

# 大规模 MIMO 双向中继系统的功率分配

李晓婷

(南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003)

**摘要:**在中继的发送端和接收端安装大量天线,可以大大地提高系统性能。提出一种大规模 MIMO 双向中继架构。在每个相干时间间隔内,信息交换发生在三个阶段:训练阶段、多址阶段、广播阶段。在训练阶段,中继通过正交导频序列对所有用户进行独立的信道估计。假设中继已知不完全信道状态信息情况下,设计一个最小均方差(MMSE)滤波器减轻环回干扰,采用迫零(ZF)滤波器进行检测和预编码处理。通过评估此系统中继和目的点的误码率(BER),选出最佳的中继发送功率,并且提出了一种最佳功率分配算法。在满足通信对速率约束条件的情况下,此算法可以算出中继最小发送功率。仿真结果表明,当 MMSE 滤波器和最佳功率分配算法都被采用的时候,系统将获得更高的能源效率。

**关键词:**双向中继;MIMO;信道估计;MMSE;迫零;功率分配

**中图分类号:**TP302

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2017)02-0143-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2017.02.032

## Power Allocation of Massive MIMO Two-way Relay System

LI Xiao-ting

(College of Telecommunications & Information Engineering, Nanjing University of  
Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** The system performance can be greatly increased when the relay is equipped with a large number of antennas on both transmitter and receiver. A massive MIMO two-way relaying architecture is presented. Within each coherence interval, the information exchange occurs in three phases including the training phase, the multiple-access phase, and the broadcast phase. In the training phase, the relay estimates the channels based on pilots transmitted from the users and the pilot sequences assigned for all users in both groups are pairwise orthogonal. It assumes the relay knows imperfect channel state information and designs a Minimum Mean-Square Error (MMSE) filter to reduce the interference. Then, Zero-Forcing (ZF) filters is adopted for both detection and precoding. The system performance is evaluated in terms of Bit Error Rate (BER) at both relay and destinations. An optimal power allocation algorithm is put forward that computes the minimum power that satisfies the rate constraints of each pair. Simulation results show that when both MMSE filtering and optimal power allocation algorithm are used, the system achieves higher energy efficiency.

**Key words:** two-way relay; MIMO; channel estimation; MMSE; zero-forcing; power allocation

## 0 引言

目前,随着移动通信技术的快速发展、移动通信网络的广泛使用以及移动通信用户数量的迅猛增长,在移动通信网络中实现双向中继技术,已成为移动通信系统发展的热点之一<sup>[1-3]</sup>。无线双向中继网络中端到端系统性能取决于时隙和功率的联合分配,以及在非对称信道下经过资源优化分配后,在中继节点上采用何种 AF/DF/CF 机制<sup>[4]</sup>。文献[5]描述了多用户采用 AF 转发中继的比例公平调度。在多用户情况下,考虑子载波配对的问题,并且阐述了 OFDMA 中继网络中

的 GPF 调度帧问题。文献[6]重点研究了共享中继网络的调度和资源分配方面的问题。描述了一个共享中继架构,以减少无线蜂窝网络小区间干扰。共享中继架构就是具有多个天线的单个中继被放置在小区的边缘,并且由多个扇区共享。文献[7]详述了中继选择和资源分配的联合优化,根据数据速率要求来最小化系统的发射功率消耗,提高能源效率。

现在大多数的无线双向中继的理论研究仍然局限于两源节点和单中继、多源节点和单中继的系统模型<sup>[8-10]</sup>。这种研究模型已经不能满足日益复杂的网络

收稿日期:2016-04-06

修回日期:2016-08-10

网络出版时间:2017-01-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61372125,61401234)

作者简介:李晓婷(1990-),女,硕士研究生,研究方向为下一代通信网络技术。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20170110.1019.054.html>

环境要求。对于大规模 MIMO 和双向中继系统相结合的模型来说,目前对其的研究国际上刚处于起步阶段,只有少数文章可参考。文献[11]详述了大规模天线阵列的双向中继网络采用导频序列,进行信道估计的两种方案。文献[12]研究了 MIMO 双向中继网络中源和中继的天线选择问题,提出两个相似的最优算法:JRSAS 和 SRSAS。这两种算法都可以接近最佳穷举搜索(ES)算法,而且显著减少了计算复杂度。

