

单播网络中基于物理层网络编码的协作传输方案设计

李璐瑶^{1,2}, 王 静¹, 戴 明^{1,2}, 樊 娜¹

(1 长安大学 信息工程学院, 陕西 西安 710064;

2 中国交通通信信息中心, 北京 100011)

摘 要: 协作传输可以获得空间分集增益, 有效地抵制由于无线网络多径传播引起的信号衰落. 针对单播传输的无线中继网络, 提出一种基于物理层网络编码的协作传输方案. 理论分析表明, 该协作传输方案相对于传统协作传输方案以及基于 Straightforward 网络编码的协作传输方案, 可有效减少传输时隙, 获得较高的网络吞吐量. 并且对基于物理层网络编码的协作传输方案的 SEP 性能进行了实验仿真.

关键词: 单播传输; 无线中继网络; 协作通信; 网络吞吐量

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2014)11-0173-04

Design of the Cooperation Transmission Based on Physical-Layer Network Coding in Network with Unicast Transmission

LI Lu-yao^{1,2}, WANG Jing¹, DAI Ming^{1,2}, FAN Na¹

(1 School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2 China Transport Telecommunications & Information Center, Beijing 100011, China)

Abstract: Cooperation transmission can combat signal fading caused by multipath propagation in wireless networks, and consequently achieve spatial diversity gains. For wireless relay network with unicast transmission, a novel cooperation scheme based on physical-layer network coding is proposed in this paper. Theoretic analysis shows that, compared with traditional cooperation transmission scheme and the cooperation scheme based on straightforward network coding, this cooperation scheme can decrease transmission slots efficiently, and obtain higher network throughput. Furthermore, its symbol error probability performance is simulated for different SNR values.

Key words: unicast transmission; wireless relay network; cooperation communication; network throughput

1 引言

协作传输是抵抗无线信道多径衰落最有效的途径之一^[1-4], 每个移动终端在发送自己信息的同时可以协助其他终端发送信息, 通过获取空间分集增益, 提高传输可靠性, 改善无线网络系统性能. 目前随着人们高传输速率和高频谱效率需求的增加, 协作通信技术已经被广泛应用于 3GPP LTE-Advanced 和 IEEE 802.16m 系统中.

Ahlswede 等人最早提出网络编码的概念, 是为了提高有线多播网络的网络吞吐量^[5], 实现多播网

络中的最大流传输. 由于无线媒体的广播性质, 中继节点可以接收到多个信源信息, 基于网络编码的思想, 目前已有学者提出在中继节点上协作传输网络编码后的编码信息, 提高传输效率.

2006 年, Chen 首次提出了基于网络编码协作分集^[6]的概念, 分别在分布式天线系统和多用户协作网络中采用网络编码技术, 以获得更高的分集增益. 针对无线网络中两节点通过中继节点进行信息交换的网络模型, Wu 等人提出基于数字比特流上编码操作的 Straightforward 网络编码算法^[7-8], 提高无线网络信息交换的吞吐量. 为了进一步提高网

收稿日期: 2014-03-15; 修回日期: 2014-05-10

基金项目: 交通运输部科技项目(2012-364-208-600)

络吞吐量, Zhang 等人提出了物理层网络编码——将电磁信号的叠加映射到数字比特流在伽罗华域上的加法操作, 在两个时隙内实现两个信源之间的信息交换^[9-10], 减少信息传输时隙。

鉴于物理层网络编码只考虑两个信源通过中继节点的信息交换, 本文针对无线单播网络, 提出一种基于物理层网络编码的协作传输方案。具体地, 信源节点将自己的信息同时发送给各自的目的地节点, 中继节点对接收到的信源信息进行物理层网络编码。两个时隙后, 根据接收到的信源信息和物理层网络编码信息, 目的地节点恢复出对应信源符号的另一个副本, 实现两阶分集增益。理论分析表明, 与传统协作传输方案以及基于 Straightforward 网络编码的协作传输方案相比, 该协作传输方案可有效减少传输时隙, 获得较高的网络吞吐量。

