

基于中继选择的协作通信系统 遍历信道容量分析

席在芳, 龚嘉成, 龙琦玉, 唐志军, 钟斌

(湖南科技大学 信息与电气工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 本文对中继选择协作通信网络系统的遍历信道容量展开研究. 在假设独立同分布瑞利信道条件下, 分别推导出机会中继选择算法和部分中继选择算法解码转发中继模式下一些重要因素的闭式表达式, 包括累计概率密度函数, 累积分布函数和遍历信道容量. 结果表明, 利用中继选择技术能有效提高系统分集度. 此外, 遍历信道容量性能受中继节点数目、链路信噪比的影响. 通过数值仿真分析验证了理论闭式解的正确性. 实验结果表明通过信道反馈状态信息调节最优数据发送速率, 非中断信道容量能达到遍历信道容量.

关键词: 最优速率传输; 协作通信; 中继选择; 信道容量

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2017)02-0058-04

Ergodic channel capacity analysis for relay selection based cooperative communication systems

Xi Zaifang, Gong Jiacheng, Long Qiyu, Tang Zhijun, Zhong Bin

(School of Information and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: The ergodic capacity was studied that of relay selection cooperative communication network systems. The closed-form expressions of some important factors, including, the probability density function, the cumulative distribution function, and the ergodic capacity, were derived by considering the opportunistic selection and the partial selection of decode-and-forward relays, respectively, with independent and identically distributed rayleigh fading wireless links assumed. The results show the diversity degree can be effectively improved by relay selection techniques. Besides, the ergodic capacity can be substantially influenced by the number of relays, and the signal-to-noise ratio (SNR). The closed-form expressions are verified by numerical simulation. The experiment results show that the non-outage channel capacity can reach to ergodic capacity though optimal data transmission rate being adjusted by the feedback channel state information.

Keywords: optimal rate transmission; cooperative communication; relay selection; channel capacity

协作通信有利于扩大通信用户的覆盖范围, 实现边缘用户的无缝覆盖, 提高整个通信网络系统的频谱效率. 协作通信将是提升第五代(5G)通信服务质量的重要技术手段之一^[1-3].

当前学术界研究表明, 利用协作的网络异常检测算法能提高对应用层及传输层部分协议异常和部分攻击的检测效果^[4-5]. 此外, 增加协作中继数目使得系统分集增益得以提升, 有利于提高无线通信系统的鲁棒性. 根据信道状态信息进行中继选择, 既能提高分集增益, 又可以减少中继节点之间的相互干扰^[6-9].

收稿日期: 2015-12-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1501253, 61501182, 61377024); 深圳大学广东省普及性高性能计算机重点实验室开放课题(SZU-GDPHPCL2015); 湖南省教育厅科研一般项目(15JC0558); 湖南科技大学博士启动基金资助项目(E51539)

通信作者: 钟斌(1982-), 男, 湖南邵阳人, 博士, 副教授, 主要从事协作通信与认知无线电技术研究. Email: zhongbin@hnust.edu.cn

因此,中继选择算法开始受到学术界的广泛关注.当前的中继选择方式主要有机会中继选择和部分信道状态信息中继选择.2种中继选择算法的特点是:前者所有的端到端链路信道状态信息都汇聚至控制中心,控制中心根据整个链路的质量状态择优选择通信链路;后者中继只需根据信源到中继或者中继到信宿的部分链路信息就可以选择接入中继,其性能逊于前者,但相比前者复杂度较低^[10-12].然而在固定速率传输系统里,当信道链路信噪比较小时,会产生严重地中断传输现象.从而,严重地降低了通信网络的服务质量.

本文根据信道状态信息调节源节点和中继节点发送数据的速率,从而实现2种中继选择算法达到遍历信道容量.此外,本文推导出来2种中继选择算法的端对端信噪比概率分布函数,即接收的信噪比概率密度函数和累积概率分布函数;然后,由信道链路的信噪比分布特性推导出了2种中继选择协作通信系统的遍历信道容量理论闭式解;最后,通过蒙特卡洛仿真对所推导的理论公式进行了验证.

1 最优数据速率传输理论分析

本节在 N 个中继节点 $R_i, \forall i \in \{1, \dots, N\}$ 的解码转发协作通信中,分别针对机会中继选择算法与部分中继选择算法应用最优发送数据速率传输,使得发送数据速率 $R_{\text{sol}} < \text{信道容量值 } C$,从而得到不产生中断的信道容量值达到遍历信道容量.

