

基于双码本的多用户 MIMO 有限反馈预编码方法

傅洪亮, 陶 勇, 张 元

(河南工业大学 信息科学与工程学院, 郑州 450001)

(jackfu_zz@126.com)

摘 要:针对多用户多输入多输出(MIMO)下行链路由有限反馈导致的性能缺失,提出一种基于双码本的有限反馈预编码方法。该方法首先在接收端根据期望用户最大信干比准则从预置码本中选取预编码码字及扰动码字反馈给发送端,然后利用矩阵线性变换特性对预编码码字进行线性变换扰动以达到容量最优,从而补偿由于有限反馈导致的容量性能缺失。仿真结果表明,所提出的方法在保证反馈链路开销与系统误码性能的情况下,有效地改善了系统吞吐量。

关键词:多用户;多输入多输出;预编码;有限反馈;码本扰动

中图分类号: TN911.23 **文献标志码:** A

Limited feedback precoding for multiuser MIMO systems based on double codebook

FU Hong-liang, TAO Yong, ZHANG Yuan

(College of Information Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou Henan 450001, China)

Abstract: Concerning the problem of performance loss due to limited feedback in multiuser MIMO downlink systems, a new limited feedback precoding for multiuser Multiple Input Multiple Output (MIMO) systems based on double codebook was proposed. The maximum SINR criteria was used for selecting optimal codeword from the Grassmannian codebook and perturbation codeword at the receiving, and feedback the Grassmannian precoding codeword index and perturbation codeword index to the transmitter, then the perturbation codeword was used at the transmitter to get optimal capacity, and compensating for the capacity performance loss due to the limited feedback. The simulation results show that the proposed method ensures Bit Error Rate (BER) performance and the cost of the feedback link, and the system throughput is improved effectively.

Key words: multiuser; Multiple Input Multiple Output (MIMO); precoding; limited feedback; codebook perturbation

0 引言

信息论研究表明,多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)技术可以在未增加带宽的情况下成倍地提高系统的容量和频谱效率,并有效地改善无线通信系统的性能,当发送端能够准确获知完全或部分信道状态信息时,可以利用信道信息对发送信号进行预处理以消除多址干扰或进一步改善系统吞吐量与误码性能等^[1]。基于空分多址(Space Division Multiple Access, SDMA)技术的多用户 MIMO 系统在发送端采用预编码技术可实现多个用户数据流在相同时间和相同频带内的传输和接收,从而使多用户 MIMO 系统获得更高的系统吞吐量与频谱利用率^[2-3]。

目前,针对多用户 MIMO 下行链路预编码的研究主要集中在下行用户调度算法与预编码方案设计,以及在保证系统吞吐量情况下如何降低反馈链路开销。在时分双工系统中,由于上下行链路信道存在互易性,可以采用块对角化等多用户预编码技术以消除或抑制用户干扰^[4-5];而在频分双工系统中,反馈完全信道状态信息需要很大的反馈链路开销,同时信道估计与传输链路本身也存在一定误差,在实际通信系统中难以实现。近年来基于码本设计的多用户 MIMO 有限反馈预编码成为无线通信领域研究的焦点,同时也被纳入 3G 长

期演进 3GPP LTE 标准^[6]。由于多用户 MIMO 下行链路各用户在距离上的分散性,导致接收机之间不能进行协同联合处理接收信号而导致系统误码性能严重缺失。本文针对有限反馈多用户 MIMO 下行链路用户间不能协同联合处理接收信号,提出一种基于双码本的有限反馈预编码方法。该方法首先在接收端根据期望用户最大信干比准则从预置码本中选取预编码码字及扰动码字反馈给发送端,然后利用矩阵线性变换特性对预编码码字进行线性变换扰动以达到容量最优,从而补偿由于有限反馈导致的容量性能缺失。仿真结果表明,本文所提出的方法在保证反馈链路开销与系统误码性能的情况下,有效地改善了系统吞吐量。

1 系统模型

多用户 MIMO 有限反馈预编码系统模型如图 1 所示,假设发射天线数为 N ,多用户数为 K ,第 k 个用户接收天线数为 M_k 。信源经串并、映射、空时编码等相关处理后,形成 N 层并行数据,再对其进行相应的预编码操作后送入 N 个发射天线,各个天线数据信号经平坦衰落瑞利信道到达 M 个接收天线,在接收端各接收天线进行信道估计、码本选择、空时译码等操作,则第 k 个用户收到的信号矢量可以表示为