2 基于物理层网络编码的协作传输方案

图 1 所示的是具有两对信源-目的节点对的无线中继网络。假定该网络中每个节点具有单一天线, 信源 s_1 (s_2) 需要向目的地节点 d_1 (d_2) 单播传输符号 x_1 (x_2), 且当 s_1 (s_2) 向目的地节点 d_1 (d_2) 发送符号 x_1 (x_2) 时, 目的地节点 d_2 (d_1) 和中继 r 同时接收到符号 x_1 (x_2)。

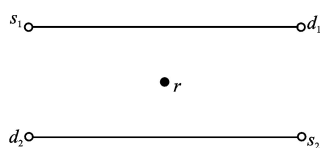
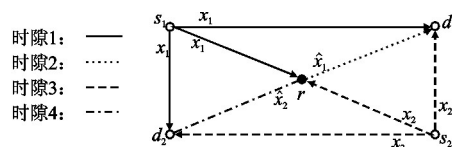


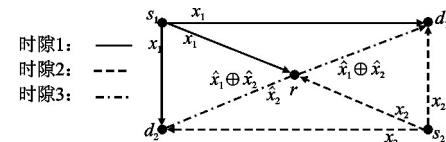
图 1 具有两对信源-目的节点对的单播传输网络模型

在传统协作传输方案中, 为了避免冲突, 信源 s_1 和 s_2 采用如图 2(a) 所示的传统协作方式传输信息。在时隙 1, 信源 s_1 向目的地节点 d_1 发送符号 x_1 , 同时, 中继节点 r 和目的地节点 d_2 也接收到信源 s_1 发送的符号 x_1 。在中继节点得到 x_1 的检测符号 $\hat{x}_1$ 后, 将 $\hat{x}_1$ 在时隙 2 转发给目的地节点 d_1 。类似地, 信源 s_2 在时隙 3 向目的地节点 d_2 发送符号 x_2 , 同时, 中继节点 r 和目的地节点 d_1 也接收到信源 s_2 发送的符号。在时隙 4, 中继节点 r 将 x_2 的检测符号 $\hat{x}_2$ 发送给目的地节点 d_2 。传统协作传输方案需要 4 个时隙完成协作传输, 其网络吞吐量为 $1/4$ 符号/信源/时隙 (sym/S/TS)。而且, 对于传统协作传输方案, 每个目的地节点分别通过直达路径和中继路径两条独立路径接收信源符号, 获得两阶分集增益。

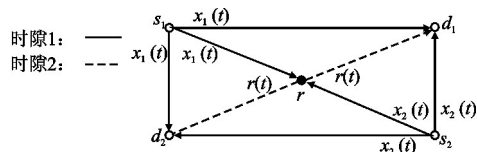
图 2(b) 中给出了基于 Straightforward 网络编码的协作传输方案的时隙分配。在时隙 1, 信源 s_1 向目的地节点 d_1 发送符号 x_1 , 中继节点 r 和目的地节点 d_2 都接收到信源 s_1 发送的信息。时隙 2 的操作类似于时隙 1, 信源 s_2



(a) 传统协作传输方案



(b) 基于 Straightforward 网络编码的协作传输方案



(c) 基于物理层网络编码的协作传输方案

图 2 具有两对信源-目的节点对网络的时分信道分配方案

向目的地节点 d_2 发送符号 x_2 , 中继节点 r 和目的地节点 d_1 都接收到信源 s_2 发送的信息。经过前两个时隙, 中继节点 r 得到 x_1 和 x_2 的检测符号 $\hat{x}_1$ 和 $\hat{x}_2$, 在时隙 3 将这两个检测符号的 Straightforward 网络编码符号 $\hat{x}_1 \oplus \hat{x}_2$ 同时发送给目的地节点 d_1 和 d_2 。目的地节点 d_1 通过对时隙 2 和时隙 3 接收到的符号进行译码操作 $\hat{x}_2 \oplus (\hat{x}_1 \oplus \hat{x}_2)$ 得到 x_1 的一个副本。考虑到 d_1 已经在时隙 1 接收到 x_1 的一个副本, 则目的地节点 d_1 将接收到 x_1 的两个副本。类似地, 三个时隙后, 目的地节点 d_2 也将接收到信源符号 x_2 的两个副本。因此, 基于 Straightforward 网络编码的协作传输方案将获得和传统协作传输方案相同的两阶分集增益。该协作传输方案只需要 3 个时隙完成信息传输, 其网络吞吐量为 $1/3$ sym/S/TS。

