译码转发系统中一种半分布式用户选择策略

孙黎，张太镒
（西安交通大学电子与信息工程学院，710049，西安）

摘要：针对译码转发系统中传统的用户选择策略复杂度过高的问题，提出一种半分布式用户选择策略(SDUS策略).该策略以最大化系统瞬时互信息量为目标，引入中继选择的判决门限，并根据此门限生成协作集，目的节点从协作集及源节点(当协作集为空集时)中选择信道质量最好的用户作为协作节点.SDUS策略不仅能够显著降低系统的运算复杂度，还能够改善系统的中断性能.仿真实验表明，当信噪比为20 dB且系统中的中继节点数为120时，SDUS策略的运算开销仅约为机会中继策略和选择协作策略的39.5%和51.1%.

关键词：协作分集；用户选择；中断性能；运算复杂度
中图分类号：TN929.5 **文献标志码**：A **文章编号**：0253-987X(2009)12-0115-05

Semi-Distributed User Selection Scheme in Decode-and-Forward Systems

SUN Li, ZHANG Taiyi
(School of Electronics and Information Engineering, Xi′an Jiaotong University, Xi′an 710049, China)

Abstract: A semi-distributed user selection scheme (SDUS scheme) is proposed to reduce the high complexity in conventional user selection schemes in decode-and-forward (DF) systems. A decision threshold for relay selection is introduced to maximize the instantaneous mutual information of the system. Based on the threshold, the cooperative set is generated. The destination node selects the node with the best channel quality from the cooperative set and the source (when the cooperative set is null) as the cooperative node. The SDUS scheme not only reduces the computational complexity of the system significantly, but also improves the outage performance. Simulation results show that, when the signal-to-noise ratio is 20 dB and the number of relay nodes is 120, the computational cost of the SDUS scheme is just about 39.5% and 51.1% of those of the opportunistic relaying scheme and the selection cooperation scheme, respectively.

Keywords: cooperative diversity; user selection; outage performance; computational complexity

在无线网络中，多个节点之间可以通过协作形成虚拟多天线阵列，从而获得空间分集增益，这种技术被称为协作分集[1-2]. Laneman 等人[3]给出了能够实现协作分集的分布式空时编码方法，但在这种方案中，所有潜在中继都参与协作传输，不仅不能合理地利用系统资源，而且还存在很多实现上的困难.机会中继[4]与选择协作[5]能够有效地解决上述问题.这2种策略能够从众多的潜在中继节点中仅选择一个节点参与协作，从而极大地降低了实现的复杂度.它们的区别在于，对于机会中继策略，被选中完成转发任务的是具有最佳端至端瞬时信噪比的节点，其中端至端信噪比用源-中继信噪比和中继-目的端信噪比的最小值描述[6]，而选择协作策略则是从能够成功解码源节点信息的中继节点中选择中继-目的端瞬时信噪比最好的用户完成转发.

虽然以上2种策略实现相对简单且具有较好的性能，但它们都没有考虑中继转发是否总能带来性能增益，从而不利于系统性能的优化.针对上述问

收稿日期：2009-03-07. 作者简介：孙黎(1983—)，男，博士生；张太镒(联系人)，男，教授，博士生导师. 基金项目：国家自然科学基金重点项目(40730424).

题,本文提出了译码转发协作系统中一种新的用户选择策略(SDUS策略),以最大化系统瞬时互信息量为目标,从而降低了系统的中断概率. SDUS策略采用半分布式机制,即各中继节点首先独立地决定其是否具有协作资格,之后目的节点再从具有协作资格的节点中选取最优节点. 这种方法避免了分布式中继选择中"包冲突"的问题[6],同时由于一部分计算量由各中继节点分担,因此在很大程度上解决了集中式机制下中央控制单元(目的节点)运算量过大的问题.

1 系统模型与用户选择策略

假设系统由1个源节点 s、1个目的节点 d 以及 M 个中继节点 $r_i(i=1,\cdots,M)$ 构成,各节点以半双工方式工作,s 和 d 之间存在直接路径并可通过中继节点进行通信. 所有节点之间的信道为相互独立的瑞利平坦慢衰落信道,且在一帧内保持不变. s 和 d、s 和 r_i 及 r_i 和 d 之间的信道系数分别表示为 h_{sd}、h_{si} 和 h_{id},其平均功率增益分别为 $E[|h_{sd}|^2]=1/\lambda_{sd}$、$E[|h_{si}|^2]=1/\lambda_{si}$、$E[|h_{id}|^2]=1/\lambda_{id}(i=1,\cdots,M)$. 各节点处的噪声相互独立,均为0均值加性高斯白噪声,方差为 σ^2. 假设各节点的发射功率均为 P,记平均信噪比为 R_{SN},则有 $R_{SN}=P/\sigma^2$. 设数据流的目标速率为 R.

