

文章编号: 1672-2892(2012)02-0143-05

正交频分复用技术在协作通信下的应用

胡 强, 林飞飞, 覃团发

(广西大学 计算机与电子信息学院, 广西 南宁 530004)

摘 要: 协作分集技术利用其他用户进行协作传输, 可以获得一定的分集增益, 但是在频率选择性衰落信道下性能不很乐观。为了对抗频率选择性衰落, 采用正交频分复用(OFDM)技术与协作分集技术相结合的方法, 研究了基于 OFDM 技术的协作通信, 对在不同调制技术、不同信道估计方法下系统的性能进行了比较, 为了进一步提高系统性能, 对传统 S&C 算法进行了改进并应用于该系统中, 仿真实验结果表明, 改进的定时同步算法性能优于传统的 S&C 算法。

关键词: 协作分集; 正交频分复用; 信道估计; 频率选择性衰落; S&C 算法

中图分类号: TN911.72; TP317.4

文献标识码: A

Performance analysis of OFDM cooperative communication systems

HU Qiang, LIN Fei-fei, QIN Tuan-fa

(College of Computer and Electronic Information, Guangxi University, Nanning Guangxi 530004, China)

Abstract: Cooperative diversity transmission can get some diversity gain through the collaboration of other users, whereas the frequency selective fading channel performance is not optimistic. To counteract frequency selective fading, Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM) technology and cooperative diversity combining method are adopted to study collaborative communication based on OFDM technology. The system performance in different modulation techniques and different channel estimation methods is compared. The traditional S&C(Schmidl and Cox) algorithm is improved and applied to the system in order to further improve its performance. Simulation results show that the performance of improved timing synchronization is superior to that of the traditional S&C algorithm.

Key words: cooperative diversity; OFDM; channel estimation; frequency selective fading; S&C algorithm

协作分集技术近年来成为众多学者研究的热点问题, 主要是由于其可以在不增加硬件设备的条件下, 用户之间相互协作传输, 在空间上形成虚拟天线阵列, 从而获得一定的分集增益。尽管如此, 现在大多数的研究都还是基于平坦衰落信道, 如何把现有的研究成功移植到频率选择性衰落信道中, 仍是一个关键问题。正交频分复用技术作为 4G 关键技术, 也是当前的热点研究领域。特别是由于其各子载波间具有正交性, 可以有效抵抗频率选择性衰落。文献[1]提出了协作与 OFDM 技术相结合的理论, 利用 OFDM 的抗衰落性来抑制频率选择性衰落。文献[2]则在此基础上提出了一种基于 OFDM 的协作传输策略。尽管如此, 协作与 OFDM 的结合还不完善, 特别是还没有分析系统的同步问题、OFDM 系统的高峰值平均功率比(Peak to Average Power Ratio, PAPR)问题。基于此, 首先改进 OFDM 协作传输系统, 完善协作节点之间的链路传输, 使系统模型趋于现实化; 其次分析比较了不同调制方式下, 采用不同信道估计的系统性能; 再次, 对基于 OFDM 系统的 S&C 算法进行了改进, 并应用于 OFDM 协作传输系统中。

1 系统模型

1.1 协作通信模型

基于传统三节点协作通信模型^[3], 协作模型如图 1 所示。转发协议采用译码转发(Decode Forward, DF)方式。

收稿日期: 2011-02-28; 修回日期: 2011-03-21

基金项目: 广西教育厅研究生创新计划资助项目(105931003081)

考虑时分双工模式,每一次协同通信的过程在时间上被分为2个时隙:广播时隙和协同时隙。在广播时隙,源节点(S)发送信息,协同节点(R)和目的节点(D)接收信息,R按照DF方式进行解码转发(如果R解码正确,则进行协作,否则S重传信号至D),D则暂时保存该信息。在协作时隙,R转发信息给D,D接收R的信息后,按照一定的合并准则将此时的接收信号与之前保存的信号进行合并,接着对合并信息解码并进行CRC校验,最后获得源信息。

