第43卷 第7期
2011年7月
哈尔滨工业大学学报
JOURNAL OF HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY
Vol. 43 No. 7
July 2011

单载波频域均衡中的协作分集方法

王荆宁，沙学军，谭学治

（哈尔滨工业大学 通信技术研究所，150001 哈尔滨，jingningw@hit.edu.cn）

摘　要： 为了克服单载波频域均衡技术中多径衰落对无线通信质量的影响，提出了一种"均衡前向"的协作分集方法. 在该方法中协作伙伴把接收到的信号经过频域均衡后再转发到目的节点，并且把"解码前向"与"均衡前向"相结合以提高系统性能. 仿真结果表明，协作分集可以有效降低系统的错误概率，并且两种协作方法结合的方法可以比单一方法得到更大的分集增益. 协作伙伴的信道状态决定了协作增益的大小，必须综合考虑多个参数来选择合适的协作伙伴.

关键词： 协作分集；单载波频域均衡；均衡前向；协作伙伴选择

中图分类号： TN929　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 0367－6234(2011)07－0042－04

Cooperative diversity in single carrier frequency domain equalization

WANG Jing-ning, SHA Xue-jun, TAN Xue-zhi

(Communication Research Center, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China, jingningw@hit.edu.cn)

Abstract: To overcome the influence of multi-path fading in single carrier frequency domain equalization, this paper proposed "Equalization and Forward" method. In this method the partner equalizes the receiving signal in frequency domain and forward to destination. In addition, the "Equalization and Forward" and "Decoded and Forward" methods are combined to improve the performance, and the impact on cooperative performance of partners´channel state information is analyzed. The simulation results show that the cooperative diversity can reduce error probability, and the combining method can provide larger diversity gain than single method. Partners´channel state information determines the diversity gain, so various parameters should be considered to obtain best performance.

Key words: cooperative diversity; single carrier frequency domain equalization; equalization and forward; partner selection

多天线技术可以有效地抵抗无线通信中多径衰落的影响[1]，但是多数无线网络的用户终端受到质量、体积等的限制不便于采用多天线技术，因此多用户协作分集技术应运而生[2]. 协作分集就是网络中的一些终端相互协作，互相转发协作伙伴的信息，以形成分布式多天线系统，得到空间分集的增益[3-4]. 目前对协作分集研究大都是基于窄带信道的，而未来的移动通信信道主要是宽带的频率选择性信道. 单载波频域均衡(single carrier frequency domain equalization, SC-FDE)是一种适合频率选择性信道并且具有较低峰均值的技术[5]，因而基于单载波频域均衡的协作分集技术成为新的研究重点，但是在频率选择信道中瞬时功率的限制的放大前向(Amplify and Forward, AF)方法难以实现，因而都是采用的平均功率限制的AF[6-7]. 但是平均功率限制在实际中并不现实，并且其性能也低于瞬时功率限制[8]. 因此本文提出了一种"均衡前向"(Equalization and Forward, EF)的协作方法来代替AF协作，该协作方法可以达到与瞬时功率限制一样的性能，并且

收稿日期： 2010－02－07.

基金项目： 国家重点基础研究发展计划资助项目(2007CB310601)；黑龙江省博士后基金资助项目(LRB09－019)；高等学校博士学科点专项科研基金资助(20092302120001).

作者简介： 王荆宁(1981—)，男，博士研究生；
沙学军(1968—)，男，教授，博士生导师；
谭学治(1957—)，男，教授，博士生导师.

将解码前向(Decode and Forward,DF)与 EF 相结合来进一步提高性能. 然后分析了协作伙伴信道状态的不同对协作性能的影响.

1　系统模型与协作方法

本文采用的三节点协作模型,分别是为源节点 S,协作节点 R 和目的节点 D(蜂窝系统中的基站). 每个节点都只有 1 个天线. 每个协作帧包括 2 个时隙,第 1 个时隙 S 广播信息,R 和 D 接收信息,第 2 个时隙,R 转发第 1 个时隙收到的信息[9]. 采用 QPSK 调制,不考虑信道编码,为了消除块间干扰,需要添加循环前缀(cyclic prefix,CP).