在利用时分复用模式的半双工中继协作通信系统中,根据香农公式,信道容量可以表示为

$$C = \frac{1}{2} \log_2(1 + \gamma_{\text{eq}}). \quad (1)$$

式中: γ_{eq} 表示为等价的端对端传输链路的信噪比.

信道容量的数学期望值为遍历信道容量,表示为

$$E[C] = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \log_2(1 + x) f_{\gamma_{\text{eq}}}(x) dx. \quad (2)$$

式中: $f_{\gamma_{\text{eq}}}(x)$ 为选择中继链路的等价信噪比的概率密度分布函数,且不同的中继选择算法具有不同的概率密度分布函数.

本文在假设链路具有加性高斯白噪声,通信链路为服从独立同分布的瑞利衰落信道链路,且数据在单位功率传输条件下,分别推导出2种中继选择算法的概率分布函数,然后根据概率分布函数求解遍历信道容量的闭式表达式.

1.1 机会中继选择算法

由独立同分布瑞利分布的统计特性可知,任意候选中继 R_i 到信宿 D 的链路信噪比 $\gamma_{R_i D}$ 的概率密度函数为

$$f_{\gamma_{R_i D}}(x) = \frac{1}{\bar{\gamma}_{R_i D}} e^{-\frac{x}{\bar{\gamma}_{R_i D}}}, x \geq 0. \quad (3)$$

式中: $\bar{\gamma}_{R_i D}$ 为 $R_i \rightarrow D$ 的平均信噪比. $\gamma_{R_i D}$ 的累积概率分布函数可以由式(3)积分得到,可以表示为

$$F_{\gamma_{R_i D}}(x) = \int_0^x f_{\gamma_{R_i D}}(x) dx = 1 - e^{-\frac{x}{\bar{\gamma}_{R_i D}}}, x \geq 0. \quad (4)$$

同理,信源 S 到任意候选中继 R_i 信噪比 γ_{SR_i} 的概率密度函数和累积分布函数可以分布表示为

$$f_{\gamma_{SR_i}}(x) = \frac{1}{\bar{\gamma}_{SR_i}} e^{-\frac{x}{\bar{\gamma}_{SR_i}}}, x \geq 0. \quad (5)$$

和

$$F_{\gamma_{SR_i}}(\gamma) = 1 - \exp\left\{-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_{SR_i}}\right\}. \quad (6)$$

式中: $\bar{\gamma}_{SR_i}$ 为 $S \rightarrow R_i$ 的平均信噪比.

机会中继选择算法,选择的是链路等价信噪比为 $\gamma_{\text{eq}} = \max_{i \in \{1, \dots, N\}} \min\{\gamma_{SR_i}, \gamma_{R_i D}\}$,可以求解得等价端对

端信噪比的累积概率分布函数为

$$F_{\gamma_{\text{eq}}}(x) = \{1 - [1 - F_{\gamma_{\text{SR}_i}}(x)] \cdot [1 - F_{\gamma_{\text{RD}}}(x)]\}^N, x \geq 0. \quad (7)$$

将式(4)与式(6)代入式(7),得到 γ_{eq} 的累积概率分布函数为

$$F_{\gamma_{\text{eq}}}(x) = [\mathcal{Q}(x)]^N. \quad (8)$$

式中: $\mathcal{Q}(x) = 1 - \exp[-A(1) \cdot x]$; $A(m) = \frac{m}{\gamma_{\text{RD}}} + \frac{m}{\gamma_{\text{SR}}}$.将式(8)求导数,可以得到 γ_{eq} 的概率密度分布函数为

$$f_{\gamma_{\text{eq}}}(x) = N \cdot [\mathcal{Q}(x)]^{N-1} \cdot \exp\{-A(1)x\} \cdot A(1). \quad (9)$$

将式(9)代入式(2)可以得到机会中继选择算法遍历信道容量的闭式表达式为

$$E[C] = \frac{1}{2\ln(2)} N \sum_{m=0}^{N-1} \binom{N-1}{m} (-1)^m A(1) \int_0^{+\infty} \ln(1+x) e^{-A(m+1)x} dx = \frac{N}{2\ln(2)} \sum_{m=0}^{N-1} \binom{N-1}{m} \mathcal{G}_1(A(m+1)) \frac{(-1)^m e^{A(m+1)}}{m+1}. \quad (10)$$

式中: $\binom{N-1}{n} = \frac{(N-1)!}{(N-1-n)! n!}$; $\mathcal{G}_1(x) = -Ei(-x)$, $x > 0$ 表示第一阶指数积分函数^[13].