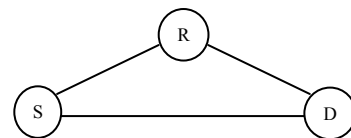


Fig.1 Cooperative communication model
图1 协作通信模型

1.2 OFDM 系统模型

如图2所示,OFDM原理是把一个高速的串行数据流通过串并变换分解为并行传输的并行数据流^[4]。OFDM各个子载波之间存在正交性,允许子信道的频谱相互重叠,与常规的频分复用技术相比,其可以最大限度地利用频谱资源。当子载波个数很多时,系统的频谱利用率接近于2 Baud/Hz^[4]。

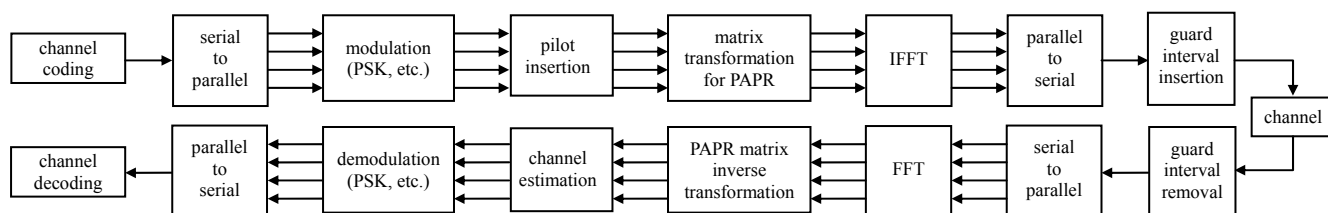


Fig.2 OFDM system model
图2 OFDM 系统模型

2 系统性能分析

2.1 PSK 和 QAM 调制方法

PSK 调制也称为相移键控调制,主要对相位进行调制,把比特流映射到 $M = 2^k$ 个可能的相位上,其中 k 是每个传输符号的信息比特数, M 为调制系数。本文 PSK 调制采用 $M=4$ 的 4PSK,设经过调制后的信号为 $U(t)$,则

$$U(t) = ag_T(t) \cos(2\pi f_c t + \frac{2\pi m}{M}), m = 0, 1, L, M-1 \quad (1)$$

式中: $g_T(t)$ 是发送滤波器的脉冲形状; a 是信号幅度。

QAM 信号包含 2 个正交的载波 $\cos(2\pi f_c t)$ 和 $\sin(2\pi f_c t)$, 其中每个都被一个独立的信息比特所调制。对应的 QAM 调制信号有如下形式:

$$u_m(t) = a_{mc}g_T(t)\cos(2\pi f_c t) + a_{ms}g_T(t)\sin(2\pi f_c t), m = 1, 2, L, M \quad (2)$$

式中 a_{mc} 和 a_{ms} 是幅度电平,通过将 k 比特的序列映射到信道的幅度而得到。

2.2 信道估计方法

1) 最小平方(Least Square, LS)信道估计^[5]

经过过去保护间隔、快速傅里叶变换以及降 PAPR 矩阵转换后的接收信号为:

$$Y(k) = X(k)H(k) + I(k) + W(k) \quad (3)$$

式中: $H(k)$ 是信道传递函数在第 k 个子载波上的响应; $X(k)$ 为传输信号; $I(k)$ 是信道间干扰(Inter-Channel Interference, ICI)在第 k 个子载波上的影响。LS 信道估计可以表示为:

$$\mathbf{H}_{LS} = \mathbf{X}^{-1}\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \frac{Y(0)}{X(0)} & \frac{Y(1)}{X(1)} & L & \frac{Y(N-1)}{X(N-1)} \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

为了使信道估计更为准确,本文的信道估计采用一阶线性插值法。设 c 为导频信号,对应于导频子载波上的信道冲激响应表示为:

$$\hat{H}_N^{\&}(mL) = \frac{Y_N(mL)}{c} = H_N(mL) + \frac{1}{c}(I_N(mL) + W_N(mL)), m = 0, 1, L, M-1 \quad (5)$$

