

几种协作分集模式能量消耗比较*

陈纯锴, 谢红

(哈尔滨工程大学信息与通信工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 为了提高通信性能和延长无线网络生命周期,提出了统一的系统模型;分析了选择译码转发(SDF)和多输入多输出(MIMO)协作工作模式,研究了影响能耗的几个因素。研究表明,对于同一平均误比特率值,SDF系统比单输入单输出(SISO)系统的能量消耗低;当发射节点数目固定时,MIMO协作方式接收节点不是越多越好,而是存在一个最佳数目。短距离时,协作MIMO系统比传统SISO系统的比特能耗高。大于临界距离时,协作MIMO系统才能节省能量。

关键词: 协作通信; 多输入多输出; 能量消耗; 协作分集

中图分类号: TP393.04 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)07-2629-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.07.062

Comparison of energy consumption for several cooperative diversity modes

CHEN Chun-kai, XIE Hong

(College of Information & Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to improve the communicating performance and extend the life cycle of wireless networks, this paper set up a unified model, analyzed the cooperative modes of selective decoding forward (SDF) and multiple input multiple output (MIMO), and investigated the factors which affected energy consumption. The research results indicate that the energy consumption of the SDF system is lower than that of the single input single output (SISO) system for a fixed ABER value. When the number of transmitting nodes is fixed, required an optimal number of receiving nodes is for the lowest energy consumption. The energy consumption of MIMO system is higher than that of traditional SISO for a short distance. The energy consumption can only be saved unless the distance is longer than the critical value.

Key words: cooperative communication; multiple input multiple output; energy consumption; cooperative diversity

协作分集可以解决难以在移动终端安装多根天线的问题,推进了MIMO技术的实用化。协作分集能够切实地利用空间资源来提高通信系统的性能,在不牺牲额外系统带宽的情况下,协作通信技术能显著提高信息传输速率和改善系统性能^[1,2]。理论分析表明,作为一种抵抗无线信道衰落损耗的有效手段,协作通信能被广泛应用在未来无线通信网络中,如Ad hoc网络、蜂窝网络、无线传感网。特别是无线传感网络能量有限,能源效率问题成为提高整个网络生命周期的一个重要指标^[3,4]。

之前很少有人研究能量消耗问题。YAO等人^[5]分析了能量效率,遵循带宽与功率的折中,对于不同中继策略以低功耗和低频谱效率为特点。结果表明:解码转发协作中继比直接传输可获得实质性能量效率的改善,协作中继系统可转换为等效的MIMO系统模型,总能量消耗是发射机功率放大器及其他节点电路消耗的能量总和^[5]。在此基础上本文研究了SISO系统、SDF系统和MIMO系统的能量消耗,分析了模型的中继链路可靠性和中继端的不完全解码。并进一步探讨了几种分集能耗与节点数目、传输距离间的关系。

1 系统模型

将无线通信统一成多节点的协作分集系统模型(图1),先

考虑特殊情况,一个经典中继协作系统,包括一个源、一个中继和一个目标节点组成。如果中继节点对所接收到的信号直接进行译码,再转发给目的节点,将有可能引起错误传播。克服问题方法之一是在中继节点处设定一个信噪比门限值。在接收信号译码处理之前,先比较其等效信噪比与门限值的大小,如果大于门限值,中继节点将进行译码处理,并进行信息转发,反之不对信号处理。基于门限的方法虽然简便,但是门限值的选择至关重要,如果太小,中继节点译出的信息很可能存在错误;如果太大,每个中继节点可能都不需要信息转发,这样协作将失去意义。另外,即便是等效信噪比大于门限值,也不能保证中继节点译出信息的完全正确^[6]。总的来说,通信过程包括两个阶段的半双工模式。在第一阶段,源节点广播信息给中继和目的节点,如果中继端的接收信噪比高于预设门限时,中继节点解码并重传信息给目的节点;在第二阶段,目标节点接收机将采用最大比合并(MRC)方式复合第一阶段中继发来的信号,当中继接收到的信号信噪比低于门限时中继在第二阶段监听。

假定所有节点为静态和窄带传输,则所有的信道是非频率选择性衰落的。信噪比门限的选择可根据源、目的节点与中继节点间链路的平均信噪比来确定。影响选择性译码转发(SDF)系统性能的两个因素是节点的几何位置和中继节点的

