

基于自适应量化信道信息的机会中继选择研究^{*}

李 雁, 唐 伦, 陈前斌

(重庆邮电大学 移动通信技术重点实验室, 重庆 400065)

摘要: 针对协同蜂窝网中基于发送量化信道状态信息的中继选择方案下, 目的节点需要不停地获取所有中继处第一跳的信道信息而引起的系统开销问题, 提出了一种基于自适应量化信道状态信息的机会中继选择方案。新方案下, 仅在第一跳的瞬时信道条件高于预先设置的门限值时, 各候选中继发送量化后的信道信息比特。仿真结果表明, 改进方案在对系统性能影响不大的同时可以获得较高的比特利用率。同时, 随着候选中继数从 3 增加至 5 时, 中继点处设置的发送门限值可相应从 0.267 1 提升至 0.575 6, 这表明新方案具有较好的鲁棒性。

关键词: 协同分集; 虚拟天线阵列; 量化信道状态信息; 机会中继选择; 比特利用率

中图分类号: TP393.03 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2010)02-0646-03

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2010.02.067

Opportunistic relay selection scheme based on adaptively quantized channel state information

LI Yan, TANG Lun, CHEN Qian-bin

(Key Laboratory of Mobile Communication Technology, Chongqing University of Posts & Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: In order to deal with the system overhead problem induced by transmit quantized bits of the first hop channel state information for destination to obtain global channel state information, this paper proposed the relay selection scheme based on adaptively transmitting the quantization bits of instantaneous channel state information. In the improved scheme, the candidate relayed transmit the quantized bits of the first hop channel state information only when the instantaneous channel condition was better than the threshold which was set in advance. Simulation result shows that the new scheme can improve the bit utilize efficiency and at the same time has little influence on the bit error rate of the system. Moreover, as the number of candidate relays increases from three to five, the appropriate threshold ranges from 0.267 1 to 0.575 6, this result shows that the improved scheme has robustness performance.

Key words: cooperative diversity; virtual antenna arrays; quantization of channel state information; opportunistic relay selection; bit utilize efficiency

0 引言

协同分集是一种通过共享不同用户的天线实现空间分集的新的分集技术, 它可以有效对抗多径衰落, 提高信道容量。依据所依据的信道信息类型, 协同分集中的中继选择策略大致可分为两类, 即基于平均信道状态信息(如距离、路径损耗、平均信噪比)的中继选择策略和基于瞬时信道状态信息的中继选择策略。前者通常借助于 GPS 系统实现, 较适用于静态网络或低速移动网络, 后者则较适用于动态网络。

机会中继^[1]是一种基于瞬时信道状态信息的中继选择方案, 该方案下在每一个数据块的传输过程中, 仅选择瞬时无线信道最佳的中继参与协同。由于它可获得与复杂的空时编码协同分集协议相同的分集复用增益而得到广泛研究。文献[2]从最小化协同分集系统误符号率的角度出发, 给出修改了的调和平均中继选择准则, 但这种准则的实际实现将大大增加中继选择的计算复杂度。文献[3]从信号的相干接收角度, 分别推导了放大前传(AF)和译码前传(DF)两种模式下的最优

中继选择准则, 但此最优准则的实际实现也将增加中继节点处的信道估计次数。

依据中继选择的实现方式, 协同分集中的中继选择可分为集中式与分布式中继选择策略。文献[4, 5]对蜂窝网中的机会中继进行了研究。文献[5]中所提出的中继选择方案通过分布式定时器的设置, 机会地选出最佳中继, 这种方法仅利用了各潜在中继至基站的信道信息, 并不是最优的中继选择方案。将分布式的基于定时器的机会中继选择方案应用于协同蜂窝网主要存在以下几个问题:

a) 在 RTS 和 CTS 分组传输过程中, 所有可选中继节点必须保持在监听模式, 这将导致中继节点处巨大的功率损耗。

b) 随着潜在的参与竞争的中继个数(空闲用户数)的增多, 中继选择的碰撞概率也随之增加。

c) 此方案需在各个用户处设置定时器, 这将增加中继节点的处理复杂度, 且分布式的控制方式不利于对在每次传输过程中对参与竞争的中继节点数进行控制。

文献[6]对集中控制实体处的信道状态信息为不同类型

收稿日期: 2009-06-22; **修回日期:** 2009-07-28 **基金项目:** 国际科技合作计划资助项目(2008DFA12110); 新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-06-0778); 重庆市自然科学基金资助项目(CSTC, 2007BB2390, 2008BB2413)