式中 $\hat{H}_N^{\&}(mL)$ 是第 m 个导频子载波上的含噪信道响应。

采用一阶线性插值法,导频子载波对应的信道响应可以表示为:

$$\hat{H}_N^{\&}(k) = \hat{H}_N^{\&}(mL + l) = (1 - \frac{l}{L})\hat{H}_N^{\&}(mL) + \frac{l}{L}\hat{H}_N^{\&}(mL + L) \quad (6)$$

整理上式得:

$$\mathbf{H}_N^{\mathbf{H}}(k) = \left[\left(1 - \frac{l}{L}\right) \mathbf{H}_N^{\mathbf{H}}(mL) + \frac{l}{L} \mathbf{H}_N^{\mathbf{H}}(mL + L) \right] + \left[\left(1 - \frac{l}{L}\right) \frac{I_N(mL) + W_N(mL)}{c} + \frac{l}{L} \frac{I_N(mL + L) + W_N(mL + L)}{c} \right] \quad (7)$$

式中: $ML \leq k < mL + L$; $\mathbf{H}_N^{\mathbf{H}}(mL)$ 和 $\mathbf{H}_N^{\mathbf{H}}(mL + L)$ 是相邻的 2 个导频子载波上的信道传输函数。

2) 线性最小均方误差(Linear Minimum Mean Squared Error, LMMSE)信道估计^[5]

LMMSE 信道估计在一阶线性 LS 信道估计的基础上, 进行线性最小均方误差估计, 表达式为:

$$\mathbf{H}_{\text{LMMSE}} = \mathbf{R}_{\text{HH}}(\mathbf{R}_{\text{HH}} + \sigma_n^2(\mathbf{X}\mathbf{X}^{\text{H}})^{-1})^{-1} \mathbf{H}_{\text{LS}} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{R}_{\text{HH}}$ 为信道的自相关矩阵; σ_n^2 是噪声方差; 上标 H 表示共轭转置。进一步简化得到:

$$\hat{\mathbf{H}} = \mathbf{R}_{\text{HH}}(\mathbf{R}_{\text{HH}} + \frac{\beta}{R_{\text{SN}}} \mathbf{I})^{-1} \mathbf{H}_{\text{LS}} \quad (9)$$

式中: β 是星座调制的常数; $\mathbf{I}$ 为单位矩阵; R_{SN} 为信噪比。在 16QAM 下 $\beta=17/9$, 在 4PSK 下 $\beta=1$ 。

3) 基于 DFT 的信道估计^[6]

将 LS 算法得到的信道特性 $\mathbf{H}$ 进行离散傅里叶逆变换(Inverse Discrete Fourier Transform, IDFT)得到 $\mathbf{g}_{\text{LS}}$, $\mathbf{g}_{\text{LS}} = \text{IDFT}(\mathbf{H})$, 在时域内进行信道估计。在信道满足整数点抽样信道的情况下, 时域内的能量只集中在几个少数抽样点上, 因而可以在时域内进行信道估计。对 $\mathbf{g}_{\text{LS}}$ 进行线性变换得到 $\mathbf{g} = \mathbf{Q}\mathbf{g}_{\text{LS}}$, 再进行离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT), 得到 $\mathbf{H} = \text{DFT}(\mathbf{g})$ 。其中 $\mathbf{Q}$ 表示为:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{F}^{\text{H}}(\mathbf{R}_{\text{HH}}(\mathbf{R}_{\text{HH}} + (\beta / R_{\text{SN}})\mathbf{I}))^{-1} \mathbf{F} \quad (10)$$

式中 $\mathbf{F}$ 是 N 维的 DFT 矩阵: $[W_N^{ik}]_{i,k=0,1,L,N-1}$, $W_N^{ik} = \frac{e^{-j2\pi \frac{ik}{N}}}{\sqrt{N}}$, $j = \sqrt{-1}$ 。