下一代网络的基本思想是基站通过使用大量的天线,可以服务于更多的用户和设备。此研究涉及到各种信号处理技术,如信道建模和估计,预编码和检测算法。文中提出一种大规模 MIMO 双向中继架构,所有用户都具有一个独立的天线,而中继节点配备一个非常大的天线阵列。信息交换发生在三个阶段:训练阶段、多址阶段、广播阶段。通过在训练阶段的导频序列使中继对所有用户进行独立的信道估计。采用迫零 ZF 滤波器进行检测、预编码,线性处理抑制环回干扰。提出一种最佳功率分配算法,减小了发送功率,降低了误码率,提高了能源利用率和系统的整体性能。

## 1 系统模型

MIMO 双向中继系统如图 1 所示。

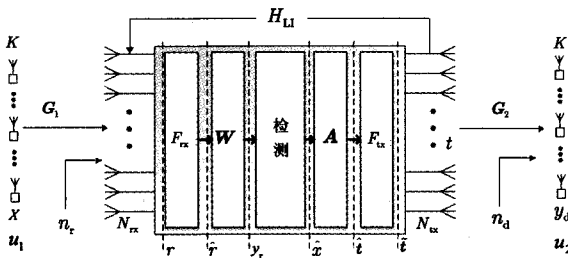


图 1 MIMO 双向中继系统

考虑两组用户  $u_1, u_2$ , 每组包含  $K$  个单线用户, 中继含有  $N_{rx}$  根接收天线和  $N_{tx}$  根发送天线 ( $K \ll N_{rx}, N_{tx}$ )。  $x$  的第  $k$  个用户和  $y$  的第  $k$  个用户只通过中继相互传输信息。

### 1.1 信道估计

向量  $X$  是源点到中继发送的符号, 向量  $t$  是中继到目的点发送的波束成形符号, 假定这些向量是取自一个 M-QAM 星座且输出信号是规范的、不相关的。因此, 每个源点的发送功率独立于  $K$ , 中继的总发送功率独立于  $N_{tx}$ 。中继和目的点接收的符号向量分别是:

$$r = G_1 \sqrt{D_{ps}} x + \sqrt{p_R} H_{lu} t + n_r \quad (1)$$

$$y_d = \sqrt{p_R} G_2 t + n_d \quad (2)$$

其中, 环回干扰  $LI$  信道  $H_{lu} \sim N(0, \sigma_{lu}^2)$ ,  $\sigma_{lu}^2$  表示在模拟域抑制自干扰后剩余的干扰功率;  $n_r, n_d$  分

别表示中继和目的点的加性高斯白噪声;  $D_{ps}$  是对角矩阵, 表示每个源点的发送功率;  $p_R$  表示中继的平均发送功率。

由于源点到中继和中继到目的点的符号传输都经过一个 MIMO 信道, 所以

$$G_1 = H_1 \sqrt{D_1} \quad (3)$$

$$G_2 = \sqrt{D_2} H_2$$

其中,  $D_1, D_2$  是一个对角矩阵, 服从对数正态分布, 表示大规模信道的影响;  $H_1, H_2$  服从标准正态分布, 表示快衰落信道。

为了有效地应用检测, 预编码和干扰消除技术, 必须进行信道估计。中继通过采用训练阶段的导频序列对所有用户进行独立的信道估计, 然后使用迫零 ZF 滤波器处理接收信号。假设所有通信链路共享同一时频资源, 采用 TDD 传输模式。在一个相干时间间隔内, 信息交换发生在三个阶段: 训练阶段、多址阶段、广播阶段, 如图 2 所示。

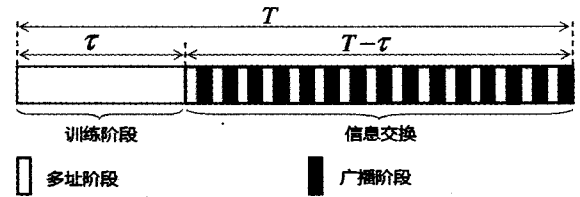


图 2 三个阶段

在训练阶段, 每个用户分配一个  $\tau$  长度的导频序列, 所有用户同时发送导频序列到中继, 所以中继接收的导频矩阵为:

$$Y_{R,p} = \sqrt{p_p} G_1 \Phi_1 + \sqrt{p_p} G_2 \Phi_2 + Z_R \quad (3)$$

其中,  $p_p = \tau \cdot p_d$ ,  $p_d$  是每个用户的平均发送功率;  $\sqrt{p_p} \Phi_i \in C^{K \times \tau}$  的第  $k$  行表示  $u_{i,k}, i=1,2$  使用的导频序列;  $Z_R \in C^{M \times \tau}$  表示独立同分布的加性高斯白噪声。