收稿日期: 2011-10-26; 修回日期: 2011-11-28 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60972077)

作者简介: 陈纯锴(1975-),男,黑龙江哈尔滨人,副教授,博士研究生,主要研究方向为协作通信与编码(chenckoffice@163.com); 谢红(1968-),女,教授,博士,主要研究方向为无线网络通信。

功率分配^[7]。图1表示节点的可能位置。为说明问题,本文结合系统模型中的路径损耗和相对距离来分析。归一化的平均路径信噪比为 $\sigma_{ij}^2 = (d_{SD}/d_{ij})^\mu$,其中 d_{SD} 表示源节点和目标节点间距离, d_{ij} 为第 i 和 j 节点间距离, μ 为路径损耗因子。图1中的 θ 可以根据三角函数公式由 d_{SR} 和 d_{RD} 确定,现在让 $d_{SD} = 1$,得到归一化的 σ_{SR}^2 和 σ_{RD}^2 。接收端收到的信号为

$$y_{rd} = \sqrt{P_S} h_{rd} s + n_{rd} \quad (1)$$

其中: r_{rd} 为中继节点到目的节点间路径增益, n_{rd} 为服从零均值和方差为 N_0 的加性高斯白噪声。

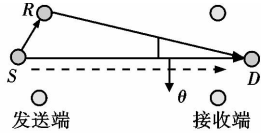


图1 统一的 $N_T \times N_R$ 协作分集系统模型

2 协作方式与能量消耗分析

2.1 SDF及MIMO协作方式

选择译码转发(SDF)是根据所接收到信号的信噪比进行判断,如果所接收到的信噪比能够正确解码,那么中继节点就对接收信号进行译码—编码再转发的过程。如果所接收到的信噪比不能正确解码,中继节点就不再对接收信号进行编码再转发的过程。在第二个时隙,由信源节点继续发送信息到目的节点。对于SDF方案错误概率可以由独立事件和的形式来表述:

$$P_e = P_e^{SD} \cdot F_{\gamma_{SR}} + (1 - F_{\gamma_{SR}}) \cdot [(1 - P_{e|\gamma_{SR} > \gamma^*}^{SR}) \cdot P_e^{(DIV)} + P_{e|\gamma_{SR} > \gamma^*}^{SR} \cdot P_e^{(C)}] \quad (2)$$

其中:第一项为源到中继间瞬时的信噪比 γ_{SR} 小于指定门限值 γ^* 时的错误概率。用累积分布函数CDF表示为 $F_{\gamma_{SR}} = P_r(\gamma_{SR} < \gamma^*)$,此时,中继保持监听;第二项为源到中继节点瞬时接收信噪比 γ_{SR} 高于指定门限 γ^* ,中继节点进行译码转发,概率为 $(1 - F_{\gamma_{SR}})$ 。第一阶段中,中继对从源发过来的信号能正确译码概率为 $(1 - P_{e|\gamma_{SR} > \gamma^*}^{SR})$,其中 $P_{e|\gamma_{SR} > \gamma^*}^{SR}$ 是在 $\gamma_{SR} > \gamma^*$ 情况下,中继在第一阶段也不能正确译码的概率。 $P_e^{(DIV)}$ 是在第二阶段目标节点对于两个接收到的信号在正确译码情况下,错误合并的概率,这种情况的发生是对门限值的错误选择而导致在第二阶段目标节点错误合并产生的,而 $P_e^{(C)}$ 则恰恰相反,是在即使 $\gamma_{SR} < \gamma^*$ 情况下,中继也不能正确译码从而导致不正确合并产生的错误概率^[8]。实际系统中各节点由于尺寸和成本的限制,只有一根天线,需要节点间相互协作,建立起协作MIMO系统。图1中,发送端有 N_T 个节点,接收端有 N_R 个节点,其中一个为主节点,其他为协作节点。不协作时为信息直传方式,即SISO系统只是MIMO的特例。上面讨论了系统模型中SDF及其他协作方式,接下来分析协作系统的能量消耗问题。