每帧的传输分为2个阶段,第1阶段 s 向 d 发送信息,由于无线传输的广播特性,各中继节点 $r_i(i=1,\cdots,M)$ 也将接收到 s 发送的信息并在该阶段结束时试图译码,所有能够正确译码的中继节点构成译码集 S_D. 对任一中继节点 $k\in S_D$,当它作为协作节点时,它将采用译码转发协议[7]完成第2阶段的传输,此时系统的瞬时互信息为

$$I=\frac{1}{2}\mathrm{lb}(1+R_{SN}|h_{sd}|^2+R_{SN}|h_{kd}|^2) \quad (1)$$

如果第2阶段的传输不由中继节点完成,而是由 s 重传,则系统的瞬时互信息为

$$I=\frac{1}{2}\mathrm{lb}(1+2R_{SN}|h_{sd}|^2) \quad (2)$$

显然,当且仅当用户 k 协作能够提供容量增益时,用户 k 才需要被进一步考虑,即

$$|h_{kd}|^2>|h_{sd}|^2 \quad (3)$$

本文给出的SDUS策略是:译码集 S_D 中的各中继节点 k 将自身的 $|h_{kd}|^2$ 与 $|h_{sd}|^2$ 进行对比(不属于译码集的节点不进行任何操作),所有满足式(3)且属于 S_D 的中继节点 k 向目的节点告知自己具有协作资格,记这些节点构成的集合为协作集 S_C. 最后,目的节点选择满足如下关系的节点 b 作为完成转发任务的协作节点

$$b=\begin{cases}\arg\max\limits_{k\in S_C}\{|h_{kd}|^2\} & S_C\neq\varnothing\\ s & S_C=\varnothing\end{cases} \quad (4)$$

第2阶段,被选中的节点转发或重传 s 的信息,d 对2次接收到的信号进行合并,判决出原始信息.

在上述策略中,需要各中继节点知道瞬时信道增益 $|h_{kd}|^2$ 和 $|h_{sd}|^2$,这些信息可以通过每帧传输前的握手过程(RTS/CTS)实现,具体过程与文献[6]中的相关描述类似.

2 性能分析

2.1 中断概率

从数学分析的角度讲,式(4)给出的用户选择策略等价于

$$b=\arg\max_{k\in S_D\cup\{s\}}|h_{kd}|^2 \quad (5)$$

用 $p_r(\cdot)$ 表示括号内的事件发生的概率,O 表示中断事件,$|A|$ 表示集合 A 中元素的个数,系统的中断概率可表示为

$$p_r(O)=\sum_{m=0}^{M}p_r(|S_D|=m)p_r(O||S_D|=m) \quad (6)$$

对任一中继节点 k,均有

$$p_r(k\in S_D)=p_r\left(\frac{1}{2}\mathrm{lb}(1+R_{SN}|h_{sk}|^2)>R\right)=\exp(-\lambda_{sr}u) \quad (7)$$

式中:$u=(2^{2R}-1)/R_{SN}$. 根据式(7)可知,译码集中恰好有 m 个中继节点的概率为

$$p_r(|S_D|=m)=\binom{M}{m}(\exp(-\lambda_{sr}u))^m(1-\exp(-\lambda_{sr}u))^{M-m} \quad (8)$$

式中:$\binom{M}{m}=\frac{M!}{m!(M-m)!}$. 对于给定的 S_D,假设 $|S_D|=m$,则有

$$p_r(O|S_D)=p_r(A)p_r(O|A)+p_r(B)p_r(O|B) \quad (9)$$

式中:事件 A 表示被选中作为协作节点的是源节点 s,B 表示被选中作为协作节点的不是源节点 s. 记节点 $k^*=\arg\max\limits_{k\in S_D}|h_{kd}|^2$,$X=|h_{sd}|^2$,$Y=|h_{k^*d}|^2$,$f_X(f_Y)$ 和 $F_X(F_Y)$ 分别表示随机变量 $X(Y)$ 的概率密度函数和概率分布函数,则式(9)中的第1部分可简化为

