论 文

多基站协作通信系统的频偏补偿策略

赵力强^{①②*}, 刘志伟^①, 张忠浩^③

① 西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室, 西安 710071

② 东南大学移动通信国家重点实验室, 南京 210096

③ 陕西省电力公司, 西安 710048

* 通信作者. E-mail: lqzhao@mail.xidian.edu.cn

收稿日期: 2013-01-19; 接受日期: 2013-05-03

高等学校学科创新引智计划 (批准号: B08038)、国家高技术研究发展计划 (批准号: 2012AA120604)、欧盟科技第 7 框架计划 MONICA 项目 (批准号: PIRSES-GA-2011-295222)、东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金 (批准号: 2012D01) 和国家自然科学基金 (批准号: 61372070) 资助项目

摘要 在多基站协作通信系统中, 为了获得空间分集或复用增益, 协作基站同时同频向多个终端发送数据, 而终端同时同频收到多个具有不同频偏的信号. 基站或终端不能通过预补偿或后补偿方法独立解决多基站多用户频偏补偿问题. 针对这一难题, 本文提出基于最大可容忍剩余频偏的收发联合补偿策略. 仿真结果表明: 该策略虽然不能完全消除多基站多用户频偏, 但可将其控制在可容忍范围内.

关键词 多基站协作通信系统 载波频率偏差补偿 预补偿 后补偿 可容忍剩余频偏

1 引言

随着 IMT-Advanced 技术的演进, 为了满足用户 (尤其是小区边缘用户) 不断提高的服务质量 QoS(quality of service) 需求, 下一代宽带无线移动通信系统出现了一系列无线新技术, 比如, 增强型多输入多输出 MIMO(multiple input multiple output) 技术^[1~4]. 采用空时编码 STC(space-time coding) 技术, MIMO 系统可获得空间分集或复用增益, 在不增加系统带宽和发射功率的前提下, 有效对抗无线衰落, 显著提高频谱利用率. 然而, 受小区间干扰的限制, 小区边缘用户的 QoS 仍很难保证, 边缘吞吐量较低. 因此, 必须引入多点多用户协作通信技术, 比如, 协作多点 CoMP(coordinated multiple points) 技术^[5~7]. 但增强型技术涉及的某些关键问题还有待解决, 如在高速移动环境下, 多基站协作发送/多用户接收的同步协调问题^[8,9].

以正交频分多址接入 OFDMA(orthogonal frequency division multiple access) 系统为例, 基站与终端晶振频率的差异、终端相对运动引起的多普勒效应, 都会造成发射端与接收端之间的载波频率偏移 CFO(carrier frequency offset), 破坏子载波间的正交性, 导致误码率 BER(bit error rate) 升高^[10]. 在单点对多用户通信系统中, 各用户可以分别估计并补偿各链路的载波频偏, 即后补偿策略^[11~13]. 在多点对单用户通信系统中, 用户估计各链路的载波频偏后反馈给基站, 基站据此调整发送信号的频率, 以满足用户的同步需求, 即预补偿策略^[14~16]. 然而, 这些策略在多基站协作通信系统中是无效的. 此

引用格式: 赵力强, 刘志伟, 张忠浩. 多基站协作通信系统的频偏补偿策略. 中国科学: 信息科学, 2013, 43: 1472-1482, doi: 10.1360/112012-295

图 1 多基站协作通信系统模型

Figure 1 The multi-base station cooperative communication system model

时, 多个协作基站同时同频向多个终端发送数据; 而每个终端同时同频接收多个基站的数据, 每条链路的频偏可能都不同. 因此, 不可能通过基站的预补偿或终端的后补偿来消除各链路的频偏. 各条链路的剩余频偏可能较大, 不仅造成信道的时变而且会带来较大的载波间干扰 ICI(inter-carrier interference) 和多用户干扰 MUI(multi-user interference)^[17,18]. 到目前为止, 多基站协作通信系统的频偏补偿策略仍然是一个公开的难题.

2 多基站协作通信系统模型

在多基站协作通信系统中 M_T 个协作基站 BS(base station) 为 M_R 个终端 UE(user equipment) 服务, 系统模型如图 1 所示. 本文主要研究多基站协作通信系统的频偏补偿策略, 因此, 不涉及点对点链路的频偏估计问题. 假定各基站已实现准确的时间同步, 信道反馈时延足够小, 而且已知各自 M_R 条链路的信道状态信息 CSI(channel state information) 与频偏^[19,20]. 通过交换各自的信息, 基站可获得所有 $M_T * M_R$ 条链路的 CSI 和频偏. 然后, 基站间相互协作发送数据, 形成一个虚拟的 MIMO 系统, 可获得空间分集或复用增益.