1.1　均衡前向

协作分集一般可以分为解码前向和放大前向 2 种实现策略,在频率选择性信道,由于信号在不同的频点衰落不一样,AF 难以根据瞬时信道调整放大系数,因此本文提出一种 EF 协作的方法,如图 1 所示. R 接收到一帧信息之后,去掉 CP,然后对信息进行 FFT,在频域进行最小均方误差(MMSE)均衡,然后进行 IFFT 变换到时域,重新添加 CP 之后再发送.

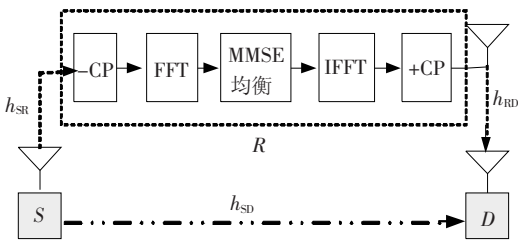

图 1　均衡前向框图

在第 1 个时隙,R 和 D 收到的信号分别为

$$\boldsymbol{r}_R = \sqrt{E_S}\boldsymbol{H}_{SR}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{w}_R,$$

$$\boldsymbol{r}_{D,1} = \sqrt{E_S}\boldsymbol{H}_{SD}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{w}_{D,1}.$$

这里 $\boldsymbol{H}_{AB} \triangleq C_{\mathrm{Circ}_N}[\boldsymbol{h}_{AB}]$ 是节点 A 和 B 之间的 1 个 $N \times N$ 的循环信道矩阵,第 1 列为

$$\boldsymbol{h}_{AB} = [h_{AB}(0)\quad h_{AB}(1)\quad \cdots\quad h_{AB}(L_{AB})\quad 0\quad \cdots\quad 0]^{\mathrm{T}}.$$

其中 L_{AB} 为 A 到 B 信道的冲击响应长度. $\boldsymbol{w}_R$ 和 $\boldsymbol{w}_{D,1}$ 是复加性高斯白噪声(AWGN)矢量,均值为 0,方差为 N_0. R 将接收到的信号首先进行 FFT 变换到频域,然后进行线性 MMSE 均衡(乘以 1 个均衡系数 W_l)之后在 IFFT 变换到时域,就得到信号 $\boldsymbol{x}_R$,这样第 2 个时隙 D 接收到的信号为

$$\boldsymbol{r}_{D,2} = \sqrt{E_R}\boldsymbol{H}_{RD}\boldsymbol{x}_R + \boldsymbol{w}_{D,2}.$$

线性 MMSE 均衡的系数为

$$\boldsymbol{W}_l = \frac{\boldsymbol{H}_l^*}{N_0/E + |\boldsymbol{H}_l|^2}$$

这里 $\boldsymbol{H}_l$ 为估计的信道在频域的冲击响应系数,E 为接收的信号能量. 然后 D 将 2 个时隙接收到的信号进行最大比合并,并进行频域的线性 MMSE 均衡,最后进行解调得到接收数据.

1.2　解码前向与均衡前向结合

EF 协作的方法虽然对信号进行了均衡,但是仍旧是没办法消除 S 到 R 之间噪声,而 DF 协作是将接收到的信号进行解调和解码,然后重新编码之后再转发,可以消除 S 到 R 之间的噪声,但是如果解码错误,则不转发或者发送错误信息,导致性能不如非协作的系统. 这里就结合 DF 和 EF 协作,也就是 R 将接收到的信号进行 MMSE 均衡后解码,如果解码正确,就采用 DF 的方法转发,如果解码错误,则采用 EF 的方法,把均衡后的信号转发,这样可以有效利用频谱资源. 假设可以正确解码的接收信噪比门限为 γ_T,S 到 R、R 到 D 以及 S 到 D 的接收信噪比分别为 γ_{SR}、γ_{RD} 和 γ_{SD},EF 中 S 经过 R 到达 D 的接收信噪比为 γ_{SRD},有 $\gamma_{SRD} = \gamma_{SR}\gamma_{RD}/(\gamma_{SR} + \gamma_{RD}) < \gamma_{RD}$,那么 EF 结合 DF 的错误概率为

$$P_{EF,\,DF} = P(\gamma_{SR} > \gamma_T)\,P(\gamma_{SD} + \gamma_{RD} < \gamma_T) + P(\gamma_{SR} < \gamma_T)\,P(\gamma_{SD} + \gamma_{SRD} < \gamma_T).$$