1.2 部分中继选择算法

当利用 $R_i \rightarrow D$ 的信道状态信道进行中继选择算法所得到的端对端等价信噪比为 $\gamma_{\text{eq}} = \min\{\gamma_{\text{SR}_i}, \max_{i \in \{1, \dots, N\}} \gamma_{\text{RD}_i}\}$,与1.1节类似,可以推导出 γ_{eq} 的累积分布函数与概率密度函数分别为

$$F_{\gamma_{\text{eq}}}(x) = 1 - e^{-\frac{x}{\gamma_{\text{SR}}}} + e^{-\frac{x}{\gamma_{\text{SR}}}} [1 - e^{-\frac{x}{\gamma_{\text{RD}}}}]^N. \quad (11)$$

和

$$f_{\gamma_{\text{eq}}}(x) = \frac{1}{\gamma_{\text{SR}}} e^{-\frac{x}{\gamma_{\text{SR}}}} + \frac{N}{\gamma_{\text{RD}}} \sum_{n=0}^{N-1} \binom{N-1}{n} (-1)^n e^{-\left(\frac{n+1}{\gamma_{\text{RD}}} + \frac{1}{\gamma_{\text{SR}}}\right)x} - \frac{1}{\gamma_{\text{SR}}} \sum_{n=0}^N \binom{N}{n} (-1)^n e^{-\left(\frac{n}{\gamma_{\text{RD}}} + \frac{1}{\gamma_{\text{SR}}}\right)x}. \quad (12)$$

将式(12)代入式(2)可以得到部分中继选择算法的遍历信道容量闭式表达式为

$$E[C] = \frac{1}{2\ln(2)} \left[e^{-\frac{1}{\gamma_{\text{SR}}}} \mathcal{G}_1\left(\frac{1}{\gamma_{\text{SR}}}\right) + \frac{N}{\gamma_{\text{RD}}} \sum_{n=0}^{N-1} \binom{N-1}{n} \frac{(-1)^n e^{-\mathcal{D}(n)} \mathcal{G}_1(\mathcal{D}(n))}{\mathcal{D}(n)} - \frac{1}{\gamma_{\text{SR}}} \sum_{n=0}^N \binom{N}{n} \frac{(-1)^n e^{-\mathcal{D}(n-1)} \mathcal{G}_1(\mathcal{D}(n-1))}{\mathcal{D}(n-1)} \right]. \quad (13)$$

式中: $\mathcal{D}(n) = \frac{n+1}{\gamma_{\text{RD}}} + \frac{1}{\gamma_{\text{SR}}}$.

2 性能仿真验证

通过 Matlab 软件,利用蒙特卡洛仿真分析方法对上述理论闭式解进行验证.图 1 为固定数据速率为 1 bit/s 时,根据式(8)和式(11)得到 2 种中继选择算法的中断概率.从图 1 可知,发送数据的速率固定时,在低信噪比区域系统的中断概率较大.对比分析 2 种中继选择算法,部分中继选择算法对系统分集度性能改善不显著,且仿真结果与理论分析相一致.当发生数据速率固定时,在所对应参数存在如图 1 所示的中断概率.然而,在实际通信传输系统里希望中断概率越小越好.

因此,本文使用最优数据传输技术,即根据控制中心所接收到的信道状态信息,从而确定链路的信道容量 C .根据信道容量调节发送数据速率,使得数据传输速率 $R_{\text{sub}} < C$ 便可以保障传输链路不致于产生中断.从而,最优速率传输方式使得协作通信系统获得的不中断的信道容量达到遍历信道容量值.根据式(10)和式(13)得到遍历信道容量数据结果如图 2 所示.最优速率传输方式相比固定速率发送模式,需要估计出信道状态以便根据信道条件调节信源的数据发送速率,从而以较大的信道状态信息反馈量为通信代价换取较低的中断概率,以提高通信网络服务质量.