以下行链路为例, 假设从基站 BS_i 到终端 UE_j 的信号为 $s_{ij}(i = 1, 2, \dots, M_T; j = 1, 2, \dots, M_R)$, 其载波频偏为 f_{ij} . 由于各用户可能以不同的速度向不同的方向移动, 导致不同的多普勒频移; 再考虑到发射端与接收端晶振频率的偏差, 造成多基站协作通信系统中 $M_T * M_R$ 个点链路的频偏可能差别很大. 此时, 每个基站在同一个时隙同一个载波上, 向 M_R 个终端发送数据; 而每个终端将在同一个时隙同一个载波上, 接收到来自 M_T 个基站的具有不同频偏的信号. 因此, 造成多点多用户频偏补偿问题.

首先, 基站对信号进行预补偿, 设预补偿值分别为 $x_1, x_2, \dots, x_{M_T}$. 其次, 终端 UE_j 对接收到的信号再进行后补偿, 设后补偿值为 y_j . 经预补偿与后补偿后, 如果能够完全消除频偏, 即 UE_j 接收到的 M_R 个信号的剩余频偏为零:

$$f_{1j} - x_1 - y_j = f_{2j} - x_2 - y_j = f_{3j} - x_3 - y_j = \dots = f_{M_T j} - x_{M_T} - y_j = 0. \quad (1)$$

上式可转化为矩阵形式:

$$\mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{F}_j. \quad (2)$$

M_T 个基站 M_R 个终端确定的系数矩阵为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 0 & -1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & -1 \end{bmatrix}_{(M_T-1)*M_T}. \quad (3)$$

M_T 个基站对应的预补偿频偏量矩阵为

$$\mathbf{X} = [x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_{M_T}]^T. \quad (4)$$

终端 UE_j 对应系数矩阵 $\mathbf{A}$ 的链路频偏差分矩阵为

$$\mathbf{F}_j = [f_{1j} - f_{2j} \ f_{1j} - f_{3j} \ \cdots \ f_{1j} - f_{M_T j}]^T. \quad (5)$$

式 (2) 可解的充分必要条件为

$$f_{11} - f_{k1} = f_{12} - f_{k2} = \cdots = f_{1M_R} - f_{kM_R}, \quad k = 2, 3, \dots, M_T. \quad (6)$$

显然, 在实际通信中, 这是不可能满足的.

3 基于最大可容忍频偏的收发联合补偿策略

一方面, 传统的频偏预补偿与后补偿策略无法完全消除点多用户频偏. 另一方面, 各点对点链路可容忍一定频偏^[21,22]. 因此, 本文提出基于最大可容忍剩余频偏的收发联合补偿策略. 其基本思路是: 发送端对信号进行频偏预补偿, 接收端对信号进行频偏后补偿; 发送端根据系统的全局信息, 计算最佳的预补偿和后补偿量; 本策略并不能完全消除每条链路的频偏, 但所有链路的剩余频偏都在可容忍的频偏范围之内, 即满足解调的要求.

依据本策略, 多基站协作通信系统频偏补偿可建模为不等约束条件下的最优化问题:

$$\begin{cases} \min_{x_i, y_j} \|r_{ij}\|^2 = \min_{x_i, y_j} \|f_{ij} - x_i - y_j\|^2, \\ s.t. \max(|r_{11}|, |r_{12}|, \dots, |r_{ij}|, \dots, |r_{M_T M_R}|) \leq \delta. \end{cases} \quad (7)$$

$\|\cdot\|^2$ 为 2 范数函数, δ 为最大可容忍剩余频偏, r_{ij} 为经基站 BS_i 频偏预补偿和终端 UE_j 频偏后补偿后的链路剩余频偏.