收稿日期:2011-01-17;修回日期:2011-02-28。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60940017);河南省科技创新杰出青年基金资助项目(104100510008)。

作者简介:傅洪亮(1965-),男,河南郑州人,副教授,博士,主要研究方向:无线通信、通信信号处理;陶勇(1985-),男,江苏盐城人,硕士研究生,主要研究方向:通信信号处理;张元(1961-),男,河南洛阳人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向:智能信息处理。

$$y_k = H_k F_k w_k s_k + H_k \sum_{i=1, i \neq k}^K F_k w_i s_i + n_k \quad (1)$$

其中: H_k 是第 k 个用户的 $M_k \times N$ 维信道矩阵, 且 H_k 中的元素相互独立并且服从均值为 0, 方差为 1 的复高斯分布; F_k 是用户 k 的 $N \times m_k$ 维预编码矩阵; w_i 是用户 i 的 $m_i \times 1$ 维矩阵; s_i 是用户 i 的发射符号; n_k 是 N_k 维的列矢量, 为第 k 个用户的加性高斯白噪声, 且 $E(n_k n_k^H) = \sigma_k^2 I_{N_k}$ 。式(1)等号右边第一项为期望用户信号, 第二项为干扰用户信号, 第三项则为加性高斯白噪声。

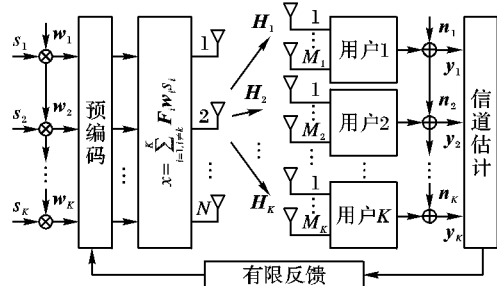


图1 多用户 MIMO 有限反馈预编码系统模型

在多用户 MIMO 有限反馈预编码系统中, 接收端通过信道估计可获知信道状态信息, 根据相应的准则从预置码本中搜索最优码字, 再通过反馈信道链路将码字索引号反馈给发射端, 在发送端再从预置码本中提取对应的码本矩阵进行预编码, 可有效降低反馈链路的开销, 一定程度上提高了系统的性能。

2 码本构建及选取准则

2.1 Grassmannian 码本构建及选取

码本设计的主要思想是对信道矩阵进行相应矩阵量化处理。基于 Grassmannian 空间装箱的码本设计中, 是典型的数学最优化问题, 即求得任意两个子空间间最小距离最大化来构造码本矩阵集^[7]。可定义为 $\arg \min \{ \max \{ d(\Gamma_i, \Gamma_j) \} \}$, 其中, $d(\cdot, \cdot)$ 为任意两个子空间的距离。

不同的距离定义如下。

Chordal 距离定义两个子空间 Γ_i 和 Γ_j 的距离为

$$d_{\text{chordal}}(\Gamma_i, \Gamma_j) = \frac{1}{2} \| \Gamma_i \Gamma_i^* - \Gamma_j \Gamma_j^* \| = \sqrt{M - \sum_{k=1}^M \lambda_k^2(\Gamma_i^* \Gamma_j)} \quad (2)$$

Projection 距离定义两个子空间 Γ_i 和 Γ_j 的距离为

$$d_{\text{projection}}(\Gamma_i, \Gamma_j) = \| \Gamma_i \Gamma_i^* - \Gamma_j \Gamma_j^* \| = \sqrt{1 - \lambda_{\min}^2(\Gamma_i^* \Gamma_j)} \quad (3)$$

Fubini-Study 距离定义两个子空间 Γ_i 和 Γ_j 的距离为

$$d_{\text{fs}}(\Gamma_i, \Gamma_j) = \arccos | \det(\Gamma_i^* \Gamma_j) | \quad (4)$$