2.2 系统能量消耗分析

要对系统总能耗进行评估,就必须先获得一定误码性能下的每比特信息所需要的发射能量。进而得到一定误码性能下每比特信息所需发射能量的近似表达式。每一次通信每比特消耗能量应包含三个部分:a)功率放大器部分;b)发射机电路消耗;c)接收机电路消耗^[9,10]。直传时平均功率消耗为

$$P_d = P_{Tx,d} + P_{Tx,c} + P_{Rx,c} \quad (3)$$

其中: $P_{Tx,d}$ 是发射机功率放大功率; $P_{Tx,c}$ 是发射机和其他模拟和射频电路消耗功率; $P_{Rx,c}$ 是接收机电路消耗功率。随着集成电路工艺的进步,电路功耗变得很低,功率放大消耗在实际应用中成为重要组成部分,像传感器网络中就是这样。对于本地通信,由于传输距离通常很小,通信环境相对比较简单。因此可以认为源节点到邻居节点经历的是加性高斯白噪声(AWGN)信道,传输的路径损耗因子 $\mu = 2$ 。并假定调制方式为M-QAM,此时每比特所要求的发射能量为

$$E_b = \frac{2N_0(M-1)}{3\log_2(M)} \left[\left[1 - \frac{P_b \log(M)}{2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right)} \right]^{-2} - 1 \right]^{-1} \quad (4)$$

其中: P_b 为此阶段系统给定的比特误码率要求, M 为调制阶数。而对于协作传输,功率放大器的能量消耗表示为

$$P_{PA,d} = (1 + \alpha) \frac{(4\pi)^2 d^\mu M_f N_f}{G_T G_R \lambda^2} E_{Tx,d} R_d \quad (5)$$

其中: $\alpha = \xi/\eta - 1$, ξ 是功率放大器的漏极效率, η 为峰均功率比; μ 为路径损耗指数,在无线通信中一般取 $2 \sim 4$; G_R 、 G_T 分别为收发机的天线增益; M_f 为链路补偿因数; λ 是载波波长; $N_f = N_r/N_0$, N_r 为接收机输入噪声功率谱密度, N_0 为AWGN单边功率谱密度; R_d 为比特速率。

根据式(5),功率放大器能量消耗效率可以用 $E_{PA,d} = P_{PA,d}/R_d$ 表示。则直传系统每比特消耗全部能量可写做:

$$E_d = E_{PA,d} + P_{Tx,c}/R_d + R_{Rx,c}/R_d \quad (6)$$

同样,对于SDF系统每比特消耗全部能量可写做:

$$E_{SDF} = E_{PA,SDF} + (2 - F_{\gamma_{SR}}) P_{Tx,c}/\frac{R_d}{2} + 3P_{Rx,c}/\frac{R_d}{2} \quad (7)$$

其中: $E_{PA,SDF}$ 是在源和中继放大器的每比特功率消耗组合;第二项是源和中继节点发射机电路能量消耗,由于是半双工模式,SDF系统码率是直传系统的一半;第三项是中继节点在阶段1和目标节点在阶段1和阶段2中接收机消耗能量之和,所以应该是三倍关系。为与直传系统公平比较,令 $E_{PA,SDF} = E_{PA,d}$,并且在SDF情况中计算相应的ABER。

在MIMO通信中,有 N_T 个发射节点和 N_R 个接收节点参与通信。发射与接收节点的能量损耗不同,除发射端各节点功率放大器能耗外其他部分电路损耗为

$$P_C = N_T P_T + N_R P_R \quad (8)$$

其中: P_T 为发射节点能耗,包含数模转换器、混频器、发送滤波器以及频率合成器能耗; P_R 为接收节点能耗,它由频率合成器、低噪声放大器、混频器、中频放大器、接收滤波器和模数转换器能耗组成。在固定传输速率情况下,每比特数据能耗 $E_{bt} = (P_{PA} + P_C)/R_{bt}$ 。 $R_{bt} = N_T \log_2(M) R_s$ 为MIMO系统的总比特率,是各节点符号传输速率^[11,12]。

2.3 中继节点位置对能耗及误码性能分析

在初始化时可知道中继节点与其他节点距离,路径损耗 $d_{i,j}^\mu$ 的大小是根据已知的S到R、S到D、R到D的距离而预先设定。如图2所示,当两条中继路径($S \rightarrow R, R \rightarrow D$)其中的一条距离大于直传路径距离($S \rightarrow D$)时,系统性能会下降。S到R及R到D的距离必须小于S到D的距离,这种选择方法不会因为路径衰减而造成误码率的增加。同时协作传输可以降低系统误码率,而其能耗却高于直接传输的能耗。