中继根据用户发送的导频矩阵进行信道估计, 用于信号处理。

中继分别估计两组信道矩阵  $G_1, G_2$ , 这意味着, 分配给所有用户的导频序列两两正交, 即  $\Phi_i \Phi_j^H = \delta_{ij} I_K$ ,

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i=j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad \tau \geq 2K, \text{ 根据式(3), 由最小二乘法得}$$

$G_i, i=1,2$  的信道估计:

$$\tilde{G}_i = \frac{1}{\sqrt{p_p}} Y_{R,p} \Phi_i^H = G_i + \frac{1}{\sqrt{p_p}} \tilde{Z}_i \quad (4)$$

其中,  $\tilde{Z}_i \triangleq Z_R \Phi_i^H, i=1,2; \Phi_i \Phi_i^H = I_K$ 。

### 1.2 检测和预编码

假设当环回干扰  $LI$  最小时, 中继接收信号是  $\hat{r}$ 。采用迫零 ZF 滤波器进行检测, 经过传输矩阵  $W_{ZF}$  得  $\hat{x}$ :

$$\hat{x} = \mathbf{W}_{ZF} \hat{r} = (\tilde{\mathbf{G}}_1^H \tilde{\mathbf{G}}_1)^{-1} \tilde{\mathbf{G}}_1^H \hat{r} \quad (5)$$

根据  $\hat{x}$  进行检测,所估计的符号被转发到目的点,但中继的处理能力有限,因此,需要进行 ZF 预编码处理:

$$\hat{t} = \mathbf{A}_{ZF} \hat{x} = \alpha_{ZF} \tilde{\mathbf{G}}_2^H (\tilde{\mathbf{G}}_2 \tilde{\mathbf{G}}_2^H)^{-1} \hat{x} \quad (6)$$

其中,  $\alpha_{ZF} = (E(\text{tr}\{(\tilde{\mathbf{G}}_2 \tilde{\mathbf{G}}_2^H)^{-1}\}))^{-1/2}$  是一个标量,满足  $E(\hat{t}^H \hat{t}) = 1$ 。

由于中继的硬件缺陷造成了加性误差,即  $t = \tilde{t} + \varepsilon_t$ ,  $\tilde{t}$  是经过基带滤波器后的传输向量,  $\xi_t \sim N(0, \varepsilon_t^2)$  和  $\tilde{t}$  是不相关的。

### 1.3 环回干扰 (Loopback Interference, LI)

文中使用线性处理来抑制环回干扰,即式(1)中最小化环回干扰项  $\sqrt{p_R} \mathbf{H}_{LI} t$ ,保留信号项  $\mathbf{G}_1 \sqrt{D_{ps}} x$ 。因此,中继实际接收信号和期望接收信号之间的均方误差为  $E[(\mathbf{G}_1 \sqrt{D_{ps}} x - \hat{r})(\mathbf{G}_1 \sqrt{D_{ps}} x - \hat{r})^H]$ 。采用文献[13]中提到的线性前置滤波器  $F_{\alpha}$  和后置滤波器  $F_{\alpha}$  ( $\tilde{t} = F_{\alpha} \hat{t}$ ,  $\hat{r} = F_{\alpha} r$ )。当  $F_{\alpha}$  固定时,为了找到最小均方差(MMSE),要满足:

$$F_{\alpha} \tilde{\mathbf{H}}_{LI} F_{\alpha} = 0 \quad (7)$$

若  $F_{\alpha}$  固定,则

$$F_{\alpha} = \tilde{\mathbf{G}}_1 \mathbf{D}_{ps} \tilde{\mathbf{G}}_1^H (\tilde{\mathbf{G}}_1 \mathbf{D}_{ps} \tilde{\mathbf{G}}_1^H + p_R \tilde{\mathbf{H}}_{LI} R_t \tilde{\mathbf{H}}_{LI}^H + R_{n_t})^{-1} \quad (8)$$

其中,  $R_t = F_{\alpha} \mathbf{A}_{ZF} R_z \mathbf{A}_{ZF}^H F_{\alpha}^H + \varepsilon_t^2 I$ 。