为了求解上述优化问题, 基站需根据全局信息, 同时求解出预补偿值 (即 x_i) 和后补偿值 (即 y_j). 此外, 基站还需设法将后补偿值发送给各终端. 计算复杂度高、实现困难. 因此, 本文将松弛矩阵

$D = [d_1^1, d_1^2, \dots, d_n^m, \dots, d_{M_R}^{M_T-1}]^T, 1 \leq n \leq M_R, 1 \leq m \leq M_T - 1$, 引入式 (2), 得到

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}\mathbf{X} \\ \mathbf{A}\mathbf{X} \\ \vdots \\ \mathbf{A}\mathbf{X} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_1 \\ \mathbf{F}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{F}_{M_R} \end{bmatrix} + \mathbf{D}, \quad (8)$$

松弛因子 $d_n^m = r_{(m+1)n} - r_{1n}$, 应小于最大可容忍剩余频偏 δ .

此时, 系统模型可简化为

$$\begin{cases} \min_{x_1, x_2, \dots, x_{M_T}} (\|\mathbf{D}\|^2) = \min_{x_1, x_2, \dots, x_{M_T}} \sum_{j=1}^{M_R} (\|\mathbf{A}\mathbf{X} - \mathbf{F}_j\|^2), \\ s.t. \max(|d_1^1|, |d_1^2|, \dots, |d_{M_R}^{M_T-1}|) \leq \delta. \end{cases} \quad (9)$$

基站利用凸优化技术 (如线性最小二乘法) 求解上式, 可获得预补偿矩阵 $\mathbf{X}$:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{A} \\ \vdots \\ \mathbf{A} \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} \mathbf{F}_1 \\ \mathbf{F}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{F}_{M_R} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$[\]^+$ 表示广义逆矩阵. 将最小二乘解 $\mathbf{X}$ 带入式 (8) 可求出松弛量 $\mathbf{D}$:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}\mathbf{X} \\ \mathbf{A}\mathbf{X} \\ \vdots \\ \mathbf{A}\mathbf{X} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{F}_1 \\ \mathbf{F}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{F}_{M_R} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

然后, 判断松弛因子是否小于最大可容忍剩余频偏 δ . 如果满足要求, $\mathbf{X}$ 就是最优的预补偿矩阵. 若不满足要求, 则本策略失败, 即不能通过基于最大容忍剩余频偏的联合补偿达到多点多用户频率同步要求, 此时无法构建多基站协作通信系统. 但多个协作基站可以向某个终端发送数据, 这时, 基站可以通过预补偿来消除频偏影响; 某个基站也可以向多个协作终端发送数据, 这时, 终端可以通过后补偿实现频率同步.

经预补偿后, 基站分别向各终端发送协作信号; 终端接收到 M_T 个信号后, 可估计出各接收信号经基站频偏预补偿后的剩余频偏, 再独立进行后补偿. 信号的剩余频偏分别为 $f_{11} - x_1, f_{12} - x_1, \dots$, 和 $f_{M_T M_R} - x_{M_T}$. 后补偿值为

$$y_j = [\max(f_{1j} - x_1, f_{2j} - x_2, \dots, f_{M_T j} - x_{M_T}) + \min(f_{1j} - x_1, f_{2j} - x_2, \dots, f_{M_T j} - x_{M_T})]/2, \quad (12)$$

此时, 基站与终端分别独立计算预补偿与后补偿值, 基站亦无需将同时计算情况下的后补偿值发送给终端, 算法复杂度大大降低. 经过收发补偿后, 基站 BS_i 到终端 UE_j 的信号 s_{ij} 的剩余频偏为

图 2 基于可容忍剩余载波频偏的联合补偿算法

Figure 2 Joint compensation with controllable residual CFOs

$$\begin{aligned}
 & f_{ij} - x_i - y_j \\
 &= f_{ij} - x_i \\
 &\quad - [\max(f_{1j} - x_1, f_{2j} - x_2, \dots, f_{M_T j} - x_{M_T}) + \min(f_{1j} - x_1, f_{2j} - x_2, \dots, f_{M_T j} - x_{M_T})]/2 \\
 &\in [\min(f_{1j} - x_1, f_{2j} - x_2, \dots, f_{M_T j} - x_{M_T}), \max(f_{1j} - x_1, f_{2j} - x_2, \dots, f_{M_T j} - x_{M_T})] \\
 &\quad - \max(f_{1j} - x_1, f_{2j} - x_2, \dots, f_{M_T j} - x_{M_T}) + \min(f_{1j} - x_1, f_{2j} - x_2, \dots, f_{M_T j} - x_{M_T})/2 \\
 &= [\min(f_{1j} - x_1, f_{2j} - x_2, \dots, f_{M_T j} - x_{M_T}) - \max(f_{1j} - x_1, f_{2j} - x_2, \dots, f_{M_T j} - x_{M_T})/2 \\
 &\quad \max(f_{1j} - x_1, f_{2j} - x_2, \dots, f_{M_T j} - x_{M_T}) - \min(f_{1j} - x_1, f_{2j} - x_2, \dots, f_{M_T j} - x_{M_T})/2] \\
 &\subseteq [-\delta, \delta].
 \end{aligned} \tag{13}$$