$$p_r(A)p_r(O\mid A)=p_r(O,A)=p_r\Big(X>Y,\ \frac{1}{2}\mathrm{lb}(1+2R_{SN}X)<R\Big)=$$
$$p_r\Big(Y<X<\frac{u}{2}\Big)=\int_0^{u/2}\Big[\int_0^x f_Y(y)\mathrm{d}y\Big]f_X(x)\mathrm{d}x=$$
$$\int_0^{u/2}F_Y(x)f_X(x)\mathrm{d}x=$$
$$\int_0^{u/2}\lambda_{sd}\exp(-\lambda_{sd}x)(1-\exp(-\lambda_{rd}x))^m\mathrm{d}x=$$
$$\sum_{k=0}^{m}\binom{m}{k}(-1)^k\lambda_{sd}(1-\exp(-(\lambda_{sd}+k\lambda_{rd})u/2))/(\lambda_{sd}+k\lambda_{rd}) \tag{10}$$

类似地，可以求得

$$p_r(B)p_r(O\mid B)=\sum_{k=0}^{m}\binom{m}{k}(-1)^k\cdot$$
$$[\lambda_{sd}\exp(-\lambda_{rd}ku)(1-\exp(-(\lambda_{sd}-k\lambda_{rd})u/2))/(\lambda_{sd}-k\lambda_{rd})-\lambda_{sd}(1-\exp(-(\lambda_{sd}+k\lambda_{rd})u/2))/(\lambda_{sd}+k\lambda_{rd})] \tag{11}$$

结合式(6)、式(8)～式(11)并进行整理后可得到系统的中断概率为

$$p_r(O)=\sum_{m=0}^{M}\sum_{k=0}^{m}\binom{M}{m}\binom{m}{k}(-1)^k\lambda_{sd}\exp(-(m\lambda_{sr}+k\lambda_{rd})u)(1-\exp(-\lambda_{sr}u))^{M-m}(1-\exp(-(\lambda_{sd}-k\lambda_{rd})u/2))/(\lambda_{sd}-k\lambda_{rd}) \tag{12}$$

2.2　分集复用折中

本文采用与文献[8]相同的复用增益 r 与分集增益 $d(r)$ 的定义. 下面的定理给出了本文的 SDUS 策略的分集复用折中(DMT)性能.

定理　SDUS 策略与机会中继策略和选择协作策略的 DMT 相同，均为 $(M+1)(1-2r)^+$，其中 $(\cdot)^+$ 表示实数的取非负运算，当变量小于 0 时取 0.

证明　定义速率 $R=r\mathrm{lb}R_{SN}$，没有任何中继节点能够正确译码的事件记为 $\bar{\varepsilon}$，有中继节点能够正确译码的事件记为 ε，系统的中断概率可以表示为

$$p_e=p_r(\bar{\varepsilon})p_r\Big(\frac{1}{2}\mathrm{lb}(1+2R_{SN}\mid h_{sd}\mid^2)<r\mathrm{lb}R_{SN}\mid\bar{\varepsilon}\Big)+p_r(\varepsilon)p_r\Big(\frac{1}{2}\mathrm{lb}(1+R_{SN}(\mid h_{sd}\mid^2+\mid h_{bd}\mid^2))<r\mathrm{lb}R_{SN}\mid\varepsilon\Big)\leqslant p_r(\max_{i=1,\cdots,M}\mid h_{si}\mid^2<R_{SN}^{2r-1})p_r\Big(\mid h_{sd}\mid^2<\frac{1}{2}R_{SN}^{2r-1}\Big)+$$
$$p_r\Big(\frac{1}{2}\mathrm{lb}(1+R_{SN}(\mid h_{sd}\mid^2+\mid h_{k^*d}\mid^2))<r\mathrm{lb}R_{SN}\Big)\leqslant p_r(\max_{i=1,\cdots,M}\mid h_{si}\mid^2<R_{SN}^{2r-1})\cdot$$
$$p_r\Big(\mid h_{sd}\mid^2<\frac{1}{2}R_{SN}^{2r-1}\Big)+$$
$$p_r(\mid h_{sd}\mid^2<R_{SN}^{2r-1})p_r(\mid h_{k^*d}\mid^2<R_{SN}^{2r-1})\dot{\leqslant}$$
$$R_{SN}^{-M(1-2r)^+}R_{SN}^{-(1-2r)^+}+R_{SN}^{-(1-2r)^+}R_{SN}^{-M(1-2r)^+}\doteq R_{SN}^{-(M+1)(1-2r)^+} \tag{13}$$