由式(7)所提供的解决方案对应于文献[13]中的零空间投影,但是一般找到针对大规模阵列的解决方案是困难的。与此相反,式(8)是一个封闭的表达式,包含信道估计、发送向量的协方差矩阵和噪声。根据所考虑的模型,给定一组参数,可以预测端到端的误码率:若中继具有较低的发送功率  $p_R$ ,会降低环回干扰功率、减少估计误差的影响和射频损伤;若中继具有较高的发送功率  $p_R$ ,会提高信噪比(SNR),降低误码率(BER)。因此,当固定源点的发送功率时,若使得端到端的 BER 最小,  $p_R$  的选择很重要。

## 2 功率分配

中继受到的干扰主要取决于它的发送功率,并且直接影响了端到端的性能。因此,找到满足系统要求的最佳功率很重要。

考虑每个链路的可达速率,文献[14]中提到源点和目的点之间的发送链路速率:

$$R_k = \min\{R_{1,k}, R_{2,k}\} \quad (9)$$

其中,  $R_{1,k}$  表示源点和中继之间的可达速率;  $R_{2,k}$  表示中继和目的点之间的可达速率。

检测前,中继接收的信号为:

$$y_{r,k} = \sqrt{p_{S,k}} (\mathbf{W}_{ZF} F_{\alpha})_k^T g_{1,k} x_k + \sum_{j \neq k}^K \sqrt{p_{S,j}} (\mathbf{W}_{ZF} F_{\alpha})_k^T g_{1,j} x_j + \sqrt{p_R} ((\mathbf{W}_{ZF} F_{\alpha})_k^T \mathbf{H}_{LI} t + (\mathbf{W}_{ZF} F_{\alpha})_k^T n_r) \quad (10)$$

其中,  $g_{1,k}$  表示  $\mathbf{G}_1$  的第  $k$  列。

检测前,目的点接收的信号为:

$$y_{d,k} = \sqrt{p_R} g_{2,k}^T (F_{\alpha} \mathbf{A}_{ZF})_k \hat{x}_k + \sqrt{p_R} \sum_{j \neq k}^K g_{2,k}^T (F_{\alpha} \mathbf{A}_{ZF})_j \hat{x}_j + n_{d,k} \quad (11)$$

以上两式均可看作是期望的信号加上不相关的等效噪声(信道衰落、通信对之间的干扰、环回干扰、高斯噪声)。

文中的目的是在保证达到每个通信对期望速率的条件下,计算最优的源点和中继的发送功率。另外,还要满足峰值功率约束,考虑整体功耗。也就是说,既要保证系统的能源效率最大,又要保证总功率最小:

$$\begin{aligned} \max E E &= \sum_{k=1}^K R_k / (p_R + \sum_{k=1}^K p_{S,k}) \\ \min_{p_R, p_{S,1}, \dots, p_{S,K}} &\sum_{k=1}^K p_{S,k} + p_R \\ &R_k \geq R_{0,k}, k = 1, 2, \dots, K \\ \text{s. t.} &0 \leq p_{S,k} \leq p_{S_{0,k}}, k = 1, 2, \dots, K \\ &0 \leq p_R \leq p_{R_0} \end{aligned} \quad (12)$$

其中,  $R_{0,k}$  表示通信对  $k$  要求达到的速率;  $p_{S_{0,k}}$  表示通信对  $k$  要求达到的峰值功率;  $p_{R_0}$  表示中继的峰值功率。

为了取得源和中继的最佳功率,提出一个简单有效的基于线性规划的迭代算法。

步骤1:第一次迭代  $i = 1$ ,  $L$  是迭代次数上限,  $N_{it}$  是每次迭代信道实现的数目。系统要求源点和中继达到的峰值功率为:

$$p_{S,k,1} = p_{S_{0,k}}, p_{R,1} = p_{R_0}$$

步骤2:计算  $N_{it}$  个信道的统计信息。首先,生成信道矩阵  $\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2$ , LI 信道矩阵  $\mathbf{H}_{LI}$ , ZF 滤波器的传输矩阵和预编码矩阵  $\mathbf{W}_{ZF}, \mathbf{A}_{ZF}$ ; 然后,联合  $p_{S,k,i}, p_{R,i}$  计算前置滤波器  $F_{\alpha}$ ; 最后,计算所有通信对的可达速率  $R_{1,k}$  和  $R_{2,k}$ 。在大规模 MIMO 系统中常用中心极限定理近似等效噪声项为高斯噪声项<sup>[15]</sup>, 因此  $R_{1,k}$  和  $R_{2,k}$  的近似值是:

$$R_{1,k} = \log_2 \left( 1 + \frac{p_{S,k} \text{MV}_{1,k}}{p_{S,k} V_{1,k} + \sum_{j \neq k}^K p_{S,j} \text{MP}_{1,(k,j)} + p_R \text{LI}_{1,k} + \text{AN}_{1,k}} \right) \quad (13)$$

$$R_{2,k} = \log_2 \left( 1 + \frac{p_R \text{MV}_{2,k}}{p_R V_{2,k} + p_R \text{MP}_{2,k} + \text{AN}_{2,k}} \right) \quad (14)$$

其中,  $MV_{1,k} = |E\{(W_{ZF}F_{rx})^T_k g_{1,k}\}|^2$ ,  $MV_{2,k} = |E\{g_{2,k}^T (F_{tx}A_{ZF})_k\}|^2$ ,  $V_{1,k} = \text{Var}\{(W_{ZF}F_{rx})^T_k g_{1,k}\}$ ,  $V_{2,k} = \text{Var}\{g_{2,k}^T (F_{tx}A_{ZF})_k\}$ ,  $MP_{1,(k,j)} = E\{|(W_{ZF}F_{rx})^T_k g_{1,j}|^2\}$ ,  $MP_{2,k} = \sum_{j \neq k}^K E\{|g_{2,k}^T (F_{tx}A_{ZF})_j|^2\}$ ,  $LI_{1,k} = E\{\|w_{ZF,k}^T F_{rx} H_{LI} F_{tx} A_{ZF}\|^2\}$ ,  $AN_{1,k} = \sigma_{n_r}^2 E\{\|(W_{ZF}F_{rx})_k\|^2\}$ ,  $AN_{2,k} = \sigma_{n_t}^2$ 。

获取信道统计信息的平均值,解决系统能源效率最大且源点和中继总功率最小的问题(见式(12)),得出新的  $p_{S,k,i}, p_{R,i}$ 。

步骤 3: 给源点和中继的峰值功率重新赋值(见式(15)),进行再一次迭代,直到  $i = L$  结束。

$$p_{S,k,i+1} = p_{S,k,i}, p_{R,i+1} = p_{R,i}, i = i + 1 \quad (15)$$

### 3 系统仿真分析

该双向中继系统以 1 个小区为模型,小区内 3 个扇区,每个小区内 1 个中继,单天线用户对称分布在两中继两边。信号分布星座图 16-QAM,用户数  $K = 5$ ,中继天线数  $N_{rx} = N_{tx} = N$ ,时延  $d \geq 1$ ,源点发送功率  $p_{S,k} = 1$ ,环回干扰  $\sigma_{LI}^2 = 1$ ,中继信噪比  $\text{SNR}_R = 8 \text{ dB}$ ,  $\sigma_{n_r}^2 = 1$ ,误差  $\varepsilon_t^2 = \varepsilon_H^2 = 10^{-3}$ 。只考虑小尺度衰落,即  $\sqrt{D_1} = \sqrt{D_2} = I$ 。通过端到端的 BER 来判断系统性能,观察中继发送功率的变化。由图 3 可以看出,中继选择大规模天线分布,可以获得很小的 BER,并且中继发送功率也很低。