显然, 经基站预补偿与终端后补偿的联合频偏补偿后, 各链路仍然存在剩余频偏, 但每条链路的剩余频偏均小于最大可容忍剩余频偏 δ , 各终端仍然可以正确解调信息。

综上所述, 基于最大可容忍频偏的收发联合补偿策略的流程如图 2 所示。

4 仿真结果与分析

本文以 IMT-Advanced 系统下行链路为例, 采用计算机仿真, 评估多点多用户频偏补偿策略的性能。为了简化仿真, 本文只考虑两点两用户协作通信, 各个基站到各个终端的信道为时变的 Rayleigh 单径衰落信道。仿真模型主要参数如表 1 所示。假设移动终端可达到的最大移动速度为 500 km/h, 则可得最大多普勒频移为 1065 Hz, 从而相对于子载波间隔的归一化值为 0.07。由于在实际通信中, 载波频移还会受到晶振漂移等其他影响, 所以实际的多普勒频偏值可能要大于这个值。仿真中假设 4 条链路的归一化频偏分别为 0.16, 0.10, 0.06 和 0.08。根据实践经验, OFDM 系统能正确解调信息的频偏

表 1 仿真参数
Table 1 Simulation parameters

Frequency band	2.3 GHz	Bandwidth	5 MHz
Sampling frequency	7.68 MHz	Subcarrier spacing	15 kHz
FFT size	512	CP length	36
Modulation	QPSK	Maximum tolerable CFO	0.02
Channel	Multipath rayleigh fading	Maximum tolerable STO	36

图 3 剩余子载波频偏

Figure 3 Residual CFOs

要求为 $f \leq 0.02$, 因此, 假设最大可容忍剩余频偏 $\delta=0.02$. 每条链路的信干噪比 SINR(signal to interference plus noise ratio) 为终端在该链路上接收有用信号功率与干扰信号 (即噪声和频偏带来的干扰) 功率的比, 此处以信噪比 SNR(signal to noise ratio) 为 25 dB 时情况为例进行分析.

若采用预补偿或后补偿策略, 补偿后某些链路的剩余频偏可能很小; 而其它链路的剩余频偏可能很大, 远远大于最大可容忍频偏, 如图 3 所示. 若采用本策略, 则计算可得预补偿量 $\mathbf{X} = [x_1, x_2]^T = [0.03, -0.03]^T$, 后补偿量 $\mathbf{Y} = [y_1, y_2]^T = [0.11, 0.09]^T$; 4 条链路的剩余频偏均小于最大可容忍频偏. 因此, 本策略的信干噪比和误码率均优于预补偿与后补偿策略, 如图 4、5 所示. 由于经收发联合补偿后仍存在剩余频偏, 本策略的性能不如理想曲线 (即不存在频偏). 但在本策略中, 两个终端的 BER 性能几乎一致, 而在预补偿和后补偿策略中, 两个终端的性能差别很大. 以后补偿策略为例, 基本可以消除终端 UE₂ 的剩余频偏, 其 SINR 较大, BER 性能非常逼近理想曲线; 而终端 UE₁ 的剩余频偏却较大, 其 SINR 较小, BER 远远大于 UE₂ (BER=10⁻³ 时, 信噪比约差 6 dB). 总之, 预补偿与后补偿策略分别适

图 4 不同链路的 SINR 性能分析 (SNR 等于 25 dB)

Figure 4 SINR performance of different links(SNR equals to 25 dB)

图 5 不同算法的 BER 性能分析

Figure 5 BER performance of different algorithms

用于多点单用户与单点多用户通信系统, 但不适用于多点多用户协作通信系统, 即多基站协作通信系统.