式中：符号 $\doteq$ 表示指数相等；$\dot{\leqslant}$ 表示指数小于等于[6]. 式(13)表明，对于 SDUS 策略，其分集复用折中为 $(M+1)(1-2r)^+$. 按照类似的步骤，可以求得选择协作策略的 DMT 也为该值. 对于机会中继策略，其 DMT 也等于 $(M+1)(1-2r)^+$[6]，故 3 种策略分集复用折中性能相同. 证毕.

2.3　计算复杂度

本节对比机会中继策略、选择协作策略与本文 SDUS 策略在实现复杂度方面的差异. 假设前 2 种策略的用户选择均采用集中式方案，则对于这 3 种策略，系统用于用户选择的运算量主要由 3 部分构成：①中继节点为获得信道信息所需完成的信道估计运算；②中继节点进行的比较运算(对于机会中继策略，每个中继节点都需要通过比较得出其源-中继信道增益和中继-目的端信道增益的较大者；对于选择协作策略，中继节点不需进行比较操作；对于本文所提的策略，每个可以成功译码的节点都要进行式(3)所给出的比较)；③目的节点为了选出最优节点而进行的比较运算. 记一次信道估计相当于 T 次比较的运算量，根据文献[4-5]及本文第 1 部分的叙述，3 种策略下平均每个中继节点及目的节点需要完成的运算量见表 1.

表 1　3 种策略下平均每个中继节点及目的节点所需完成的运算量对比

策略	运算复杂度	
	平均每中继节点的运算量	目的节点的运算量
机会中继	$T+1$	$M-1$
选择协作	T	$\lvert S_D\rvert-1$
本文 SDUS	$T+\lvert S_D\rvert/M$	$\lvert S_C\rvert-1$

在实际中，$T\gg1$，$\lvert S_D\rvert/M\leqslant1$，所以 3 种策略下系统中平均每中继节点的运算量基本相当. 因此，它们在运算复杂度方面的区别主要体现在目的节点的运算量上. 表 1 表明，本文给出的策略具有最低的运算复杂度，特别是在潜在中继节点较多时，该策略能有效地减轻目的节点的计算负担. 在下一节将通过

仿真实验具体说明这一点.

3 仿真结果与讨论

本节通过计算机仿真验证前面的理论分析. 系统中的中继节点数 $M=6$,数据流的目标速率 $R=1$ b/(s·Hz),本文策略与机会中继和选择协作策略的中断概率曲线对比如图 1 所示. 不失一般性,在该实验中,信道参数 λ_{sd}、λ_{sr}、λ_{rd} 在区间(8,10)上随机生成,并对多次实验结果取平均. 从图 1 可以看出,本文策略具有最优的中断性能. 例如,在中断概率为 10^{-3} 时,本文策略与机会中继策略相比,可提供 0.6 dB 的信噪比增益,与选择协作策略相比,可提供 0.27 dB 的信噪比增益. 对于更高的中断概率,本文策略的优势更为明显. 图 1 还表明,对于本文的策略,仿真值均在理论曲线附近,从而验证了理论分析的正确性.

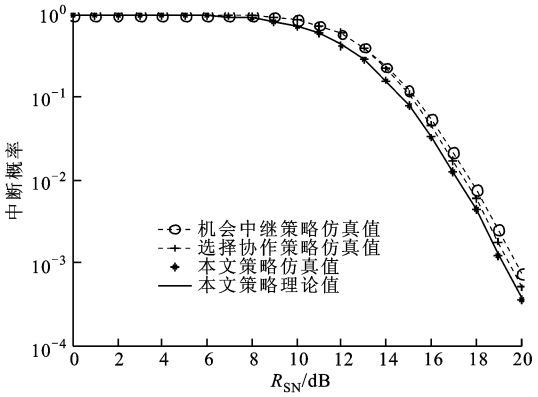

图 1 3 种策略的中断概率曲线对比

对于更为一般的仿真条件,仍然假设 $M=6$,$R=1$ b/(s·Hz),网络中的各个节点分布在一个 3×3 的直角坐标系中. 不失一般性,令源节点位于(0,0),目的节点位于(3,3),6 个中继节点的坐标随机生成. 任意 2 个节点 i、j 之间信道系数的功率均值由它们之间的距离 d_{ij} 决定($i\in\{s,1,\cdots,M\}$,$j\in\{d,1,\cdots,M\}$),即 $1/\lambda_{ij}=d_{ij}^{-\eta}$,其中 $\eta=2$ 是路径损耗指数. 对多种节点分布下的实验结果取平均,3 种策略的中断概率对比仿真结果如图 2 所示. 从图 2 可以看出,对于各节点间信道独立但不同分布的情况,本文策略的中断性能仍优于其他 2 种策略.