作者简介: 李雁(1985-), 女, 湖北荆州人, 硕士研究生, 主要研究方向为协同通信(woshilyan1985@sina.com); 唐伦(1973-), 男, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为泛在网络和异构无线网络; 陈前斌(1967-), 男, 博导, 博士, 主要研究方向为下一代网络、个人通信、多媒体信息处理与传输。

的情况进行了理论分析并指出,即使在仅已知两跳中一跳的部分或量化信道状态信息和另一跳的完整信道状态信息的情况下,仍然可以获得与完全已知两跳信道状态信息相当的性能。

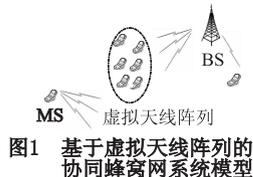
文献[7~9]均对基于发送量化信道信息的中继选择方案进行了研究。其中文献[7]中各候选中继发送的量化信息为第一跳的瑞丽衰落幅度的量化比特;文献[8]中中继发送的量化信息为第一跳的信道增益和相位信息的量化比特;文献[9]中中继发送的量化信息为第一跳的有效信道增益的量化比特。研究表明,文献[9]中在各中继发送量化比特数为 4 时,就可以获得比较理想的系统性能。因此,本文在文献[9]的基础上研究协同蜂窝网中基于发送量化信道状态信息的中继选择方案。针对其引起的系统开销问题,提出一种基于自适应发送量化信道状态信息的中继选择方案。其中自适应是指在各候选中继处设置发送量化比特的门限值,若高于高门限值,则量化并发送量化后的比特信息,若低于该门限值,则不对估计到的第一跳信道信息量化。仿真结果表明,在门限值设置合适的情况下,新方案在对系统误比特率影响不大的同时,可提高系统比特利用率。

1 系统模型

笔者考虑蜂窝网中的上行链路,如图 1 所示,源节点 MS 通过潜在可选中继 $r_i, i \in [1, M]$ 组成的虚拟天线阵列与目的节点 D(基站 BS)进行通信。

假设衰落环境为频率平坦衰落,信道增益 h_{sr_i}, h_{sd}, h_{rd} 为零均值,方差分别为 $\sigma_{si}^2, \sigma_{sd}^2, \sigma_{rd}^2$ 的独立圆对称复高斯随机变量,则其幅度 $|h_{sr_i}|, |h_{sd}|, |h_{rd}|$ 服从瑞利分布,且 $|h_{sr_i}|^2, |h_{sd}|^2, |h_{rd}|^2$ 服从参数为 $1/\sigma_{si}^2, 1/\sigma_{sd}^2, 1/\sigma_{rd}^2$ 的指数分布。

基于机会中继选择的协同传输协议具体过程如图 2 所示。



| | |
|-------------|-----------------------------------|
| time slot 1 | $S \xrightarrow{s_1} R_1, D$ |
| time slot 2 | $S \xrightarrow{s_2} R_1, D$ |
| time slot 3 | $R_1 \xrightarrow{s_{1,R1}} D$ |
| time slot 4 | $R_1 \xrightarrow{-s_{2,R1}^*} D$ |