而单纯 DF 和 EF 协作的错误概率分别为

$$P_{DF} = P(\gamma_{SR} > \gamma_T)\,P(\gamma_{SD} + \gamma_{RD} < \gamma_T) + P(\gamma_{SR} < \gamma_T)\,P(\gamma_{SD} < \gamma_T),$$

$$P_{\mathrm{EF}} = P(\gamma_{SD} + \gamma_{SRD} < \gamma_T).$$

由于 $0 < \gamma_{SRD} < \gamma_{RD}$,可以得出 $P_{\mathrm{EF,DF}} < P_{\mathrm{DF}}$ 并且 $P_{\mathrm{EF,DF}} < P_{\mathrm{EF}}$,因此 DF 结合 EF 的错误概率最低. 与 DF 相比,DF 结合 EF 在 DF 不能正确解码的时候也要发送信号,从而消耗能量,而与 EF 相比,DF 结合 EF 则是增加了协作伙伴的计算量.

1.3　信道模型

这里的信道为双选择性信道,假设信道有 L 条独立的传播路径,在时刻 t 的离散冲击响应为

$$h(t) = \sum_{l=0}^{L-1} h_l(\lfloor t/T \rfloor)\delta(\tau - \tau_l).$$

其中 $h_l(\lfloor t/T \rfloor)$ 和 τ_l 是信号在第 l 路径的复增益和时间延迟,并且满足

$$\sum_{l=0}^{L-1} E[\,|\,h_l(\lfloor t/T \rfloor)\,|^2\,] = 1.$$

假设在 1 个协作帧的时间 T 内,路径增益 $h_l(\lfloor t/T \rfloor)$ 保持不变,假设最大的时间延迟 $\{\tau_l\}$ 小于循环前缀的长度.

每一条窄带路径的信道系数幅度都满足 Nakagami-m 分布. 一个 Nakagami-m 分布的随机变量 H,其功率密度函数(PDF)可以表示为

$$p_H(h) = \frac{2m^m h^{2m-1}}{\Gamma(m)\Omega^m}\exp\left(-\frac{mh^2}{\Omega}\right).$$

式中 $\Omega = E\{H^2\}$ 为变量 H 的方差，$\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数，m 为 Nakagami 信道的衰落指数，$m = 1$ 的时候，Nakagami 信道就退化为一般的 Rayleigh 信道.

2　协作伙伴选择分析

在协作通信中，协作伙伴 R 的选择起着重要的作用，因为 S 到 R 以及 R 到 D 之间的信道状态决定了协作系统的性能[10]. 而对于移动通信系统来说，协作伙伴的选择和切换所花费的代价大于传输一帧数据的协作增益[11]，因而根据信道的统计特性选择协作伙伴是可行的.

对于本文中所分析的双选择性信道，信道的统计特性可以表现在以下几个方面：等效的平均接收信噪比 E_b/N_0，独立的路径数量 L，Nakagami-m 信道的参数 m 以及信道衰落的快慢. 本文就从这几个参数来讨论 S-R 和 R-D 的信道状态对协作性能的影响，从而为选择最佳的协作伙伴提供依据.

3　仿真结果与讨论

本文采用蒙特卡洛仿真来分析宽带系统中协作分集的性能. 仿真的参数如表 1 所示，R 到 D 的信道与 S 到 D 的信道参数一样（特殊注明的除外）. 横坐标为 S 到 D 的平均 E_b/N_0，指发射每 bit 的能量为 1 时的接收的比特能量噪声密度比，纵坐标为误比特率（BER）. 假设非协作系统的发射每 bit 的能量为 1，协作系统中 S 和 R 发射每 *bit* 的能量都为 0.5.