在计算复杂度方面,结合 2.3 节的讨论,这里以目的节点所需完成的比较次数作为衡量复杂度的标准. 平均信噪比为 20 dB,其余仿真条件与图 1 所示实验一致. 图 3 给出了 3 种策略的计算复杂度对比. 可以看出,采用本文策略后,目的节点的计算复杂度

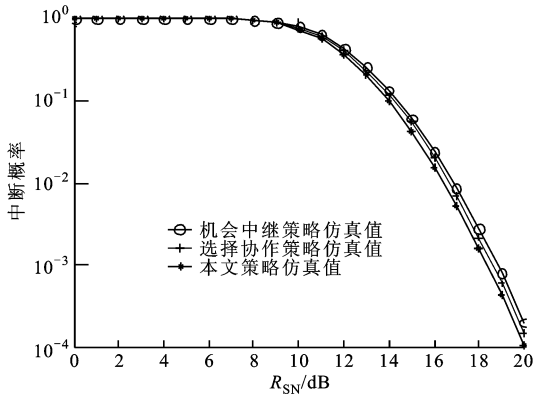

图 2 各节点间信道独立不同分布时 3 种策略中断概率对比

大为降低. 例如,在 $M=120$ 时,机会中继策略需要在目的节点完成 119 次比较,选择协作策略的比较次数平均为 92 次,而本文提出的策略平均仅需 47 次,为前 2 种的 39.5%和 51.1%.

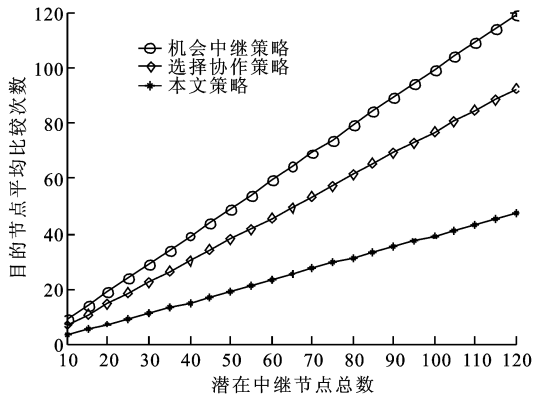

图 3 3 种策略计算复杂度对比

4 结 论

本文提出了一种针对译码转发协作系统的用户选择策略,推导了系统中断概率的闭式表达式,分析了该策略的分集复用折中性能并讨论了其计算复杂度. 理论研究和仿真实验都表明,与传统的机会中继策略和选择协作策略相比,本文所提策略具有更好的中断性能和更小的系统开销.

参考文献:

[1] SENDONARIS A, ERKIP E, AAZHANG B. User cooperation diversity: part Ⅰ system description [J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51(11):1927-1938.

[2] 殷勤业,张莹,丁乐,等. 协作分集:一种新的空域分集技术[J]. 西安交通大学学报,2005,39(6): 551-557.

YIN Qinye, ZHANG Ying, DING Le, et al. Cooperation diversity: a new spatial diversity technique [J]. Journal of Xi′an Jiaotong University, 2005, 39(6): 551-557.

[3] LANEMAN J N, WORNELL G W. Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(10): 2415-2425.

[4] BLETSAS A, SHIN H, WIN M Z. Cooperative communications with outage-optimal opportunistic relaying [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(9): 3450-3460.

[5] BERES E, ADVE R. Selection cooperation in multi-source cooperative networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(1): 118-127.

[6] BLETSAS A, KHISTI A, REED D P, et al. A simple cooperative diversity method based on network path selection [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(3): 659-672.

[7] LANEMAN J N, TSE D N C, WORNELL G W. Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(12): 3062-3080.

[8] ZHENG Lizhong, TSE D. Diversity and multiplexing: a fundamental tradeoff in multiple antenna channels [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(5): 1073-1096.

（编辑　刘杨）