下面讨论基于物理层网络编码的协作传输方案的信息传输速率和网络吞吐量, 如图 2(c) 所示。假定所有信号的时间、载频和相位同步, 信源 s_1 和 s_2 输出符号的 QPSK 调制信号分别为 $x_1(t) = a_1 \cos \tilde{\omega}t + b_1 \sin \tilde{\omega}t$ 和 $x_2(t) = a_2 \cos \tilde{\omega}t + b_2 \sin \tilde{\omega}t$, 其中 a_1, a_2 是同相信号, b_1, b_2 是正交信号, $\tilde{\omega}$ 是载波频率。在时隙 1, 信源 s_1 和 s_2 同时发送调制信号 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 。中继节点 r 对接收到的两个调制信号直接进行加和操作, 得到和信号

$$R(t) = x_1(t) + x_2(t)$$

$$(a_1 + a_2) \cos \tilde{\omega}t + (b_1 + b_2) \sin \tilde{\omega}t.$$

在时隙 2, 根据表 1 所示的物理层网络编码 QPSK 同相调制/解调映射表, 中继节点将信号 $R(t) = (a_1 + a_2) \cos \tilde{\omega}t + (b_1 + b_2) \sin \tilde{\omega}t$ 映射为信号 $r(t) = r_1 \cos \tilde{\omega}t +$

$r_2 \sin \omega t$, 并同时发送给目的节点 d_1 和 d_2 .

表1 物理层网络编码 QPSK 同相调制/解调映射

信源 s_1 (或 s_2) 的调制映射		节点 r 的解调映射		
		输入	输出	
输入	输出			节点 r 的调制映射
				输入 输出
$x_1^{(D)} (x_2^{(D)})$	$a_1 (a_2)$	$a_1 + a_2$	$r^{(D)}$	r_1
1	1	2 (或 -2)	0	-1
0	-1	0	1	1

目的节点 d_1 接收到信号 $r(t)$ 后, 根据 $r^{(D)} = x_1^{(D)} \oplus x_2^{(D)}$ 和 $r^{(Q)} = x_1^{(Q)} \oplus x_2^{(Q)}$, 以及在时隙1接收到的信源信息 x_2 , 恢复出信源信息 x_1 的一个副本. 考虑到 d_1 已经在时隙1接收到 x_1 的一个副本, 则目的节点 d_1 将接收到 x_1 的两个副本, 获得两阶分集增益. 同理, 目的节点 d_2 也将接收到信源符号 x_2 的两个副本. 因此, 基于物理层网络编码的协作传输方案可以获得两阶完全分集增益. 进一步地, 该协作传输方案只需要2个时隙即可完成信息传输, 比基于 Straightforward 网络编码的协作传输方案减少一个时隙的时间消耗, 网络吞吐量为 $1/2\text{sym/S/TS}$.

3 性能仿真

首先从理论上分析基于物理层网络编码的协作传输方案的网络吞吐量和分集增益性能, 以证实其在传输速率方面优于传统协作传输方案和基于 Straightforward 网络编码的协作传输方案. 进一步地, 考虑不同 SNR 条件下的符号错误概率 (SEP) 性能.