基于码本的码字选择准则, 典型的码本选择准则如容量准则、奇异值准则、最小均方误差准则等从码本集中选出最优码本。

若从系统平均误码率最小的角度考虑, 则采用最小误差选取准则获得最优码字:

$$MSE(F_i, H) = \frac{\mathcal{E}_s}{M_s} \left(I_{M_s} + \frac{\mathcal{E}_s}{M_s N_0} F_i^H H^H H F_i \right)^{-1} \quad (5)$$

$$F_{\text{opt}} = \arg \min_{F_i \in \Gamma} [\det(MSE(F_i, H))] \quad (6)$$

若从系统容量最大化的角度考虑, 则采用最大信道选取准则获得最优码字:

$$C(F_i, H) = \ln \left(\det \left(I_{M_s} + \frac{\mathcal{E}_s}{M_s N_0} F_i^H H^H H F_i \right)^{-1} \right) \quad (7)$$

$$F_{\text{opt}} = \arg \max_{F_i \in \Gamma} (C(F_i, H)) \quad (8)$$

其中: $\Gamma = \{F_1, F_2, \dots, F_C\}$, $F_i (1 \leq i \leq C)$ 为码字, C 为码本中包含码字的个数。

2.2 扰动码本构建

考虑旋转矩阵与矩阵 Householder 变换来构建扰动矩阵^[8-9], 这样系统由主码本与扰动码本组成。主码本为传统的 Grassmannian 空间, 其中每个码字 F_i 属于空间 $G(M, M)$ 。由于扰动码本对主码本进行扰动, 相当于对主码本进行线性变换, 并不改变主码本的分布特性, 而扰动码本用于辅助主码本以达到系统最优性能, 其中每个码字 U_i 属于空间 $\Psi(M, M)$ 。进行预编码时, 接收机首先从主码本 $\Psi(M, M)$ 中选取最优码字 F_{opt} , 再从扰动码本中选取最优码字 U_{opt} , 则最终的预编码矩阵为 $W_{\text{opt}} = F_{\text{opt}} U_{\text{opt}}$ 。

基于信道容量最优的扰动矩阵 U_{opt} 是由 $F^H H^H H F$ 矩阵的特征向量构成的。从数学推导的角度, U_{opt} 的作用是通过变换使 $F^H H^H H F$ 矩阵对角化。由矩阵理论知道旋转矩阵可以达到对任一对称阵对角化的效果。因此, 选取旋转矩阵来构造扰动子码本。子码本的结构如下:

$$U_{\text{opt}} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{\text{opt}} & -\sin \theta_{\text{opt}} e^{j\varphi_{\text{opt}}} \\ \sin \theta_{\text{opt}} e^{-j\varphi_{\text{opt}}} & \cos \theta_{\text{opt}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中: $\theta_{\text{opt}} = -\frac{\pi}{4} + \frac{(g-1)}{2(G-1)}$, $\varphi_{\text{opt}} = -\frac{\pi}{2} + \frac{(g-1)\pi}{G-1}$ 。

由矩阵论相关知识, 向量的 Householder 变换可用来构造酉阵。由矩阵论相关知识, 向量的 Householder 变换可定义如下:

$$H = I - 2 \frac{V V^H}{V^H V} \quad (10)$$

矩阵 H 为复共轭酉阵, 满足扰动矩阵的条件, 本文将利用向量的 Householder 变换来构造码本。考虑信道容量增益, 当且仅当

$$U^H F^H H^H H F U = \left(I - 2 \frac{V V^H}{V^H V} \right) F^H H^H H F \left(I - 2 \frac{V V^H}{V^H V} \right) = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{12}^* & a_{22} \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中 $a_{12} = a_{12}^* = 0$ 时获得最大值。

3 线性接收机与容量分析

3.1 线性接收机

线性迫零 (Zero Forcing, ZF) 接收机接收矩阵^[10]如下:

$$G_{\text{ZF}} = (U^H F^H H^H H F U)^{-1} U^H F^H H^H \quad (12)$$

其中: 噪声方差 $\sigma^2 = N_0 G_{\text{ZF}} G_{\text{ZF}}^H = N_0 (U^H F^H H^H H F U)^{-1}$, \mathcal{E}_s 为每个发送符号的平均功率, 第 k 个发送数据流的信噪比为

$$\gamma_{\text{ZF}}^k = \frac{\mathcal{E}_s}{N_0 (U^H F^H H^H H F U)^{-1}} \quad (13)$$

其中 $\zeta = \mathcal{E}_s / N_0$ 。

则 K 个数据流的平均误码率为: $\overline{BER}_{\text{ZF}}(F, U, H) =$

$$\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \varphi(\gamma_{\text{ZF}}^k)。$$

