

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.03.002

引用格式:余翔,曾银强,郑寒冰. C-RAN 协作通信系统中基于正交预编码的同步算法[J]. 电讯技术, 2016, 56(3): 241-245. [YU Xiang, ZENG Yinqiang, ZHENG Hanbing. A synchronization algorithm based on orthogonal pre-coding in C-RAN cooperative communication system[J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(3): 241-245.]

C-RAN 协作通信系统中基于正交预编码的同步算法*

余翔,曾银强**,郑寒冰

(重庆邮电大学 通信与信息工程学院,重庆 400065)

摘要:在 C-RAN(Centralized, Cooperative, Cloud RAN)无线网络架构中,协作多点传输受到符号定时偏差和载波频率偏差的影响。为了降低联合传输协作系统对异步信号的敏感性,将正交预编码的同步算法应用到联合传输协作系统中。首先,发射机发送经过重复编码和正交预编码矩阵处理后的数据信息;然后,接收机利用特定的接收矩阵,实现分离相互叠加的异步协作信号;最后,完成对协作信号载波频率偏差和符号定时偏差的估计和补偿。理论分析和仿真结果表明:该方法能够有效解决协作传输中信号异步问题,改善系统性能。

关键词:C-RAN;协作多点传输;正交预编码;同步算法

中图分类号:TN911.22 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2016)03-0241-05

A Synchronization Algorithm Based on Orthogonal Pre-coding
in C-RAN Cooperative Communication System

YU Xiang, ZENG Yinqiang, ZHENG Hanbing

(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts
and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Cooperative multi-point processing(CoMP) technology is influenced by symbol timing offset and carrier frequency offset in the wireless network infrastructure centralized, cooperative, cloud radio access network(C-RAN). In order to reduce the sensitivity to asynchronous signal in joint transmission system, the orthogonal pre-coding synchronization algorithm is used to mitigate the effect of asynchronous signals. Firstly, the transmitter sends data which has been processed by repetition coding and orthogonal pre-coding matrix. Then, the receiver estimates and compensates the frequency and time offset for the cooperative signals which been separated by a particular accepting matrix. Simulation results demonstrate that this method can effectively solve the problem of asynchronous transmission and improve the performance of collaborative transmission systems.

Key words:C-RAN; CoMP; orthogonal pre-coding; synchronization algorithm

1 引言

下一代绿色无线接入网(Centralized, Cooperative, Cloud RAN, C-RAN)^[1]明确地提出采用信号的协作式发送和接收(Cooperative Transmission/Reception, CT/CR)作为提升频谱资源利用率和小区边缘用户吞吐量的关键技术。联合处理技术(Joint Pro-

* 收稿日期:2015-10-13;修回日期:2015-12-04 Received date:2015-10-13;Revised date:2015-12-04
基金项目:国家科技重大专项(2014ZX03003004-003)

Foundation Item:The National Science and Technology Major Project(2014ZX03003004-003)

** 通信作者:wowisgreat@163.com Corresponding author:wowisgreat@163.com

cessing, JP)^[2]是指相邻的多个协作基站为同一个用户传输相同的数据流,然后通过网络调度中心按照一定准则选择协作基站群。研究表明,在理想环境下多点协作传输技术能够显著提高小区性能和边缘用户吞吐量^[3-4]。文献中研究的理想环境是指假设协作基站能够完全同步,且基站有用户的完美信道状态信息,然而在实际多点协作系统中,多个传输基站间存在固有频率偏差,同时由于传输距离的不同,导致用户接收的每一路协作信号频偏和延时不同,这些异步多路协作信号的叠加会恶化接收信号的信噪比。

针对协作系统的异步问题,文献[5-7]广泛研究了长期演进(Long Term Evolution, LTE)协作通信系统中多个频率偏移估计问题,但大多采用复杂的算法估计所有频率偏移值并补偿,增加了接收机的设计难度。文献[8]中接收机采用一种快速傅里叶变换(Fast Fourier Transformation, FFT)窗口的方法,通过寻找最优的 FFT 窗口处理不同时延叠加的信号。文献[9]提出针对两个传输点的协作通信中,利用空频块码(Space Frequency Block Code, SFBC)进行频率偏移估计。上述算法中,大多只单独针对频率偏移或定时符号偏移,并且实现的计算复杂度过高。一种能够同时克服频率和时间偏移的同步方法,对于实现多点协作传输技术很有必要。