3.1 网络吞吐量和分集增益性能

通过上一节中对无线单播网络中传统协作传输方案、基于 Straightforward 网络编码的协作传输方案以及基于物理层网络编码的协作传输方案的信息传输过程进行分析, 获得以下结论: (1) 采用传统协作传输方案, 每个信源符号通过4个时隙进行传输, 符号速率为 $1/4\text{sym/S/TS}$. 同时, 每个目的节点 d_i ($i=1,2$) 将通过直达路径和中继路径两条独立的路径获得信源符号 x_i 的两个副本, 因此传统协作传输方案可以获得两阶完全分集增益; (2) 基于 Straightforward 网络编码的协作传输方案分别通过直达路径和中继路径获得信源符号的两个副本, 获得与传统协作传输方案相同的两阶分集增益. 由于在基于 Straightforward 网络编码的协作传输方案中, 每个信源需要3个时隙将自己的符号发送给目的节点, 网络吞吐量为 $1/3\text{sym/S/TS}$; (3) 基于物理层网络编码的协作传输方案, 目的节点分别在

时隙1和时隙2获得信源符号的一个副本, 获得两阶分集增益. 由于每个信源符号通过两个时隙传输给目的节点, 符号速率为 $1/2\text{sym/S/TS}$, 对应的网络吞吐量也为 $1/2\text{sym/S/TS}$.

根据上述理论分析, 基于物理层网络编码的协作传输方案是有效的, 与传统协作传输方案以及基于 Straightforward 网络编码的协作传输方案相比, 该方案可以获得较高的网络吞吐量 $1/2\text{sym/S/TS}$, 消耗较少的传输时隙. 而且, 基于 Straightforward 网络编码的协作传输方案可以实现完全分集, 获得与传统协作传输方案以及基于 Straightforward 网络编码的协作传输方案相同的两阶分集增益.

3.2 符号错误概率

本小节讨论基于物理层网络编码的协作传输方案的 SEP 性能. 假定中继 r 与信源和目的节点的距离相等, 此时相应的衰落信道具有相同的平均 SNR, 即 $\bar{\gamma}_{SR} = \bar{\gamma}_{RD} = \bar{\gamma}_{SD}$. 由于随着星座尺寸减少, 平均 SEP 降低, 编码增益增加, 且对于足够大的 SNR, 也能够获得完全分集, 在本文仿真中采用性能最好的 BPSK 调制. 下面, 采用 C++ 语言对基于 Straightforward 网络编码的协作传输方案和基于物理层网络编码的协作传输方案的 SEP 性能进行实验仿真.

图3中给出了基于 Straightforward 网络编码的协作传输方案和基于物理层网络编码的协作传输方案在无线单播网络中的 SEP 比较结果. 仿真结果表明, 这两种协作传输方案的 SEP 随着平均 SNR 的增加而降低, 同时编码增益增加; 在相同 SNR 情况下, 基于物理层网络编码的协作传输方案的 SEP 稍大于基于 Straightforward 网络编码的协作传输方案.

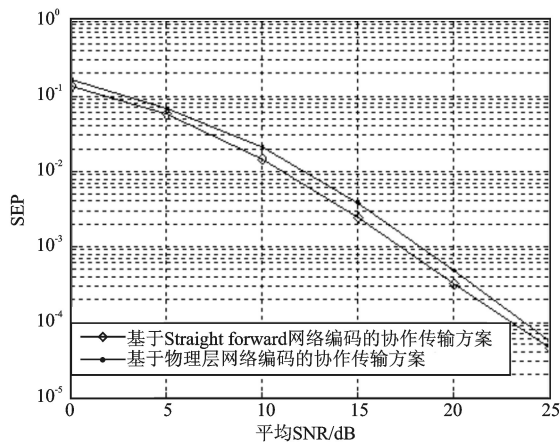


图3 基于 Straightforward 网络编码和基于物理层网络编码协作传输方案的 SEP 性能

4 结束语

针对单播传输的无线中继网络,本文提出一种新颖的基于物理层网络编码的协作传输方案,中继节点对接收到的信源信息进行物理层网络编码.目的节点根据接收到的信源信息和物理层网络编码信息,恢复出对应信源符号的另一个副本,实现两阶分集增益.