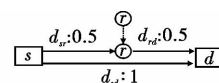


图2 中继节点位置对系统性能影响

3 仿真结果与讨论

3.1 SDF 系统与直传系统能量效率比较

依据每比特消耗能量,比较 SDF 与直传系统的能量效率。假定使用 M-QAM 调制,码率 $R = 100$ kbps。首先,计算 ABER 和 $E_{PA,d}, E_{bit}/N_0$ 值的范围是:0 ~ 30 dB。由文献[7]得出 $P_{Tx-ckt} = 98.2$ mW, $P_{Rx-ckt} = 112.5$ mW,直传系统全部的能量消耗 E_d 用式(6)计算得出。对于选择译码转发 SDF 情况,使用式(7)计算 E_{SDF} 。在仿真时设置为 8,当然根据文献[13],不同的调制阶数对能效是有影响的,当 r_{sd} 较小时,调制阶数越高,能效越高。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。

考虑一种特殊情况,中继节点放置在传输节点附近,如图 1 所示($\theta = \pi/6$)。所有链路为瑞利衰落,并且在源与中继节点每比特传输能量相等,即 $\delta = 0.5$,不考虑电路消耗时得到仿真如图 3 所示。

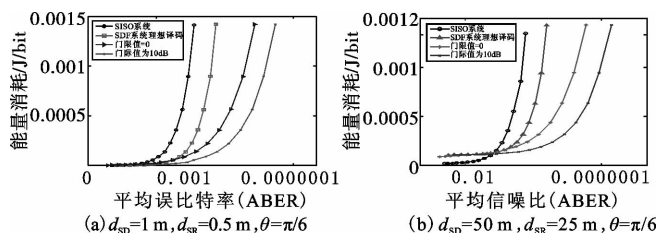


图3 直传 (SISO) 与 SDF 系统能量消耗比较

从图 3(a) 看,没有电路消耗时,对于同一个 ABER 值 SDF 系统比 SISO 系统功率放大器要低 10^{-2} ,在 ABER 大于 0.1 时, SISO 与 SDF 系统性能几乎相同。图 3(b) 中源和目的节点增加到 50 m,可以清楚看到:在较低 ABER 值时 SDF 系统功率放大器消耗能量要好于 SISO 系统。在较高 ABER 值时, SISO 的能量效率要好于 SDF 系统。对 SDF 系统来说,当 SNR 门限值为 10 dB 能量效率要好于门限值为 0 dB 情况,因为此时中继转发将停止,属于完全译码情况^[14]。

3.2 MIMO 系统能耗分析

图 4 显示的是传输距离 30 m 的几种协作 MIMO 系统比特能耗与接收节点数目的关系图。可以看出,对于每一个固定发射节点数目 N_T ,系统随着接收节点的增加,比特能耗逐渐变小,但当 N_R 增大到一定时,系统达到节能极限,然后能耗又逐渐变大。这表明,当发射节点数目固定时,协作接收节点并不是越多越好,而是存在一个最佳的协作模式。

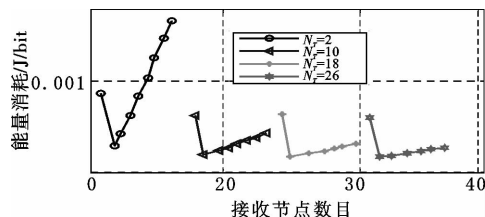


图4 节点数目对能耗影响

图 5 是协作 MIMO 系统随传输距离变化的能耗图。可以看出,短距离时协作 MIMO 系统比传统 SISO 系统的比特能耗高,此时选用 SISO 系统更好。大于临界距离时,协作 MIMO 系统才能节省能量。这是因为传感器网络通信过程中,为达到相同误码率,功率放大器的发射功率随着传输距离的增加而逐步加大,而电路功率却是相对固定的。当天线数目增加到一定程度时,系统能耗逐渐降低,如 50×50 MIMO 系统能耗几乎不变。