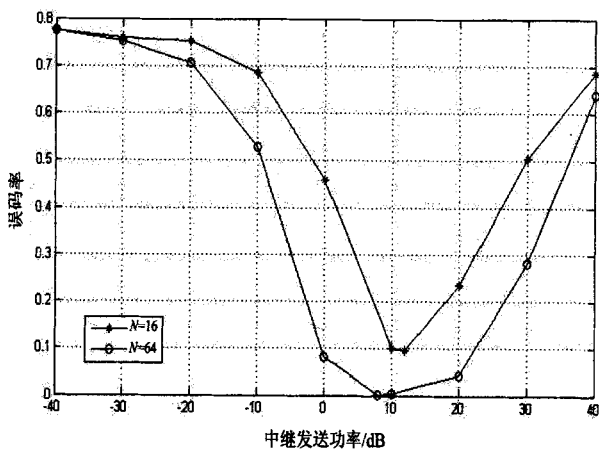


图 3 端到端的 BER

为了进一步说明文中提出的最佳功率分配算法(OPA)的好处,与平均功率分配算法(UPA) ( $p_{S,k} = p_S$ ) 在能源效率方面进行比较。设置参数:用户数  $K = 10$ ,中继信噪比  $\text{SNR}_R = 16 \text{ dB}$ ,  $\sigma_{n_r}^2 = 1$ 。源和中继的峰值功率  $p_{S_0} = 3 \text{ dB}$ ,  $p_{R_0} = 10 \text{ dB}$ ,  $N_{it} = 10^3$ ,  $L = 5$ 。端到端的总速率为  $\sum_{k=1}^K R_{0,k}$ 。由图 4 可以看出,文中提出的最佳功率分配算法,能源效率显著提高。

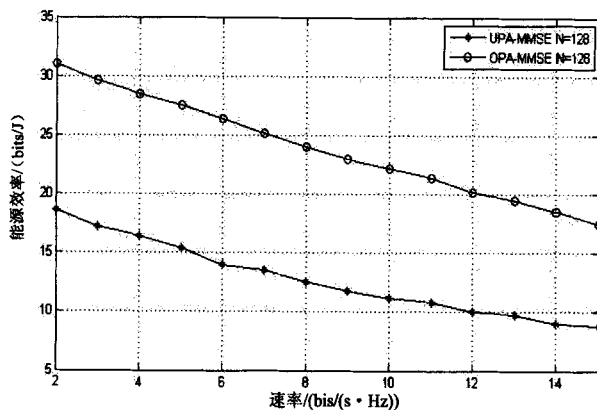


图 4 系统能源效率

### 4 结束语

文中提出一种大规模 MIMO 双向中继架构,所有用户都具有一个独立的天线,而中继节点配备有一个非常大的天线阵列。中继采用两个滤波器:ZF 滤波器进行检测和预编码处理;MMSE 滤波器抑制环回干扰。通过对端到端 BER 的分析,可以选择一个最佳的中继功率分配。与平均功率分配算法进行比较,该算法显著提高了能源效率。

#### 参考文献:

- [1] 林文佳,叶伟,杨馨. 蜂窝通信中中继双向传输技术[J]. 计算机工程与设计,2010,31(17):3800-3802.
- [2] 杨波,于宏毅,吕凌,等. 高频谱效率的双向连续中继技术[J]. 北京邮电大学学报,2009,32(1):10-13.
- [3] 刘通,陈前斌,唐伦,等. Two-way 中继系统中的双向中继选择及功率分配策略[J]. 计算机应用研究,2010,27(7):2697-2699.
- [4] 万庆涛,马冠一. 中继系统中断概率研究[J]. 计算机工程与应用,2013,49(11):24-26.
- [5] Sharifian A, Djukic P, Yanikomeroglu H, et al. Generalized proportionally fair scheduling for multi-user amplify-and-forward relay networks [C]//Vehicular technology conference. Ottawa, Canada:IEEE,2010:1-5.
- [6] Lin Yicheng, Yu Wei. Fair scheduling and resource allocation for wireless cellular network with shared relays [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2012,30(8):1530-1540.
- [7] Chen Yu, Fang Xuming, Huang Bo. Energy-efficient relay selection and resource allocation in nonregenerative relay OFDMA systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014,63(8):3689-3699.
- [8] 郑毅,李中年,王亚峰,等. LTE-A 系统中中继技术的研究[J]. 现代电信科技,2009,39(6):45-49.
- [9] 赵欣丽. LTE-Advanced 系统中中继技术综述[J]. 电子质量,2010(9):42-44.

(下转第 150 页)

CAD 和 Protell 99SE 等,主要的瓶颈在于桌面传输协议的优化。对于 3D 设计软件,如 3D MAX 等,由于 KVM 对 GPU 直通技术和 GPU 虚拟化技术还不支持,而 OpenStack 的首选 Hypervisor 是 KVM,支持的最好的也是 KVM,所以如果需要 3D 功能,则需要考虑基于 Xen 来搭建,但效果还有待检验。