本文研究多点协作系统中的异步问题,提出了一种正交预编码的同步方法。该方法在发射机对数据信号采取重复编码和正交预编码处理,在接收机处利用特定的接收矩阵,实现单独检测每路协作信号;然后分别对每一路协作信号进行时延偏移和频率偏移估计和补偿,达到消除多点协作系统中的异步问题。

2 异步协作系统分析

考虑一个异步多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)和正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)系统的下行链路,多基站协作采用 JP 协作方式。分析协作系统中符号定时偏差(Symbol Time Offset, STO)和载波频率偏差(Carrier Frequency Offset, CFO)对下行链路的影响。假设 OFDM 符号调制,FFT 尺寸大小为 N ,循环前缀长度(Cyclic Prefix, CP)为 N_g 。一定范围内的频率偏差值 $CFO = \varepsilon$,符号定时偏差值 $STO = \delta$ 。基带接收信号的 OFDM 符号表示为

$$y[l] = \text{IDFT}\{Y[k]\} = \text{IDFT}\{H[k]X[k] + N[k]\} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} H[k]X[k] e^{j2\pi(k+\varepsilon)(l+\delta)/N} + n[l] \quad (1)$$

式中: $X[k]$ 、 $Y[k]$ 、 $H[k]$ 和 $N[k]$ 分别表示该 OFDM 符号上第 k 个子载波的发射符号、接收符号、信道的频域响应和频域噪声; $n[l] = \text{IDFT}\{N[k]\}$ 。

当协作基站数目为 M_T ,协作终端用户的接收信号为

$$\hat{y}[l] = \sum_{i=1}^{M_T} y_i[l] \quad (2)$$

假设协作基站 i 和用户间的 $STO = \delta_i$ 、 $CFO = \varepsilon_i$, δ_i 表示归一化时延, $\varepsilon_i = \frac{f_d}{\Delta f}$ 为归一化频偏, f_d 为频偏, Δf 为子载波间隔,分析频率偏差及符号定时偏差对 JP 协作通信的影响。用户的频域接收信号为

$$Y[k] = \text{FFT}\{y[l]\} = \sum_{i=1}^{M_T} \sum_{l=0}^{N-1} \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} H[m]X[m] e^{j2\pi(m+\varepsilon_i)l/N} e^{-j2\pi k(m+\delta_i)/N} + \sum_{l=0}^{N-1} z[l] e^{-j2\pi kl/N} = I[k] + Z[k] \quad (3)$$

分析用户接收信号中的有用信号项:

$$I[k] = \underbrace{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{M_T} e^{-j2\pi k\delta_i/N} H[k]X[k] \sum_{l=0}^{N-1} e^{j2\pi \varepsilon_i l/N}}_{I_1} + \underbrace{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{M_T} e^{-j2\pi k\delta_i/N} \sum_{m=0, m \neq k}^{N-1} H[m]X[m] \sum_{l=0}^{N-1} e^{j2\pi(m-k+\varepsilon_i)l/N}}_{I_2} \quad (4)$$

$$I_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{M_T} e^{-j2\pi k\delta_i/N} \frac{1 - e^{j2\pi \varepsilon_i}}{1 - e^{j2\pi \varepsilon_i/N}} H[k]X[k] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{M_T} e^{(j\pi \varepsilon_i(N-1) - j2\pi k\delta_i)/N} \frac{\sin(\pi \varepsilon_i)}{N \sin(\pi \varepsilon_i/N)} H[k]X[k] \quad (5)$$

式中: I_1 表示用户接收到的有用信号。由式(5)可知 STO 和 CFO 引起了第 k 个子载波频率分量的相位失真,此外 CFO 还导致了幅度失真。

$$I_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{M_T} e^{(j\pi \varepsilon_i(N-1) - j2\pi k\delta_i)/N} \times \sum_{m=0, m \neq k}^{N-1} \frac{\sin(\pi(m-k+\varepsilon_i))}{N \sin(\pi(m-k+\varepsilon_i)/N)} \times H[m]X[m] e^{j\pi(m-k)(N-1)/N} \quad (6)$$