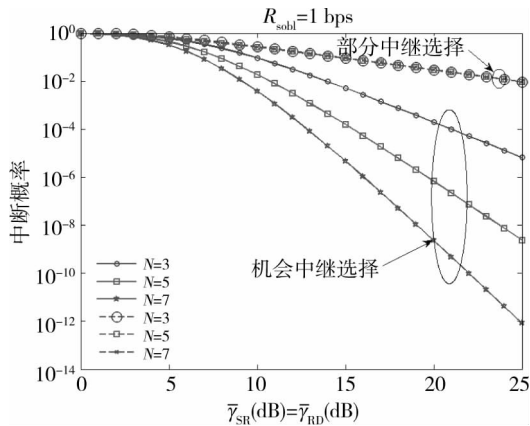


图1 中断概率性能图

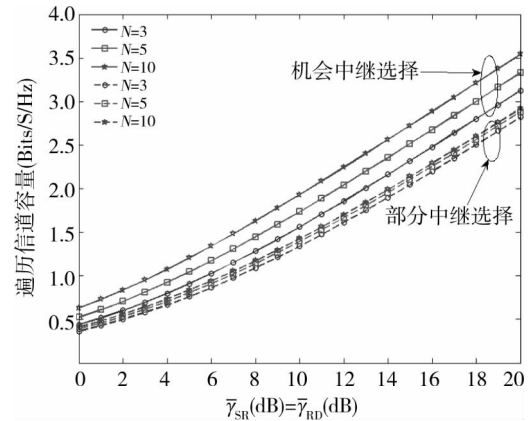


图2 遍历信道容量性能图

3 结论

提出了最优速率传输中继选择算法,理论推导出了表征无线通信网络系统性能的遍历信道容量闭式表达式,并利用 Matlab 进行了蒙特卡洛仿真验证.研究表明,利用速率最优传输有利于降低中断概率的影响,确保可靠传输的信道容量达到遍历信道容量.

参考文献:

- [1] Sendonaris A, Erkip E, Aazhang B. Increasing uplink capacity via user cooperation diversity [C]// Proceedings of the IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT), August, 16–21, 1998, Cambridge, MA, USA, 1998: 156.
- [2] Zhang Z S, Zhang W, Tellambura C. Cooperative OFDM channel estimation in the presence of frequency offsets [J]. IEEE Transaction on Vehicular Technology, 2009, 58(7): 3447–3459.
- [3] Sendonaris A, Erkip E, Aazhang B. User cooperation diversity – Part I, II: System description; System description, implementation aspects and performance analysis [J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51(11): 1927–1938.
- [4] 邓军, 薛辉. 基于协作的网络协议异常检测算法 [J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2015, 38(1): 58–63.
- [5] 强浩, 陈琛, 刘柏良, 等. 高频效应对无线电能传输系统的影响研究 [J]. 常州大学学报(自然科学版), 2016, 28(6): 113–118.
- [6] Zhuang W, Ismail M. Cooperation in wireless communication networks [J]. IEEE Wireless Commun., 2012, 19(2): 10–20.
- [7] Zhang Z S, Long K P, Wang J P, et al. On swarm intelligence inspired self-organized networking: its bionic mechanisms, designing principles and optimization approaches [J]. IEEE Communications Surveys Tutorials, 2014, 16(1): 513–537.
- [8] Hur Q, Qian Y. An energy efficient and spectrum efficient wireless heterogeneous network framework for 5G systems [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(5): 94–101.
- [9] Nosratinia A, Hunter T E, Hedayat A. Cooperative communication in wireless network [J]. IEEE Communications Magazine, 2004, 42(10): 74–80.
- [10] Fareed M M, Yang H C, Alouini M S. Improving throughput of single-relay DF channel using linear constellation precoding [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2014, 3(4): 425–428.
- [11] Zhang Z S, Zhang W, Tellambura C. OFDMA uplink frequency offset estimation via cooperative relaying [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(9): 4450–4456.
- [12] Lee K, Yang J, Kwon H M, et al. Closed form of optimum cooperative distributed relay amplifying matrix [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(5): 2741–2755.
- [13] Gradshteyn I S, Ryzhik I M. Table of Integrals, Series, and Products, seventh edition [M]. New York: Academic Press, 2007: 883.