3 OFDM 协作传输系统同步算法

3.1 S&C 符号定时算法

S&C 算法是基于训练序列的符号同步和载频同步的联合估计算法^[7-10], S&C 算法的训练序列结构如图 3。

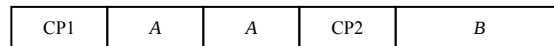


Fig.3 S&C algorithm training sequence structure

图 3 S&C 算法训练序列结构

S&C 算法的时域训练符号表示为: $\mathbf{X}_{\text{sch}} = [\mathbf{A}\mathbf{A}]$, $\mathbf{A}$ 表示复伪随机序列 PN_1 进行 $N/2$ 点快速傅里叶逆变换后的序列, 前 2 个 $\mathbf{A}$ 为训练符号 1; $\mathbf{B}$ 是训练符号 2, 传输已知信息, 在偶数子载波上传输长度为 $N/2$ 的伪随机序列 PN_2 , 它与 PN_1 对应项的比值为:

$$v(k) = \frac{PN_2(k)}{PN_1(k)}, k = 1, 2, L, N/2 \quad (11)$$

这个比值用于整数倍估计。

接收端进行符号定时同步估计, 利用训练序列前后两部分的相关性确定同步位置。可以用相关函数:

$$P(d) = \sum_{m=0}^{N/2-1} r_{d+m}^* r_{d+N/2+m} \quad (12)$$

表示信号中 2 个相距 $N/2$ 点, 长度为 $N/2$ 的数据段间的相关性, 式中 d 表示一个具有 $N/2$ 个样本的窗口中第 1 个样本对应的时间下标, 上标 '*' 表示复共轭。接收序列后半部分的能量为:

$$R(d) = \sum_{m=0}^{N/2-1} |r(d + N/2 + m)|^2 \quad (13)$$

用于对定时测度进行归一化。对应符号定时度量函数为:

$$M_{\text{sch}}(d) = \frac{|P(d)|^2}{R^2(d)} \quad (14)$$

当 $M_{\text{sch}}(d)$ 取得最大值时所对应的 d 为 d_{max} , 它就是所要找的定时同步位置。 $R(d)$ 是取运算数据的模值, 只起到对 $P(d)$ 进行能量归一化的作用。

3.2 改进的 S&C 算法

原始的 S&C 定时估计算法由于定时估计位置超前正确的位置而落入循环前缀内,即使每个样点值一一对应,在其整个定时估计曲线范围内也会有峰值出现。为了抑制峰值的出现,同时避免估计落入循环前缀内,在 S&C 算法的基础上利用训练序列的循环前缀设定一个滑动运算窗口对序列进行进一步归一化。设定循环前缀的长度为 l , 符号长度为 L , 定时度量函数:

$$M(d) = \frac{1}{L} \sum_{l=-l+1}^L \sum_{i=0}^0 M_{sch}(d-i) \quad (15)$$

4 仿真结果分析

4.1 仿真参数设置

OFDM 协作通信系统信道子载波数设为 512, 每载波符号数为 12, 每符号比特数为 2, 多普勒频移为 100 Hz, 多径数为 6, 多径幅度为 $[0.123 \ 0.3 \ 0.4 \ 0.5 \ 0.7 \ 0.8]$, 各径延迟为 $[2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 9 \ 13]$, 保护间隔长度为 20, 大于多径时延的最大长度, 因此可以不考虑 OFDM 的符号间干扰。系统采样周期 $T=1$, 相移为 $[90 \ 0 \ 72 \ 144 \ 216 \ 288] \times \pi/180 (\pi=3.14)$ 。采用卷积编码与交织的级联码。

4.2 仿真结果

图 4 是 QPSK 调制下采用不同的信道估计方法的系统性能比较, 由图可知采用基于 DFT 的信道估计时系统性能最佳, 采用 LS 算法时次之, 而采用 LMMSE 算法时最差。图 7 是 QAM 调制下采用不同的信道估计方法的系统性能比较, 当采用基于 DFT 的信道估计时系统性能最佳, 采用 LMMSE 算法时次之, 而采用 LS 算法时最差。