式中: I_2 表示其他子载波对第 k 个子载波的影响。非协作模式的 OFDM 系统(即 $M_T = 1$ 时)中, CFO 会破坏子载波间的正交性,造成了载波间干扰(Inter-Carrier Interference, ICI)。当采用协作模式时,基站

间不同的 CFO 将会进一步扩大 ICI 的影响。异步协作通信不仅降低用户接收信号的信噪比,而且加大 STO 和 CFO 的估计误差。对于协作通信系统下,传统的 STO、CFO 估计算法并不适用。

3 正交预编码同步算法

上节的分析结果表明,JP 协作方式下的用户难以实现不同基站发射信号的同步,存在严重的接收信号失真情况。为了解决异步信号协作传输问题,本文提出一种基于正交的预编码同步方法,通过正交实现不同物理路径的发射信号的分离,最终解决 JP 协作方式下的异步问题。

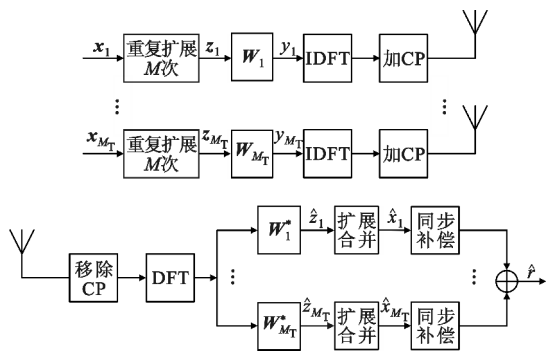


图 1 正交预编码同步算法的处理流程

Fig. 1 The process of orthogonal pre-coding algorithm

具体实现方法如图 1 所示,基站 $i(1 \leq i \leq M_T)$ 的发射信号矢量 $\mathbf{x}_i(\mathbf{x}_i \in \mathbf{C}^{N \times 1})$ 。其中, N 为调制后符号的个数。将 $\mathbf{x}_i$ 中每一个符号重复扩展 $M(M \geq M_T)$ 次,形成一个新矢量 $\mathbf{z}_i(\mathbf{z}_i \in \mathbf{C}^{NM \times 1})$:

$$\begin{cases} \mathbf{z}_i[m+kM] = \mathbf{x}_i[k], \\ 0 \leq k \leq N-1, 0 \leq m \leq M-1. \end{cases} \quad (7)$$

生成 $M \times M$ 维 Walsh 码矩阵 $\mathbf{D}$, 矩阵 $\mathbf{D}$ 的行向量为 $\mathbf{d}_i(1 \leq i \leq M)$ 。则预编码矩阵 $\mathbf{W}_i$ 可以表示为

$$\mathbf{W}_i = \text{diag}(\underbrace{\mathbf{d}_i, \mathbf{d}_i, \dots, \mathbf{d}_i}_{N \uparrow}), \mathbf{W}_i \in \mathbf{C}^{NM \times NM}. \quad (8)$$

令 $\mathbf{W}_i[l]$ 是 $\mathbf{W}_i$ 的第 $l(0 \leq l \leq NM-1)$ 个对角元素。由于 Walsh 码矩阵行向量之间存在正交性,所以:

$$\sum_{m=0}^{M_T} \mathbf{W}_i[m+kM] \times \mathbf{W}_j^*[m+kM] = \begin{cases} M, i=j \\ 0, i \neq j \end{cases}. \quad (9)$$

经过预编码后的发射信号为

$$y_i[l] = \mathbf{W}_i[l] \mathbf{z}_i[l], 0 \leq l \leq NM-1. \quad (10)$$

在终端用户接收侧, DFT 变换后信号的第 l 个子载波为

$$\hat{y}[l] = \sum_{i=1}^{M_T} \lambda_i[l] y_i[l] + n[l]. \quad (11)$$

式中:令 $h_i(n)$ 为基站 i 到用户的信道路径; $\lambda_i[l]$ 为 $h_i(n)$ 的 NM 点 DFT 的第 l 个元素; $n[l]$ 为加性噪声。