考虑线性最小均方误差 (Minimum Mean Square Error, MMSE) 接收准则:

$$G_{\text{MMSE}} = \left(U^H F^H H^H H F U + \frac{1}{\zeta} I_K \right)^{-1} U^H F^H H^H \quad (14)$$

则 MMSE 均衡后的信噪比为

$$\gamma_{\text{MMSE}}^k = \frac{\zeta}{\left(\mathbf{U}^H \mathbf{F}^H \mathbf{H}^H \mathbf{H} \mathbf{F} \mathbf{U} + \frac{1}{\zeta} \mathbf{I}_K \right)^{-1}} - 1 \quad (15)$$

则 K 个数据流的平均误码率为: $\overline{\text{BER}}_{\text{MMSE}}(\mathbf{F}, \mathbf{U}, \mathbf{H}) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \varphi(\gamma_{\text{MMSE}}^k)$ 。

MMSE 准则考虑了均衡考虑了对噪声的抑制与平行数据流之间的干扰。在高信噪比,当 $\zeta \rightarrow \infty$ 时,主要考虑来自其他信号干扰的影响,则 MMSE 接收机退化为 ZF 接收机;另一方面,在低信噪比,当 $\zeta \rightarrow 0$ 时,主要考虑噪声的影响,MMSE 准则类似于匹配滤波。MMSE 准则依赖信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 的特征,当反馈信道完美信息时,可达到最优预编码矩阵。当给定任何一个码本,误码率 (Bit Error Ratio, BER) 准则要优于其他选取准则。

3.2 系统容量分析

首先假定接收机获得全部信道信息 (Channel State Information, CSI), 采用 Grassmannian 码本, 对于多用户 MIMO 有限反馈预编码系统来说, 其系统容量^[11]可表示为

$$C_{\text{MU-MIMO}} = \sum_{k=1}^K \text{lb}(1 + \text{SINR}_k) \quad (16)$$

其中 SINR_k 为第 k 个用户信干比。重点考虑线性接收机方案, 则第 k 个用户对应的信干比计算如下:

$$\text{SINR}_k = \frac{|\mathbf{G}_k \mathbf{H}_k \mathbf{F}_k \mathbf{U}_k \mathbf{w}_k|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^K |\mathbf{G}_i \mathbf{H}_i \mathbf{F}_i \mathbf{U}_i \mathbf{w}_i|^2 + |\mathbf{G}_k|^2 N_0} \quad (17)$$

则最大化系统容量准则为:

$$\mathbf{F} \mathbf{w} = \arg \max_{\mathbf{F} \mathbf{w}} (C_{\text{MU-MIMO}})$$

综上所述, 多用户 MIMO 有限反馈预编码码本在系统容量和系统误码率方面, 可以显著增加系统性能。采用合理选取扰动码本的有限反馈预编码系统接收性能将进一步提高, 使系统性能接近最优。

4 仿真结果与分析

本章主要对有限反馈多用户下行链路吞吐量进行理论仿真与分析, 其中有限反馈多用户 MIMO 下行链路在发送端都采用容量最大准则进行用户调度, 并在平坦瑞利衰落信道下对多用户 MIMO 有限反馈预编码系统误码率性能进行仿真与分析。系统仿真参数设置如下: 发送天线数目 $N = 2, 4$, 接收天线数目为 2, 系统多用户数目为 2、4, Grassmannian 码本为 6 b, 4 b, 3 b, 2 b, 调制方式为正交相移键控 (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)。本文考虑采用迫零 (ZF) 与最小均方误差 (MMSE) 接收准则对各个方法误码性能进行仿真与分析。

图 2 给出了多用户 MIMO 系统在不同信噪比下随用户数目增加时的吞吐量比较, 反馈比特数为 4。从仿真结果可以看出, 随着系统用户数目增加, 系统吞吐量都有所增加, 但当系统用户数目增加到一定时, 两个方案系统吞吐量也趋于上限定值, 当处于高信噪比时, 系统吞吐量明显提高, 本文所提出的基于码本扰动的有限反馈预编码方法优于传统有限反馈预编码方案, 在保证反馈链路开销与系统吞吐量的情况下, 一定程度上提高了系统接收性能。图 3 给出了多用户 MIMO 在不同用户数下随信噪比增加时的吞吐量比较, 其中发送天线数 $N = 4$, 反馈比特数为 4。从仿真结果可以看出, 多用户