图 5 是改进的协作传输系统与传统的 CRC-DF(Decode Forward using Cyclic Redundancy Check, CRC-DF)传输系统的性能比较, 很明显, 改进的系统性能优于传统系统性能, 优于直接传输性能。因为信道编码可以提高系统的纠错能力, 使系统获得一定的编码增益, 同时也提高了分集增益, 而由于 OFDM 信号传输过程的最大缺点是会产生较大的峰均比问题, 严重影响系统的性能, 在传统的 OFDM 协作传输系统中没有对其进行抑制, 而改进的系统加入了对 PAPR 抑制的模块, 采用矩阵变换的形式降低 PAPR 的影响, 因此较之传统协作系统, 性能有一定提高。

图 6 是原始 S&C 定时估计算法与改进算法的比较, 从图中可以看到改进的算法获得了比较好的尖峰, 抑制了平台的出现, 定时估计的位置更为精准。图 7 和图 8 是把改进后的定时估计算法应用于 OFDM 协作传输系统, 由于定时位置更为准确, 系统获得了比原系统更好的同步效果, 原系统采用长短序列进行频偏估计和同步。

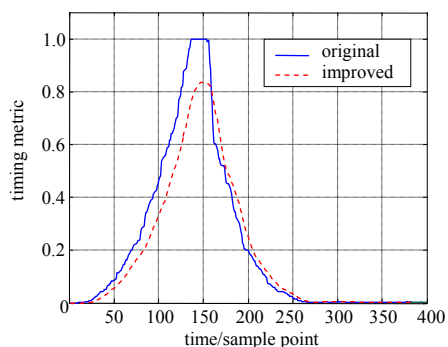


Fig.6 Comparison between the S&C algorithm and the improved algorithm
图 6 改进算法与 S&C 算法比较

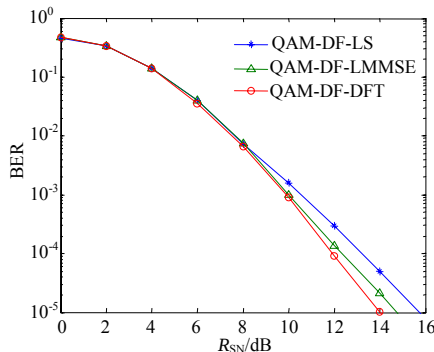


Fig.7 Performance comparison of QAM modulation with different channel estimation schemes
图 7 QAM 调制下不同信道估计方案性能

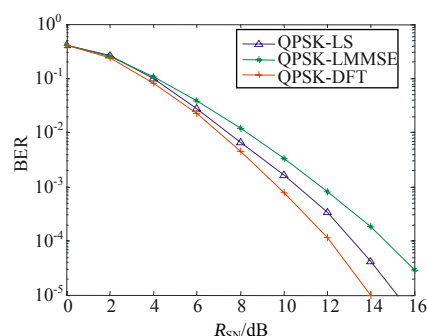


Fig.4 Performance of QPSK modulation with different channel estimation algorithms
图 4 QPSK 调制下不同信道估计算法性能

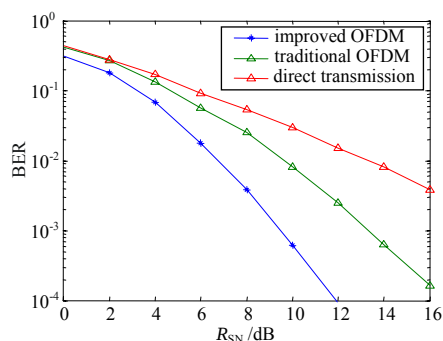


Fig.5 Performance comparison among the improved collaboration, the traditional system, and the forward pass
图 5 改进协作传输与传统系统、直传性能比较