### 3.7 OpenStack 的平滑升级

OpenStack 的社区活跃程度很高,开发进度也相对较快,每年都推出两个稳定的版本,至今为止最新版是 L 版。有的版本改动程度小,但有的版本可能改动量会较大。作为基于开源 OpenStack 的桌面云,如果在其上做定制开发后,就锁定于某个版本不再升级,这似乎就偏离了社区的主线,所以如何做到在生产环境中,既不影响现有业务,同时还能稳定升级,这是一个必须解决的问题。

## 4 结束语

随着信息技术的发展,人们将逐步进入云计算时代,桌面云作为云计算的一种重要形式,正越来越受到欢迎。作为最大的开源云计算平台 OpenStack,其桌面虚拟化应用方面离商用还面临着很大的挑战,但这也无法阻止其受欢迎的程度。在社区持续活跃,企业不断支持的情况下,仍对其充满信心,而作为云计算发展的公司,把握市场和技术发展的方向,将为其抢占市场获得先机。

### 参考文献:

- [1] Mell P, Grance T. The NIST definition of cloud computing [J]. Communications of the ACM, 2011, 53(6): 50.
- [2] 王峰,江峰,李朝阳. 虚拟桌面及关键技术分析云计算时代的数据库研究[J]. 电信技术, 2011(1): 24-26.
- [3] 张小斌. OpenStack 企业云平台架构与实践[M]. 北京:电

子工业出版社, 2015: 80-85.

- [4] 占海,张继勇. 云落谁家? OpenStack 基于场景的架构设计实践[M]. 北京:电子工业出版社, 2016: 185-188.
- [5] 李梅,罗南林,蔡建轩. 基于 VDI 模式的桌面云管理平台设计与实现[J]. 计算机科学, 2015, 42(6A): 345-348.
- [6] Wang S T, Chang H Y. An adaptive virtual desktop service in cloud computing platform [J]. Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering, 2014, 8(4): 550-554.
- [7] Patil P U, Ambavkar P S, Meshram D B B, et al. Desktop virtualization using SaaS architecture [J]. International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology, 2012, 1(4): 666-670.
- [8] 2010 cloud computing survey [R/OL]. 2010. <https://www.kpmg.com/ES/es/ActualidadNovedades/ArticulosyPublicaciones/Documents/2010-Cloud-Computing-Survey.pdf>.
- [9] The state of the desktop survey - virtual desktops [R/OL]. 2015. <http://www.evolveip.net/2015-the-state-of-the-desktop-survey-virtual-desktops>.
- [10] 国务院关于促进云计算创新发展培育信息产业新业态的意见 [S/OL]. 2015. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-01/30/content\\_9440.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-01/30/content_9440.htm).
- [11] Sultana A, Daimary B, Chettri M, et al. Virtualized remote web desktop [C]//3rd national conference on emerging trends and applications in computer science. Shillong: [s. n.], 2012: 270-273.
- [12] 肖力,汪爱伟,杨俊俊,等. 深度实践 KVM [M]. 北京:机械工业出版社, 2015: 1-10.
- [13] Van V N, Chi L M, Long N Q, et al. A performance analysis of OpenStack open-source solution for IaaS cloud computing [C]//Proceedings of the second international conference on computer and communication technologies. [s. l.]: Springer, 2016: 141-150.
- [14] 徐磊,王磊. 基于 OpenStack 的私有云搭建的研究[J]. 信息通信, 2014(5): 4-7.

(上接第 146 页)

- [10] 张志恒. LTE-Advanced 系统中中继技术的研究[J]. 信息通信, 2014(3): 188-190.
- [11] Ngo H Q, Larsson E G. Spectral efficiency of the multipair two-way relay channel with massive arrays [C]//Proceedings of ACSSC. [s. l.]: IEEE, 2013: 275-279.
- [12] Yu Yuehua, Wang Peng, Li Yonghui, et al. Computationally efficient relay-source antenna selection for MIMO two-way relay networks [C]//2015 IEEE ICC. [s. l.]: IEEE, 2015: 1625-1630.

- [13] Riihonen T, Werner S, Wichman R. Mitigation of loopback self-interference in full-duplex MIMO relays [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(12): 5983-5993.
- [14] Liu Yinjun, Yan Shi, Li Xiangling, et al. Energy-efficient resource allocation for multi-user two-way relay-assisted OFDM system [C]//21st international conference on telecommunications. [s. l.]: [s. n.], 2014: 150-154.
- [15] Hassibi B, Hochwald B M. How much training is needed in multiple antenna wireless links? [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(4): 951-963.