对基于物理层网络编码的协作传输方案进行理论分析发现,与传统协作传输方案以及基于 Straightforward 网络编码的协作传输方案相比,该协作传输方案可有效减少传输时隙,获得较高的网络吞吐量,且可以获得与传统协作方案以及 Straightforward 网络编码协作方案相同的两阶完全分集增益.最后,对基于物理层网络编码的协作传输方案的 SEP 性能进行了实验仿真,并对比分析了该方案与基于 Straightforward 网络编码的协作传输方案在不同 SNR 下的 SEP 性能.

参考文献:

- [1] Sendonaris A, Erkip E, Aazhang B. User cooperation diversity-part I: system description [J]. IEEE Trans on Comm, 2003, 51(11): 1927-1938.
- [2] Sendonaris A, Erkip E, Aazhang B. User cooperation diversity-part II: implementation aspects and performance analysis [J]. IEEE Trans on Comm, 2003, 51(11): 1939-1948.
- [3] Laneman J L, Tse David N C, Wornell G W. Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior [J]. IEEE Trans Information Theory, 2004, 50(12): 3062-3080.

(上接第 172 页)

- [12] Lauterbach C, Garland M, Sengupta S, et al. Fast BVH construction on GPUs [J]. Computer Graphics Forum. Blackwell Publishing Ltd, 2009, 28(2): 375-384.
- [13] Z Li, T Wang, Y Deng. Fully ParallelKd-Tree Construction for Real-Time Ray Tracing [J]. ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games, 2014, 20(1): 167-174.
- [14] Virtex-7 FPGA Family. [EB/OL]. [2014-03-15]. http://www.xilinx.com/publications/prod_mktg/Virtex7-Product-Table.pdf
- [15] Möller T., Trumbore B. Fast, minimum storage ray-triangle intersection [J]. Journal of graphics tools, 1997, 2(1): 21-28.

- [4] 陈永辉,朱光喜,王德胜. 一种基于协作 MIMO 的 Relay-STBC-HARQ 策略及其性能分析 [J]. 微电子学与计算机, 2009, 26(7): 40-44.
- [5] Ahlswede R, Cai N, Li S-Y R, et al. Network information flow [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4): 1204-1216.
- [6] Chen Y, Kishore S, Li J. Wireless diversity through network coding [C]// Proc IEEE WCNC, Las Vegas, NV: IEEE, 2006.
- [7] Wu Y, Chou P A, Kung S-Y. Information exchange in wireless networks with network coding and physical-layer broadcast [R]. Technical Report MSR-TR-2004-78, Microsoft Research, 2004.
- [8] Wu Y, Chou P A, Kung S-Y. Minimum-energy multicast in mobile ad hoc networks using network coding [J]. IEEE Trans on Communications, 2005, 53(11): 1906-1918.
- [9] Zhang S, Liew S-C, Lam P P. On the synchronization of physical-layer network coding [C]// Proceedings of the 2006 IEEE Information Theory Workshop: IEEE, China, 2006, 404-408.
- [10] Zhang S, Liew S C, Lam P P. Physical-layer network coding [C]// Proc of the 12th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. [s. l.]: IEEE, 2006: 358-365.

作者简介:

李璐瑶 女, (1965—), 硕士, 研究员, 研究方向为信息安全.

王 静 女, (1982—), 博士, 副教授, 研究方向为网络安全.

戴 明 男, (1979—), 硕士, 高级工程师, 研究方向为信息安全.

樊 娜 女, (1978—), 博士, 副教授, 研究方向为信息安全.

- [16] Shevtsov M, Soupikov A, Kapustin A, et al. Ray-triangle Intersection algorithm for modern CPU architectures [C]// Proceedings of GraphiCon. [s. l.]: IEEE, 2007: 33-39.
- [17] Kopta D, Spjut J, Brunvand E, et al. Efficient MIMD architectures for high-performance ray tracing [C]// Computer Design (ICCD), 2010 IEEE International Conference on. UT, USA: IEEE, 2010: 9-16.

作者简介:

王 晶 女, (1989—), 硕士研究生, 研究方向为图形处理器体系结构.

邓仰东 男, (1973—), 副教授, 博士研究生导师, 研究方向为并行计算和仿真、众核体系架构.