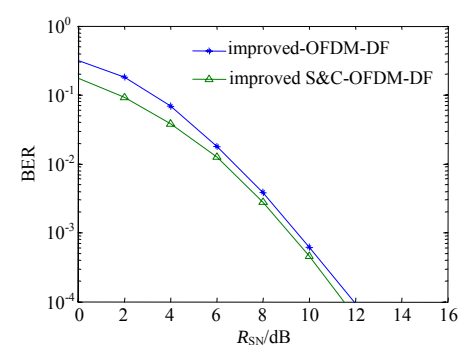


Fig.8 Performance comparison between the improved S&C system timing synchronization and the original system
图 8 改进 S&C 定时同步算法与原系统性能比较

5 结论

为提高 OFDM 协作通信系统的性能,研究了 S&C 及其同步改进算法,取得了较好的仿真结果,实际应用的效果仍需进一步研究。

参考文献:

- [1] Barbarossa S, Scutari G. Distributed space-time coding for multihop networks[C]// Proceedings of 2004 IEEE International Conference on Communications. Paris:[s.n.], 2004:916–920.
- [2] 马绪,王呈贵,邱伟. 一种基于 OFDM 的协同通信策略[J]. 电讯技术, 2009,49(2):43–46.
- [3] Chakrabarti A, Erkip E, Sabharwal A. Code designs for cooperative communication[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007,24(5):16–26.
- [4] 王文博,郑侃. 宽带无线通信 OFDM 技术[M]. 北京:人民邮电出版社, 2003.
- [5] 陈玮玮,王天宝,王保强. 基于导频序列的 OFDM 信道估计性能分析[J]. 成都信息工程学院学报, 2007,22(3):352–354.
- [6] Edfors O, Sandell M, Van D B. Analysis of DFT-Based Channel Estimators for OFDM[J]. Wireless Personal Communications, 2000,12(1):55–70.
- [7] Timothy M Schmid, Donal C Cox. Robust Frequency and Timing Synchronization for OFDM[J]. IEEE Transactions on Communications, 1997,45(12):1613–1621.
- [8] Park Byungjoon, Cheon Hyunsoo, Kang Changion, et al. A novel Timing Estimation Method for OFDM Systems[J]. IEEE Communication Letters, 2003,7(5):239–241.
- [9] 刘仲,马杨军. 基于 S&C 算法的 OFDM 符号同步优化设计[J]. 电子器件, 2009,32(6):1087–1090.
- [10] 黎锁平,陈伟儒,湛兴祥,等. 基于训练序列的 OFDM 系统定时同步改进算法[J]. 信号处理, 2011,27(7):1095–1099.

作者简介:



胡 强(1975–), 男, 广西贺州人, 学士, 副教授, 研究方向为数字音、视频信号处理技术、智能化电路设计、数字语音处理与通信新技术等.email:425038224@qq.com.

林飞飞(1985–), 男, 广西贺州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为协作通信、OFDM 宽带通信.

覃团发(1975–), 男, 南宁市人, 博士生导师, 教授, 主要研究方向为网络编码、OFDM 技术.

勘误:

2012 年第 10 卷第 1 期封面三图中图 2 的右面 2 张分图的标注:“after timing recover”从左至右应分别更正为“after equalization”和“after carrier recover”。

2012 年第 10 卷第 1 期第 36 页 作者简介:“杨彦东(1985–), 男, 成都市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为 SOI 高压器件设计、功率集成技术研究.email:guanxu_jining@126.com. 周小林(1988–), 女, 成都市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为 SOI 高压器件设计、功率集成技术研究。”应更正为“杨彦东(1987–), 男, 上海市人, 在读硕士研究生, 研究方向为自由空间光通信、无线通信算法.email:09210720104@fudan.edu.cn. 周小林(1973–), 男, 上海市人, 博士, 讲师, 从事信号处理、自由空间光通信研究。”

因本刊的失误, 向相关作者深表歉意!