接收机检测每一个基站的发射信号,输入信号矢量分别乘以 $\mathbf{W}_j^*(1 \leq j \leq M_T)$ 。令 $l = m + kM$, 则第 j 个基站发送的重复扩展信号为

$$\begin{aligned} \hat{z}_j[l] &= \sum_{i=1}^{M_T} \lambda_i[l] y_i[l] \mathbf{W}_j^*[l] + n[l] \mathbf{W}_j^*[l] = \\ &= \sum_{i=1}^{M_T} \lambda_i[l] z_i[l] \mathbf{W}_i[l] \mathbf{W}_j^*[l] + n[l] \mathbf{W}_j^*[l]. \end{aligned} \quad (12)$$

平均输出可表达为

$$\begin{aligned} \hat{x}_j[k] &= \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{M_T} \sum_{m=0}^{M-1} \lambda_i[m+kM] z_i[m+kM] \cdot \\ &= \mathbf{W}_i[m+kM] \mathbf{W}_j^*[m+kM] + \\ &= \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} n[m+kM] \mathbf{W}_j^*[m+kM]. \end{aligned} \quad (13)$$

考虑到当发射符号数 NM 远大于信道多径长度 L 时,信号的相关带宽很大,此时相邻子信道间基本不变,即相邻子信道间的频率响应变化很少,近似存在

$$\lambda_i[m+kM] \approx \hat{\lambda}_i[k] = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} \lambda_i[m+kM], \quad (14)$$

故式(13)可改写为

$$\begin{aligned} \hat{x}_j[k] &= \hat{\lambda}_j[k] x_j[k] + \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} \mathbf{W}_j[m+kM] \mathbf{W}_j^*[m+kM] + \\ &= \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} \hat{\lambda}_i[k] x_i[k] \sum_{m=0}^{M-1} \mathbf{W}_i[m+kM] \mathbf{W}_j^*[m+kM] + \\ &= \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} n[m+kM] \mathbf{W}_j^*[m+kM] = \\ &= \hat{\lambda}_j[k] x_j[k] + \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} n[m+kM] \mathbf{W}_j^*[m+kM]. \end{aligned} \quad (15)$$

由式(15)可以看出,经过接收机处理后的信号几乎不存在协作基站之间的干扰。为消除多径信道影响,可以选择在发射机采用预均衡或在接收机采用频域均衡来恢复信号。对于存在多个 STO 和 CFO 的异步协作系统,正交预编码同步算法可以利用传统 OFDM 单点传输估计算法,对每一路协作信号分别进行估计并补偿。

4 仿真与结果分析

采用蒙特卡洛法进行仿真,随机产生 2 000 个 OFDM 符号。仿真实验参考 LTE 中 20 MHz 带宽的帧结构,FFT 点数为 2 048,循环前缀长度为 512,载

波频率 2 GHz,系统带宽 20 MHz,协作基站数目为 3,调制方式为 QPSK 调制。假设用户所在小区为主服务小区,且该小区传输信号不存在 CFO 和 STO 的影响。在 SCM 链路级信道仿真模型下,多径长度设定为 6(远远小于 OFDM 符号的长度),所以本文假定的信号相关带宽很大是适用的。考虑移动终端的最快行驶速度为 500 km/h,则最大多普勒频移 1 204 Hz,相对于频率偏移值 $CFO=0.08$;基站覆盖半径为 500 ~ 700 m,相应最大传输延时约为 2 μ s,相对于符号定时偏差值 $STO=10$ 。然而,在实际网络中,CFO 和 STO 都不会高于上值。

传统 OFDM 系统中可以选择基于 CP 的估计方法或基于前导的估计方法^[10]对 CFO、STO 进行估计。结合常用的估计算法,本文进一步提出了基于 CP 估计的正交预编码算法(CP-正交预编码算法)和基于前导的正交预编码算法(Moose-正交预编码算法)。