MIMO 系统吞吐量与用户反馈比特数成正比关系, 本文所提出的基于码本扰动的有限反馈预编码方案优于传统有限反馈预编码方案, 有效地改善了系统吞吐量。

图 4、5 分别给出了 4 发 2 收多用户 MIMO 系统在 6 b, 4 b, 3 b 有限反馈预编码 ZF 准则与 MMSE 准则误码曲线比较。从仿真结果可以看出, 6 b 反馈的误码性能明显优于 4 b、3 b 反馈, 但是以子码本反馈量加倍为代价。无论采用 ZF 准则还是 MMSE 准则, 在反馈比特数目相同的情况下, 本文提出的基于码本扰动的有限反馈预编码方案均优于传统检测方法, 在保证反馈链路开销与系统吞吐量的情况下, 一定程度上改善了系统接收性能。

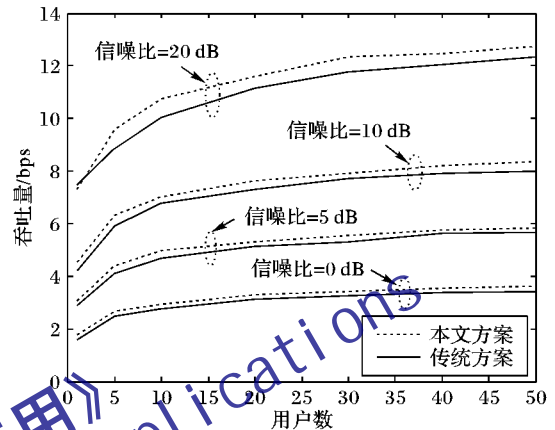


图 2 系统在不同 SNR 下随用户数增加时的吞吐量对比

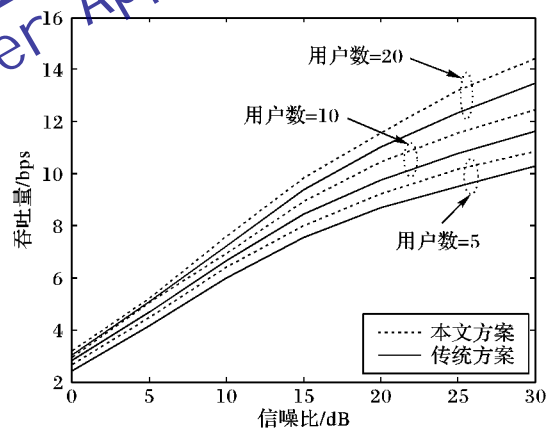


图 3 系统在不同用户数下随 SNR 增加时的吞吐量对比

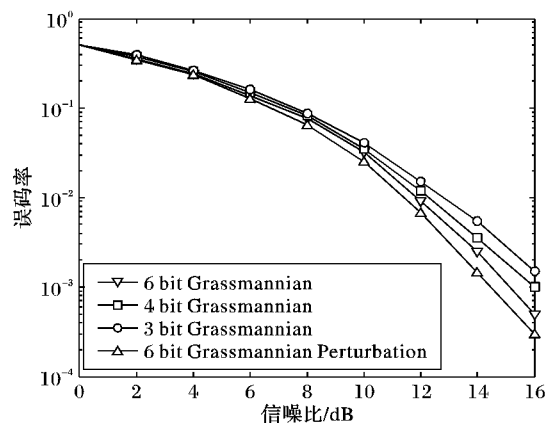


图 4 有限反馈预编码 ZF 准则误码率曲线

5 结语

本文在深入研究有限反馈多用户 MIMO 下行链路的基础上, 提出了一种基于双码本的有限反馈预编码方法。该方法

首先在接收端根据期望用户最大信干比准则从预置码本中选取预编号码字及扰动码字反馈给发送端,然后利用矩阵线性变换特性对预编号码字进行线性变换扰动以达到容量最优,从而补偿由于有限反馈导致的容量性能缺失。仿真结果表明,本文所提出的方法在保证反馈链路开销与系统误码性能的情况下,有效地改善了系统吞吐量,对多用户 MIMO 通信系统实际应用与推广具有一定的理论价值。