假设两点两用户协作通信系统中四条链路的归一化载波频偏均匀分布在区间 $[-\xi, \xi]$ 内, $0 \leq \xi \leq 0.5$. 若频偏过大, 无法得到满足要求的预补偿量 X 和松弛量 D , 则本策略失败, 本策略的成功概率如图 6 所示. 随着归一化最大频偏的增大, 成功补偿概率不断减小, 当 $\delta=0.02$ 且 $\xi \leq 0.1$ 时, 成功补偿概率可达 50% 以上; 随着最大可容忍剩余频偏的增大, 本策略成功补偿概率增大.

图 6 算法成功补偿概率

Figure 6 Successful compensation probability

图 7 存在子载波频偏估计误差时的算法性能分析

Figure 7 Joint compensation with imperfect CFO estimation

在上述仿真和分析中, 本文假设基站和终端可以获得准确的频偏估计, 然而, 在实际通信中, 必然存在着频偏估计误差. 假定最大频偏估计误差为 Δf , 各链路的频偏均匀分布在区间 $[f_{ij} - \Delta f, f_{ij} + \Delta f]$ 上. 由于存在频偏估计误差, 本策略的性能略有下降, 为了充分研究估计误差对本算法在多基站协作通信系统中的影响, 我们将系统设定为 3X3 多基站协作系统, 假设九条链路的归一化频偏分别为 0.17 0.19 0.14; 0.12 0.1 0.08; 0.25 0.24 0.17. 如图 7 所示, 当存在点对点链路估计误差时, 算法性能会随着

SNR 的提高而下降. $\Delta f=0.2$ 且 SNR 小于 14 dB 时, 联合补偿算法性能接近于完美估计情形, 当 SNR 大于 14 dB 时, 算法性能在 BER 为 10^{-4} 时会恶化 2 dB.

5 总结

本文提出基于最大可容忍频偏的收发联合补偿策略, 可有效地降低多点多用户频偏. 虽然经发送端预补偿和接收端后补偿后, 各链路仍存在剩余频偏, 但剩余频偏都在可容忍范围内, 各用户仍能准确解调信息. 仿真结果表明: 本策略可解决多基站协作通信系统中频偏补偿这一难题.

参考文献

- 1 Chalise B K, Vandendorpe L. Optimization of MIMO relays for multipoint-to-multipoint communications: nonrobust and robust designs. *IEEE Trans Signal Process*, 2010, 58: 6355–6368
- 2 Pun M O, Kim J K, Poor H V. Opportunistic scheduling and beamforming for MIMO-OFDMA downlink systems with reduced feedback. In: *Proceedings of ICC'08 IEEE International Conference on Communications*, Beijing, 2008. 688–692
- 3 Wang K, Wang X D, Xu W Q, et al. Coordinated linear precoding in downlink multicell MIMO-OFDMA networks. *IEEE Trans Signal Process*, 2012, 60: 4264–4277
- 4 Molteni D, Nicoli M, Spagnolini U. Performance of MIMO-OFDMA systems in correlated fading channels and non-stationary interference. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2011, 10: 1480–1494
- 5 Choi D, Lee D, Lee J H. Resource allocation for CoMP with multiuser MIMO-OFDMA. *IEEE Trans Veh Technol*, 2011, 60: 4626–4632
- 6 Karakayali M K, Foschini G J, Valenzuela R A. Network coordination for spectrally efficient communications in cellular systems. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2006, 13: 56–61
- 7 Xiao S H, Zhang Z P, Shi Z P. Clustered multi-point coordinating transmission systems with the reduced overhead. *J Commun*, 2010, 5: 493–500
- 8 Liu Y C, Lin K C, Su Y T. Initial synchronization for multi-cell OFDMA systems. In: *Proceedings of ICC'09 IEEE International Conference*, Dresden, 2009. 1–5
- 9 Wang H M, Xia X G, Yin Q Y. Distributed space-frequency codes for cooperative communication systems with multiple carrier frequency offsets. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2009, 8: 1045–1055
- 10 Huang Q F, Ghogho M, Wei J B, et al. Practical timing and frequency synchronization for OFDM-based cooperative systems. *IEEE Trans Signal Process*, 2010, 58: 3706–3716
- 11 Nasir A A, Durrani S, Kennedy R A. Blind timing and carrier synchronization in decode and forward cooperative systems. In: *Proceedings of ICC'2011 IEEE International Conference*, Kyoto, 2011. 1–6
- 12 Zhang Y Y, Zhang J H. Multiple CFOs compensation and BER analysis for cooperative communication systems. In: *Proceedings of WCNC 2009 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, Budapest, 2009. 1–6
- 13 Yang G, Wang C L, Wang H C, et al. A new synchronization scheme for OFDM-based cooperative relay systems. In: *Proceedings of GLOBECOM 2010 IEEE Global Telecommunications Conference*, Miami, 2010. 1–5
- 14 Du J, Lei X, Li S Q. Multiple frequency offsets pre-correction based on enhanced limited feedback precoding for distributed MIMO system. In: *Proceedings of WiCOM'08 4th International Conference*, Dalian, 2008. 1–5
- 15 Shin O S, Chan A M, Kung H T, et al. Design of an OFDM cooperative space-time diversity system. *IEEE Trans Veh Technol*, 2007, 56: 2203–2215
- 16 Li X H, Ng F, Han T. Carrier frequency offset mitigation in asynchronous cooperative OFDM transmissions. *IEEE Trans Signal Process*, 2008, 56: 675–685
- 17 Raghunath K, Chockalingam A. SIR analysis and interference cancellation in uplink OFDMA with large carrier frequency/timing offsets. *IEEE T Wirel Commun*, 2009, 8: 2202–2208