图 2 基于机会中继选择的传输协议

其中 R_1 为传输某个数据分组时的被选最佳机会中继。

第一和第二时隙为广播阶段,源节点分别发送 s_1 和 s_2 。在第一和第二时隙中继 R_1 和 BS 接收到的信号为

$$\begin{aligned} r_{R1,1} &= h_{sr1,1}s_1 + \eta_{sr1,1} & r_{R1,2} &= h_{sr1,2}s_2 + \eta_{sr1,2} \\ r_{D,1} &= h_{sd,1}s_1 + \eta_{sd,1} & r_{D,2} &= h_{sd,2}s_2 + \eta_{sd,2} \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $r_{ri,j}$ 是被选择的第 i 个中继在第 j 信号间隔接收到的信号, $h_{sr_i,j}$ 是第 j 信号间隔源与被选第 i 个中继间的平坦衰落信道系数, $h_{sd,i}$ 是源与目的节点间的平坦衰落信道系数, $\eta_{sr_i,j}$ 是第 j 信号间隔第 i 个被选中继处的噪声, $\eta_{sd,j}$ 是第 j 信号间隔目的节点处接收信号的噪声。假设信道模型为准静态,即在一帧内是不变的,而帧与帧之间的变化相互独立,则有 $h_{sr_i,1} = h_{sr_i,2}$, $h_{sd,1} = h_{sd,2} = h_{sd,3} = h_{sd,4} = h_{sd}$ 。

被选中继 R_1 分别对符号 s_1 和 s_2 进行译码,检测到的符号为

$$\begin{aligned} \hat{s}_{1,R1} &= h_{sr1,1}^* r_{R1,1} = |h_{sr1,1}|^2 s_1 + h_{sr1,1}^* \eta_{sr1,1} \\ \hat{s}_{2,R1} &= h_{sr1,2}^* r_{R1,2} = |h_{sr1,2}|^2 s_2 + h_{sr1,2}^* \eta_{sr1,2} \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $\hat{s}_{j,Rk}$ 是第 k 个被选中继检测到的第 j 个符号。

第三和第四时隙为协同阶段,被选中继 R_1 发送空时分组码对,其传输矩阵为

$$C_1 = \begin{bmatrix} \hat{s}_{1,R1} \\ -\hat{s}_{2,R1}^* \end{bmatrix} \quad (3)$$

在协同阶段,目的端接收到的信号为

$$\begin{aligned} r_{D,3} &= h_{rd,3} \hat{s}_{1,R1} + \eta_{d,3} \\ r_{D,4} &= h_{rd,4} \hat{s}_{2,R1} + \eta_{d,4} \end{aligned} \quad (4)$$

由于信道的准静态衰落特性, $h_{rd,3} = h_{rd,4} = h_{rd}$, 最后,目的端通过线性处理对 s_1 和 s_2 进行估计得到

$$\begin{aligned} s_{1,D} &= |h_{sd}|^2 s_1 + |h_{rd}|^2 \hat{s}_{1,R1} + \eta_1 \\ s_{2,D} &= |h_{sd}|^2 s_2 + |h_{rd}|^2 \hat{s}_{2,R1} + \eta_2 \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $\eta_1 = h_{rd}^* \eta_{d,3} + h_{sd}^* \eta_{sd,1}$, $\eta_2 = h_{rd}^* \eta_{d,4} + h_{sd}^* \eta_{sd,2}$ 。

2 基于自适应量化信道信息的机会中继选择方案

在协同蜂窝网中,由于协同中继节点的信道时刻不停地变化,这个时刻某个节点是最佳协同中继节点,下个时刻就未必是。目的节点需要不停地获得所有中继节点的信道信息,从而引起系统的开销比较大。理论上,传输模拟信道状态信息需发送无限位数比特。但在实际实现中,仅需使用一个带有限位比特的控制信道。文献[8]中,每个中继需发送 8 bit(包含信道增益和相位信息)。

本文研究中继发送量化的有效信道增益 $|h_{sr}|^2$ 的情况,并提出基于设置门限的自适应量化中继选择方案。所提出的基于自适应量化信道状态信息的中继选择过程如下:

首先,在协同系统建立时,通过控制信令的交互,为某个特定 MS 服务的候选中继簇已由半静态配置方式选定。

候选中继依据源发送的信道探测参考信号,对源自自身的信道进行估计,并将估计到的信道状态信息 $|h_{sr}|^2$ 与给定的发送门限进行比较,只有当估计的 $|h_{sr}|^2$ 高于设定的门限时,才允许中继对 $|h_{sr}|^2$ 进行量化并发送量化后的 CSI 信息比特,低于该阈值则不发送。图 3 为设置发送门限值为 T_1 时的示意图。