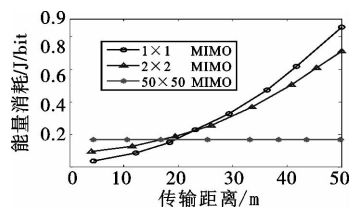


图5 MIMO 系统能耗与距离关系

3.3 中继节点位置对误码性能分析

首先来考察中继节点位置对误码率的影响。以图 2 为模型,信源、中继及目标节点间距离分别表示为: $d_{s,d}$ 、 $d_{s,r}$ 和 $d_{r,d}$,模拟了不同的距离比的误码性能。从图 2 可以看出,以三者距离比 1:1:1 为界限,当中继传输路径大于直接传输路径距离时系统性能变差,当中继传输路径小于直接传输路径距离时系统性能变好,当中继节点的位置渐渐接近 S 和 D 之间,性能不断改善,当中继节点位置位于 (S→D) 之间,并且两条中继传输路径距离相同的情况下,其性能表现是最好的。对于功率受限网络,则能以较少的能量损耗完成相同性能。

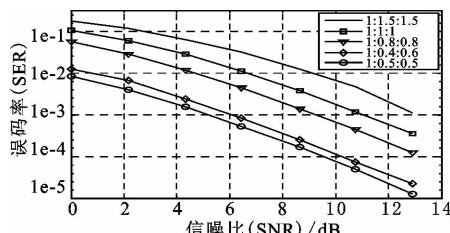


图6 中继节点位置对误码率的影响

4 结束语

本文提出了统一的协作分集系统模型,分析了选择译码转发和 MIMO 协作工作模式及影响能耗的因素。即多节点协作分集系统能耗不仅与发射接收节点数目有关,并与传输距离有关,当使用 SDF 方案时中继节点不理想译码也是影响能耗的关键因素。当然以上的研究没有考虑电路上的消耗,此问题较为复杂,是后续研究工作之一。

参考文献:

- [1] LANEMAN J N, TSE D N C, WORNELL G W. Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior [J]. IEEE Trans on Inform Theory, 2004, 50(12): 3062-3080.
- [2] SENDONARIS A, ERKIP E, AAZHANG B. User cooperative diversity-part I: system description [J]. IEEE Trans on Communications, 2003, 51(11): 1927-1938.
- [3] JESaS G V, ANAL P N, MONTSE N. Energy efficient communications over the AWGN relay channel [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2010, 9(1): 32-37.
- [4] MADAN R, MEHTA N B, MOLISCH A F, et al. Energy-efficient cooperative relaying over fading channels with simple relay selection [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2008, 7(8): 3013-3025.
- [5] YAO Ying-wei, CAI Xiao-dong, GIANNAKIS G B. On energy efficiency and optimum resource allocation in wireless relay transmissions [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2005, 4(6): 2917-2927.
- [6] SU Wei-feng, IBRAHIM A S, SADEK A K. Cooperative communications with relay selection: when to cooperate and whom to cooperate with? [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2008, 7(7): 2814-2827.

(上接第 2631 页)

- [7] AGGELOS B, HYUNDONG S, MOE Z W. Outage optimality of opportunistic amplify-and-forward relaying [J]. **IEEE Communication Letters**, 2007, 11(3): 261-263.
- [8] SOMASUNDARA A, KANSAL A, JEA D. Controllably mobile infrastructure for low energy embedded networks [J]. **IEEE Trans on Mobile Computing**, 2006, 5(8): 958-972.
- [9] MADSENAND A H, ZHANG J. Capacity bounds and power allocation for wireless relay channel [J]. **IEEE Trans on Inform Theory**, 2005, 51(6): 2020-2040.
- [10] CUI S, GOLDSMITH A J, BAHAI A. Energy-efficiency of MIMO and cooperative MIMO techniques in sensor networks [J]. **IEEE J**

Select Areas Commun, 2004, 22(6): 1089-1098.

- [11] JAYAWEERA S K. Virtual MIMO-based cooperative communications for energy constrained wireless sensor networks [J]. **IEEE Trans on Wireless Communications**, 2006, 5(5): 984-989.
- [12] TANG Jian, HAO Bin, SEN A. Relay node placement in large scale wireless sensor networks [J]. **Computer Communications, Elsevier Science**, 2006, 29(4): 490-501.
- [13] 王绍青, 聂景楠. 无线传感器网络中增加协作传输及其能量效率研究 [J]. **电子与信息学报**, 2010, 32(3): 759-762.
- [14] PALAT R C, ANNAMALAI A, REED J H. Energy efficiency in selective decode and forward cooperative communication [C] // **Proc of IEEE Sarnoff Symposium on Conference**. Piscataway, NJ: **IEEE Computer Society**, 2010: 450-456.