表 1　协作分集系统仿真参数

参数名称	数据帧长度 N	CP 长度 N_C	$f_D T$	S 到 R 的平均 $(E_b \cdot N_0^{-1})$ / dB	L_{S-D}, L_{R-D}	L_{S-R}	信道的参数 m
参数值	256	32	0.036	15	16	8	1

图 2 是 S 到 R 的平均 E_b/N_0 不同时协作分集方法的性能仿真. 图中实线表示 S 到 R 的平均 E_b/N_0 为 15 dB，虚线表示 S 到 R 的平均 E_b/N_0 为 18 dB. 从图中可以看出，在 S 到 R 的信道很好的时候，DF 的性能优于 EF，S 到 R 的信道较差的时候，EF 的性能优于 DF 的性能. 而 DF 结合 EF 的方法综合了二者的优点性能是最好的.

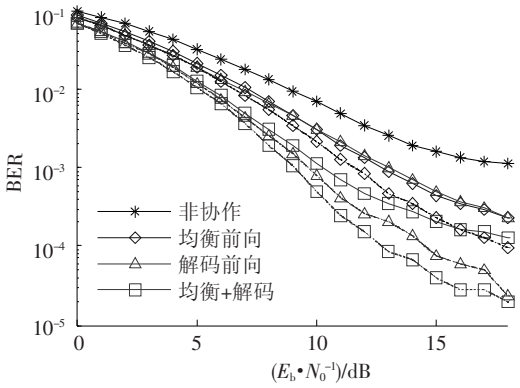

图 2　S 到 R 的平均 E_b/N_0 不同时协作系统性能比较

图 3 是 S 到 R 在其他信道参数不同时不同协作分集方法的性能仿真. 图中实线表示 $L_{S-D} = 8$，$L_{R-D} = 8$，$L_{S-R} = 4$ 的情况，虚线表示 $f_D T = 0.003\,6$ 的情况. 同样可以看出，DF 结合 EF 的方法性能最优，而 EF 与 DF 的性能各有优劣，与图 2 比较来看，$f_D T$ 的变化对系统性能影响不大.

图 4 是协作伙伴信道参数不同时协作系统性能仿真. 从图中可以看出，S 到 R 信道越好，协作系统性能越好，而 $f_D T$ 的变化对系统的性能影响不大. S 到 R 的独立路径数同样对系统性能影响不大，而 R 到 D 的独立路径数变化对性能有较大的影响，在信道较差的区域路径数多的性能好，在信道较好的区域路径数少的性能好. 因此在选择协作用户的时候要根据自身信道的状态选择合适协作伙伴才能保证性能最优.