采用 N 位比特量化时,对应的量化级别为 $T = \{T_1, \dots, T_{\max-1}\}$ 。其中 $\max = 2^N$ 。设随机变量 $|h_{sr}|^2$ (瑞利衰落的幅度的平方)的概率密度函数为 $p(x)$, $Q = \{Q_1, \dots, Q_{\max}\}$ 分别是发送不同比特信息时,目的端默认的量化值,则它们满足以下条件:

$$\begin{cases} \int_0^{T_1} p(x) dx = \int_{T_1}^{T_2} p(x) dx = \dots = \int_{T_{\max-1}}^{\infty} p(x) dx = \frac{1}{2^N} \\ \int_0^{Q_1} p(x) dx = \int_{Q_1}^{Q_2} p(x) dx = \dots = \int_{Q_{\max-1}}^{\infty} p(x) dx = \frac{1}{2^{N+1}} \end{cases} \quad (6)$$

目的端(基站)可获得完整的中继至目的信道信息 $|h_{rd}|^2$ 。最后基站依据接收到的各中继发送的量化比特以及各中继自身的信道状态信息,利用中继选择准则选出最佳机会中继,并将决定用比特数反馈给各被选中继。

这里采用的中继选择准则为

$$\max_i \{ \min(|h_{sr_i}|^2, |h_{rd}|^2) \} \quad (7)$$

3 性能仿真与分析

各候选中继对源至中继的信道信息采用不同位数的比特进行非均匀量化的具体情况可参考文献[9]。这里主要对采用 4 bit 进行量化时,在中继处设置不同的发送量化门限的情况进行对比。

仿真中采用的信号调制方式为 QPSK 调制,源至中继的平均信噪比取 20 dB,各候选中继至目的节点的平均信噪比在 0 ~ 24 dB 内变化。中继处具有完备的源至中继的信道状态信息,目的节点处具有各候选中继至目的节点的完备信道状态信息,但仅有关于源至中继的量化信道状态信息。

图 4、5 分别给出了协同中继簇中含 3 和 5 个候选中继,且机会地选择一个最佳机会中继协同时,不同设置门限值对系统误比特率的影响。为简化比特利用率的计算,这里门限值的选择依据式(6),分别取为 0.267 1、0.575 6、0.940 2 和 1.386 6。

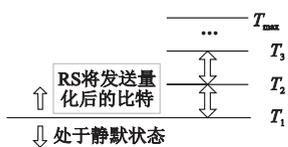


图3 中继站设置门限值示意图

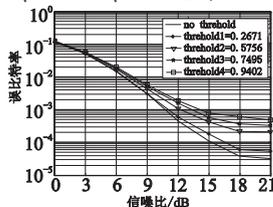


图4 候选中继数为3时,不同发送门限值对系统性能的影响

从图 5 中可看出,在低信噪比 0 ~ 6 dB 内,系统的误比特率不受所设置的发送门限值影响,这是因为中继至目的节点的平均信噪比对系统性能产生了瓶颈效应。在中继至目的节点的平均信噪比大于 6 dB 后,随着所设门限值的增高,系统的误比特率增加,这是因为随着所设门限值的增加,发送量化比特的中继个数减少。

对比图 4 和 5 可看出,候选中继数为 3 个时,在中继节点处设置不同的发送门限对系统的误比特率影响较明显。其中,门限值取 0.267 1 时,系统性能与不设置发送门限时较接近。候选中继数为 5 个时,门限值取 0.267 1 ~ 0.575 6 时,系统性能接近不设置发送门限时的系统性能。

在候选中继处没有设置发送门限时,每传输 M 比特信息给目的节点,每个中继节点都将瞬时信道信息量化为 δ 位比特后前馈给目的节点,目的节点作出决定后反馈 $\lceil \log_2 N \rceil$ 比特用于选择中继,那么,总的比特利用率可依据下式计算:

$$\frac{M}{M + N\delta + \lceil \log_2 N \rceil} \quad (8)$$

在候选中继处设置发送门限后,每传输 M 比特信息给目的节点,候选中继中实际发送量化比特给目的节点的中继个数的期望值与所设置门限的关系可表示为

$$E(N) = N \cdot \int_{th_hold}^{+\infty} p(x)^N + (N-1) \cdot C_N^{N-1} \int_{th_hold}^{+\infty} p(x)^{N-1} \int_0^{th_hold} p(x) + \dots + 1 \cdot C_N^1 \int_{th_hold}^{+\infty} p(x) \int_0^{th_hold} p(x)^{N-1} \quad (9)$$