由图 2 可知,在同步协作通信系统中,接收机的误码率效果最佳。对于异步协作通信系统而言,当 $STO=-2$ 、 $CFO=0.04$ 时,接收机的误码率远高于同步协作通信系统。采用本文提出的正交预编码同步算法,用户可以单独检测协作基站信号,单点传输同步估计算法采用基于 CP 的估计算法。正交预编码协作通信系统的误码率接近于同步协作系统,优于文献[9]中基于 SFBC 编码的 CFO 估计并补偿算法(SFBC-协作系统),且相比较于 SFBC-协作系统只适应两个协作基站,其能够同时实现更多数量的多点协作传输通信。这是因为正交预编码方法以牺牲频谱利用率为代价。仿真结果表明正交预编码同步算法能够解决协作通信系统中的异步问题。

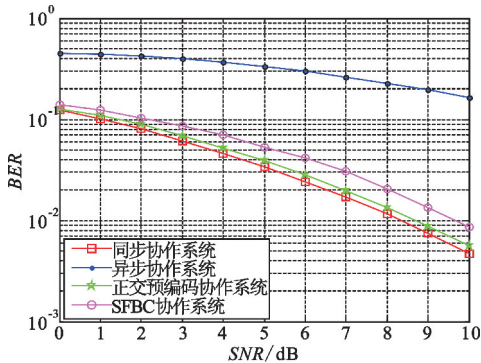


图 2 不同协作方案的系统误码率对比
Fig. 2 Comparison of BER among different schemes

图 3 所示为 SCM 信道环境下基于 CP-正交预编码算法和 Moose-正交预编码算法的误码率对比

图。由仿真结果可知,Moose-正交预编码算法的误码性能优于 CP-正交预编码算法。这是因为在相同信噪比条件下,Moose 算法优于基于 CP 估计算法的估计效果。仿真结果表明:通过正交预编码方法消除异步协作间信号干扰后,采用更高估计精确度的单点传输估计方法,能够进一步提升正交预编码同步算法的性能。

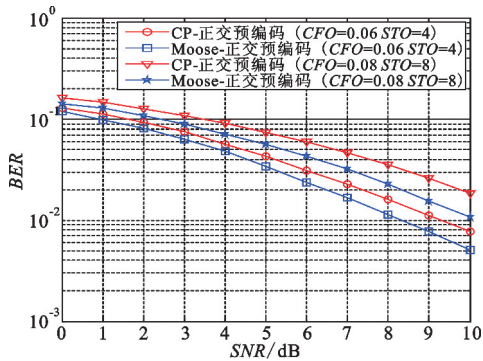


图 3 基于不同 CFO 和 STO 估计的正交预编码算法误码率
Fig. 3 BER of pre-coding algorithm based on different CFO and STO estimation

5 结束语

本文在深入分析 C-RAN 系统下联合处理多点协作传输技术以及异步 OFDM 系统中因存在 STO 和 CFO 而造成的用户接收信号信噪比恶化的基础上,提出了一种基于正交的预编码同步算法。相比较于其他文献提出的方法,正交预编码同步算法以牺牲一定的频谱资源为代价,能获得更高的系统传输误码率性能。同时比较了两种不同的正交预编码算法在异步协作系统中的误码率性能。理论分析和仿真结果表明:本算法能够减小异步协作系统中的误码率,且基于前导的正交预编码同步算法性能更优,可以解决 MIMO-OFDM 协作系统中的异步问题。本文考虑方案在协作基站数量较多时,可能会导致频率资源利用率降低。未来的研究工作将会关注较多基站协作通信系统的同步问题。

参考文献:

[1] China Mobile Research Institute. C-RAN white paper (v.2.5) [M]. Beijing:China Mobile Research Institute,2011.
[2] 3GPP(2011b) TR 36.819 V11.2.0,Technical specification group radio access network;coordinated multi-point operation for LTE physical layer aspects(Release 11)[S].
[3] CHOI D,LEE D,LEE J H. Resource allocation for comp with multiuser MIMO-OFDMA[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2011,60(9):4626-4632.