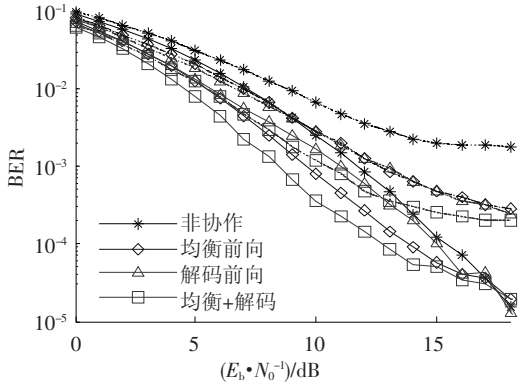

图 3　S 到 R 信道参数不同时协作系统性能比较

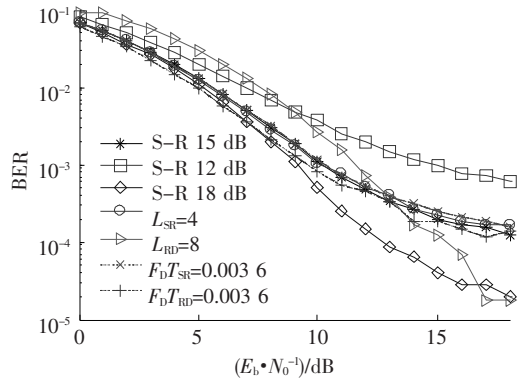

图 4　协作伙伴信道参数不同时协作系统性能比较

图5 是协作伙伴信道强度不同时协作系统性能仿真. 从图中可以看出,S 到 R 的参数 m 对系统的影响较大,而 R 到 D 的参数 m 对系统的影响不大,并且 R 到 D 的信道强度对系统性能的影响一般来说也小于 S 到 R 的信道强度的影响. 因此在选择协作伙伴的时候应该主要考虑 S 到 R 的信道[12],选取 S 到 R 信道最优的用户作为协作伙伴,在这个基础上再考虑 R 到 D 的信道.

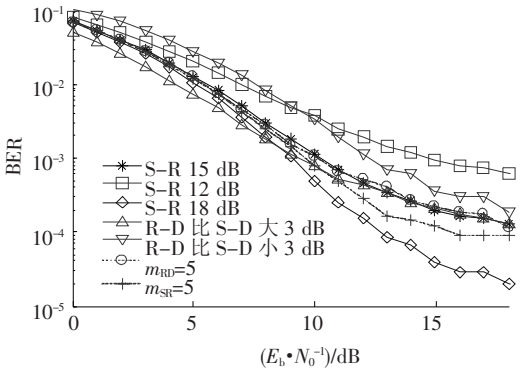

图 5　协作伙伴信道强度不同时协作系统性能比较

4　结　论

本文分析了频率选择性信道下基于单载波频域均衡技术的协作分析方法的性能. 提出了一种 EF 协作方法,并把 EF 协作与 DF 协作相结合以提高系统性能,并分析了协作伙伴信道状态对协作性能的影响. 结果显示,文中提出的 EF 协作方法可以获得分集增益, DF 结合 EF 的协作方法性能最优. S 到 R 的信道状态对系统性能的影响要大于 R 到 D 的信道状态的影响,因此在选择协作伙伴的时候主要考虑 S 到 R 的信道强度、参数 m 以及 R 到 D 的独立路径数,同时兼顾其他参数.

参考文献:

[1] ALAMOUTI S M. A simple transmit diversity technique for wireless communications [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1998, 16(8): 1451 – 1458.

[2] NOSRATINIA A, HUNTER T E, HEDAYAT A. Cooperative communication in wireless network [J]. IEEE Communications Magazine. 2004, 42(10): 74 – 80.

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

[4] 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.

[5] FALCONER D, ARIYAVISITAKUL S L, BENYAMIN-SEEYAR A, *et al.* Frequency domain equalization for single-carrier broadband wireless systems [J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(4): 58 – 67.

[6] KWON U, CHOI C, IM G. Full-rate cooperative communications with spatial diversity for half-duplex uplink relay channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(11): 5449 – 5454.

[7] XIONG H, XU J, WANG P. Frequency-domain equalization and diversity combining for demodulate-and-forward cooperative systems [C]//Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Piscataway: IEEE, 2008: 3425 – 3428.

[8] MHEIDAT H, UYSAL M. Impact of receive diversity on the performance of amplify-and-forward relaying under APS and IPS power constraints [J]. IEEE Communications Letters, 2006, 10(6): 468 – 470.

[9] NABA R U, BÖLCSKE H, KNEUBÜHLER F W. Fading relay channels: performance limits and space—time signal design [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2004, 22(6): 1099 – 1109.

[10] TORABI M, AJIB W, HACCOUN D. Performance analysis of amplify-and-forward cooperative networks with relay selection over Rayleigh fading channels [C]//Proceedings of IEEE 69th Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE, 2009:1 – 5.

[11] ZHANG Z, WANG J, MENG W. Gain and cost analysis in cooperative diversity systems [C]//Proceedings of the 12th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications. Sendai: NICT, 2009:1 – 4.

[12] 王荆宁, 沙学军, 卢为党, 等. 改进的集中式协作用户选择方法[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(8): 64 – 67.

(编辑　张　宏)