其中: $p(x)$ 为随机变量 $|h_{sr}|^2$ (瑞利衰落幅度的平方) 的概率密度函数, th_hold 为中继处设定发送量化比特的门限值。

假定一个数据传输分组为 128 bit。图 6 为协同中继簇中含 5 个候选中继,设置不同的发送门限值时,比特利用率随候选中继发送量化比特位数的变化情况。显然,随着设置门限值的提高,比特利用率相应增加。不设置门限值的情况下,再用

3、4 bit 量化时,比特利用率分别为 0.882 8 和 0.853 3。在发送门限值等于 0.267 1 时,相应比特利用率分别增加为 0.894 3 和 0.867 8;发送门限值等于 0.575 6 时,相应比特利用率分别增加为 0.906 2 和 0.882 8;发送门限值等于 0.940 2 时,相应比特利用率分别增加为 0.918 4 和 0.898 2。

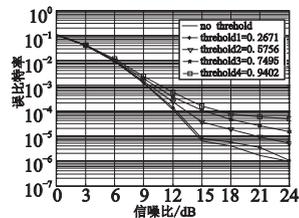


图5 候选中继数为5时,设置不同发送门限值对系统性能的影响

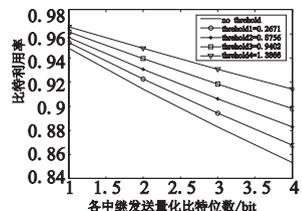


图6 自适应比特量化与固定比特量化情况下的比特利用率对比

4 结束语

针对集中控制的机会中继选择方案下,目的节点需要不断获取所有中继的量化信道状态信息而引起的系统开销问题,提出了一种基于自适应量化信道状态下的机会中继选择方案。新方案下,各候选中继将其估计到的第一跳的信道信息与预先设定的门限值比较,只有在高于该门限时才允许其发送量化比特。对新方案的仿真研究表明,在门限值设置为 0.267 1 ~ 0.575 6 时,系统的比特利用率提高的同时,对系统误比特率性能影响不大。特别是候选中继数较多时,所设置的发送量化比特门限值可相应增高,这说明改进方案具有较好的鲁棒性。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] IBRAHIM A S, SADEK A K, SU Wei-feng, *et al.* Cooperative communications with relay-selection: when to cooperate and whom to cooperate with [J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2008, 7(7): 2814-2827
- [3] ZOU Yu-long, ZHENG Bao-yu, ZHU Wei-ping, *et al.* An optimal relay selection scheme for cooperative diversity [C] // Proc of IEEE ICSP. [S. l.]: IEEE Press, 2008: 1800-1803.
- [4] SONG S, SON K, LEE H W, *et al.* Opportunistic relaying in cellular network for capacity and fairness improvement [C] // Proc of IEEE GLOBECOM. [S. l.]: IEEE Press, 2007: 4407-4412.
- [5] ZHANG P, WANG F R, TU L, *et al.* Opportunistic virtual antenna array with optimal relay mobile terminals selection [C] // Proc of IEEE WICOM. [S. l.]: IEEE Press, 2008: 1-4.
- [6] MULLER A, SPEIDEL J. Relay selection in dual-hop transmission systems: selection strategies and performance results [C] // Proc of IEEE ICC. [S. l.]: IEEE Press, 2008: 4998-5003.
- [7] FAREED M M, UYSAL M. A novel relay selection method for decode-and-forward relaying [C] // Proc of IEEE CCECE. [S. l.]: IEEE Press, 2008: 135-140.
- [8] MADAN R, MEHTA N, MOLISCH A, *et al.* Energy-efficient cooperative relaying over fading channels with simple relay selection [J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2008, 7(8): 3013-3025.
- [9] EKJIM A, CELEBI M E. Comparison of cooperative path selection techniques [C] // Proc of IEEE SIU. [S. l.]: IEEE Press, 2007: 1-4.