[4] BANG H J, GESBERT D, ORTENP. On the rate gap between multi- and single-cell processing under opportunistic scheduling [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(1): 415-425.

[5] KOIVISTO T, KUOSMANEN T, ROMAN T. Estimation of time and frequency offsets in LTE coordinated multi-point transmission [C]// Proceedings of 2013 Vehicular Technology Conference. Las Vegas, NV: IEEE, 2013: 1090-1098.

[6] NASIR A A, DURRRANI S, KENNEDY R A. Achieving cooperative diversity with multiple frequency offset estimation [C]// Proceedings of 2011 IEEE Signal Processing and Communication Systems. Honolulu, HI: IEEE, 2011: 1-5.

[7] SANG T H, SHAN S Y. A transmission method to combat multiple carrier frequency offsets (MCFOS) in coordinated multiple point (CoMP) schemes [C]// Proceedings of 2014 IEEE Asia-Pacific Signal and Information Processing Association. Las Vegas, NV: IEEE, 2014: 1-5.

[8] SUN G, YE F. A FFT-window search algorithm for diversity combining in downlink multipoint joint transmission [C]// Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Wireless Communications. Beijing: IEEE, 2010: 63-67.

[9] ZHANG Y Y, JIANG Y, ZHANG Y S, et al. Multiple CFO estimation and compensation in cooperative communication [C]// Proceedings of 2014 IEEE General Assembly and Scientific Symposium. Beijing: IEEE, 2014: 16-23.

[10] MOOSE P H. A technique for orthogonal frequency division multiplexing frequency offset correction [J]. IEEE Transactions on Communications, 1994, 42(10): 2908-2914.

作者简介:



余翔(1964—),男,重庆人,1999 年于电子科技大学获博士学位,现为教授,主要研究方向为宽带无线通信;

YU Xiang was born in Chongqing, in 1964. He received the Ph. D. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 1999. He is now a professor. His research concerns wideband wireless communications technology.

Email: yuxiang@cqupt.edu.cn

曾银强(1990—),男,四川德阳人,硕士研究生,主要研究方向为宽带移动通信;

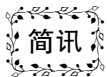
ZENG Yinqiang was born in Deyang, Sichuan Province, in 1990. He is now a graduate student. His research concerns wideband wireless communications technology.

Email: wowisgreat@163.com

郑寒冰(1991—),女,安徽宿州人,硕士研究生,主要研究方向为宽带移动通信。

ZHENG Hanbing was born Suzhou, Anhui Province, in 1991. She is now a graduate student. Her research concerns wideband wireless communications technology.

Email: 645955527@qq.com



简讯

本刊编辑部赵勇、李桂花再度荣获“优秀编辑”称号

在四川省科技期刊编辑学会组织的“2015 年度科技期刊优秀编辑”评选活动中,本刊副总编赵勇和责任编辑李桂花均再次荣获“优秀编辑”称号,被授予荣誉证书。

四川省优秀科技期刊编辑评选活动两年举行一次,目的是促进编辑队伍的健康发展,提高四川省科技期刊整体质量和水平,表彰和鼓励科技期刊队伍中的优秀人才,评选条件包括从事编辑工作时间、参加学会学术活动与论文发表情况、编辑业务能力、期刊影响力等多方面。

赵勇和李桂花两位同志均从事编辑工作 10 年以上,他们在平凡的岗位上默默耕耘,为《电讯技术》的发展奉献了青春,使得《电讯技术》跻身于中文核心期刊和中国科技核心期刊“双核心”行列。赵勇副总编因其在期刊出版工作中作出的突出贡献,曾被评为工业和信息化部“优秀编辑”;同时,他是目前主办单位从事期刊编辑工作时间最长的员工。李桂花同志热爱编辑工作,积极钻研业务,自学了方正排版技能,为《电讯技术》的顺利出版作出了积极的贡献。

赵勇和李桂花两位同志对期刊出版工作有感情、有热情,他们再度被评选为“优秀编辑”,是名副其实、众望所归,既是对他们的鼓励,也是对主办单位期刊工作的肯定。荣誉只代表过去,未来还需努力。希望他们再接再厉,在期刊出版工作中取得更好的成绩。