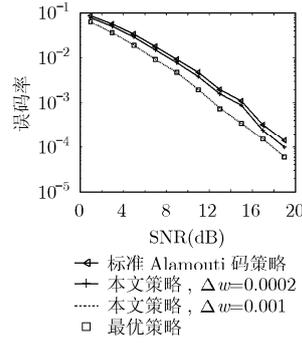


图3 误码率性能随信噪比变化的曲线

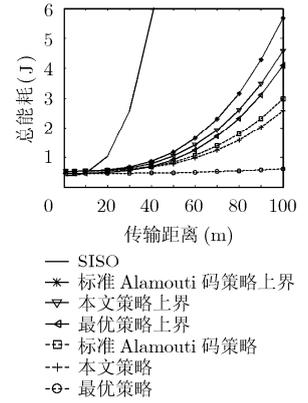


图4 3种策略总能耗比较曲线

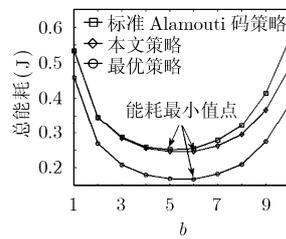


图5 总能耗随星座大小变化的曲线

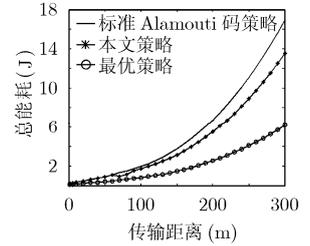


图6 3种策略在最优速率下的总能耗比较曲线

表1 最优星座大小

$d(m)$	1	5	10	20	30	40	50	60	70	80	≥ 90
b_{st}	12	7	5	4	2	2	2	2	1	1	1
b_{bf}	13	7	6	4	3	2	2	2	2	2	1
b_{opt}	13	8	6	4	3	2	2	2	2	1	1

契尔诺夫上限。理论分析和仿真结果表明，在无线传感器网络中，基于1bit反馈Alamouti码比基于标准Alamouti码的协同MISO策略能降低更多的能耗，获得更高的能效，且采用在簇头节点和协同簇头节点间选择信道相对较好的节点来发送数据时，能大大降低整个无线传感器网络的总能耗。虽然本文只针对1bit反馈的Alamouti码的协同MISO策略的能效进行了研究，但是此策略可以推广到基于多比特反馈的STBC的协同MIMO策略中去。

参考文献

- [1] Yao Y W and Giannakis G B. Energy-efficient scheduling for wireless sensor networks [J]. *IEEE Trans. on Wireless Comm.*, 2005, 53(8): 1333-1342.
- [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 Comm.*, 2004, 22(6): 1089-1098.
- [3] Jayaweera S K. Virtual MIMO-based cooperative communication for energy-constrained wireless sensor

- networks [J]. *IEEE Trans. on Wireless Comm.*, 2006, 5(5): 984-989.
- [4] Li X, Chen M, and Liu W. Application of STBC-encoded cooperative transmissions in wireless sensor networks [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2005, 12(2): 134-137.
- [5] Jayaweera S K. An energy-efficient virtual MIMO communications architecture based on V-BAST processing for distributed wireless sensor networks[C]. 2004 IEEE SECON, California: IEEE press, 2004: 299-308.
- [6] Nguyen T D, Berder O, and Sentieys O. Cooperative MIMO schemes optimal selection for wireless sensor networks[C]. VTC2007-Spring, Dublin: IEEE press, 2007: 85-89.
- [7] Ahmed I, Mugen P, and Wang W. Uniform energy consumption through adaptive rate communications in cooperative MIMO based wireless sensor networks[C]. IEEE WiCom, Shanghai: IEEE press, 2007: 1-4.
- [8] Xue Y and Gershman A B. Alamouti-type wireless communication systems with one-bit feedback [C]. IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop, 2004, 7: 143-147.
- [9] Alamouti S M. A simple transmit diversity techniques for wireless communications [J]. *IEEE Journal Selected Areas Comm*, 1998, 16(8): 1451-1458.
- [10] Larsson E G, Ganesan G, and Stoica P, *et al.*. On the performance of orthogonal space-time block coding with quantized feedback [J]. *IEEE Comm. Letters*, 2002, 6(11): 487-489.
- [11] 盛骤, 谢世千, 潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 浙江: 高等教育出版社, 第三版, 2001: 162-165.
Sheng Zhou, Xie Shi-qian, and Pan Cheng-yi. Probability and Statistics [M]. Zhejiang, Higher Education Press, Third Edition, 2001: 162-165.
- [12] Cui S, Goldsmith A J, and Bahai A. Modulation optimization under energy constrains[C]. IEEE International Conf. on Comm. Anchorage, Alaska: IEEE press, 2003: 2805-2811.
- 张 余: 男, 1983年生, 硕士生, 研究方向为协同频谱检测、无线传感器网络中的协同传输技术等.
- 李 子: 男, 1980年生, 博士, 研究方向为MIMO技术、超宽带技术、认知无线电技术等.
- 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.
- 陈贤明: 男, 1970年生, 博士生, 工程师, 研究方向为移动通信、无线传感器网络等.
- 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.