- 18 Zhang W, Lindner J. SINR analysis for OFDMA systems with carrier frequency offset. In: Proceedings of PIMRC'2007 IEEE 18th International Symposium on Digital Object Identifier, Athens, 2007. 1–5
- 19 Mehrpouyan H, Blosein S. Synchronization in cooperative networks: estimation of multiple carrier frequency offsets. In: Proceedings of ICC'2010 IEEE International Conference on Communications, Cape Town, 2010. 1–6
- 20 Yao Y W, Giannakis G B. Blind carrier frequency offset estimation in SISO, MIMO, and multiuser OFDM systems. IEEE Trans Commun, 2005, 53: 173–183
- 21 Koivisto T, Koivunen V. Impact of time and frequency offsets on cooperative multi-user MIMO-OFDM systems. In: Proceedings of PIMRC'2009 IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Tokyo, 2009. 3119–3123
- 22 Van J J, Sandell M, Borjesson P O. ML estimation of time and frequency offset in OFDM systems. IEEE Trans Signal Process, 1997, 45: 1800–1805

Carrier frequency offset compensation algorithm for multi-base stations cooperative communication system

ZHAO LiQiang^{1,2*}, LIU ZhiWei¹ & ZHANG ZhongHao³

¹ State Key Laboratory of Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an 710071 China;

² National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China;

³ State Grid Shaanxi Electric Power Company, Xi'an 710048, China

*E-mail: lqzhao@mail.xidian.edu.cn

Abstract In multi-base station cooperative communication systems, cooperative base stations (BSs) transmit to multiple user equipments (UEs) at the same time slots and carriers, in order to obtain spatial diversity or multiplexing gain. Therefore, a UE may receive several signals associated with different carrier frequency offsets (CFOs) simultaneously. It is impossible for BSs or UEs to pre- or post-compensate for the multiple CFOs respectively. We propose a joint pre- and post-compensation algorithm associated with relaxed residual CFOs. Simulation results show that the proposed algorithm is capable of substantially mitigating the CFOs of multi-base station cooperative systems though it cannot eliminate the multiple CFOs completely.

Keywords multi-base stations cooperative system, carrier frequency offsets compensation, pre-compensation, post-compensation, relaxed residual CFOs

member of IEEE.

ZHAO LiQiang was born in 1971. He received the Ph.D. degree in communication and information systems from the Xidian University, Xi'an City, in 2003. Currently, he is a professor at State Key Laboratory of Integrated Service Networks. His research interest includes broadband wireless access, green wireless communications, and space communication and heterogeneous network convergence. He is a

LIU ZhiWei was born in Shandong in 1987. He received the M.S. degree from Xidian University in 2013. His research interest includes LTE, MIMO, CoMP, OFDMA, Synchronization and IMS. Now, he mainly engages in IMS research at Alcatel-Lucent.

communications and Chinese Society for Electrical Engineering.

ZHANG ZhongHao was born in 1969. He received the M.S. degree in communication and electronic systems from the Xi'an Jiaotong University, Xi'an City, in 1994. Currently, he is a senior engineer at State Grid Shaanxi Electric Power Company. His research interest includes smart grid, information and communication technology, and network security. He is a