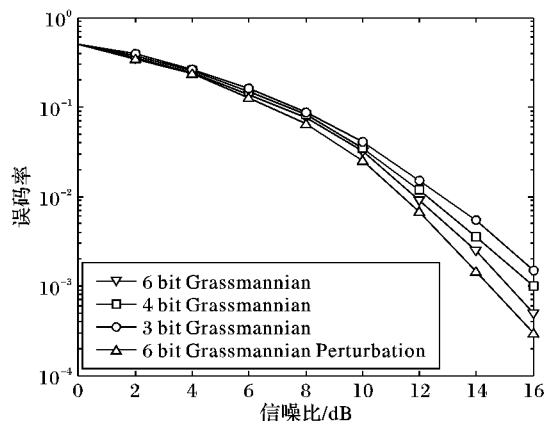


图5 有限反馈预编码 MMSE 准则误码率曲线

参考文献:

- [1] LOVE D J, HEATH R W, LAU V K N, *et al.* An overview of limited feedback in wireless communication systems [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008, 26(8): 1341–1365.
- [2] CHEN C-J, WANG L-C. Enhancing coverage and capacity for multiuser MIMO systems by utilizing scheduling [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2006, 5(5): 1148–1157.
- [3] KIM I H, LOVE D J. On the capacity and design of limited feedback multiuser MIMO uplinks [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2008, 54(10): 4712–4724.
- [4] SPENCER Q H, SWINDLEHURST A L, HAARDT M. Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2004, 52(2): 461–471.
- [5] WANG DAFEI, JORSWIECK E A, SEZGIN A, *et al.* Joint Tomlinson-Harashima precoding with diversity techniques for multiuser MIMO systems [C]// *VTC 2005: IEEE 61st Vehicular Technology Conference*. Piscataway, NJ: IEEE, 2005, 2: 1017–1021.
- [6] 方舒, 李立华, 张平. 基于码本的有限反馈非酉矩阵预编码多用户 MIMO 系统[J]. *电子与信息学报*, 2008, 30(10): 2419–2422.
- [7] LOVE D J, HEATH R W, Jr, STROHMER T. Grassmannian beamforming for multiple-input multiple-output wireless systems [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2003, 49(10): 2735–2747.
- [8] ZHOU SHENGLI, LI BAOSHENG. BER criterion and codebook construction for finite-rate precoded spatial multiplexing with linear receivers [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006, 54(5): 1653–1665.
- [9] HUANG YONGMING, XU DAOFENG, YANG LUXI, *et al.* A limited feedback precoding system with hierarchical codebook and linear receiver [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(12): 4843–4848.
- [10] RYAN D J, COLLINGS P B, CLARKSON I V L, *et al.* Performance analysis on perturbation multiuser MIMO systems with limited feedback [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2009, 57(9): 2633–2644.
- [11] LEE H, SOHN I, LEE K B. Low-feedback-rate and low-complexity downlink multiuser MIMO systems [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, 59(7): 3640–3645.
- [12] BERKELEY: USENIX Association, 2006: 205–218.
- [13] ANDROUTSELLIS-THEOTOKIA S, SPINELLIS D. A survey of peer-to-peer content distribution technologies [J]. *ACM Computing Surveys*, 2004, 36(4): 335–371.
- [14] POUREBRAHIMI B, BERTELS K, VASSILIADIS S. A survey of peer-to-peer networks [C]// *Proceedings of the 16th Annual Workshop on Circuits, Systems and Signal Processing*. Veldhoven, Netherlands: [s. n.], 2005: 570–577.
- [15] DEAN J, GHEMAWAT S. Distributed programming with mapreduce [M]// *Beautiful Code*. Sebastopol: O'Reilly Media, Inc., 2007: 371–384.
- [16] ZAHARIA M, KONWINSKI A, ANTHONY D, *et al.* Improving mapreduce performance in heterogeneous environment [C]// *8th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation*. Piscataway, NJ: IEEE, 2008, 1: 29–42.
- [17] 曹宁, 吴中海, 刘宏志, 等. HDFS 下载效率的优化[J]. *计算机应用*, 2010, 30(8): 2060–2066.
- [18] 徐非, 杨广文, 鞠大鹏. 基于 Peer-to-Peer 的分布式存储系统的设计[J]. *软件学报*, 2004, 15(2): 268–277.
- [19] QIU DONG-YU, SRIKANT R. Modeling and performance analysis of BitTorrent-like peer-to-peer networks [C]// *Proceedings of the ACM SIGCOMM 2004*. New York: ACM, 2004: 367–377.
- [20] GAETA R, GRIBAUDO M, MANINI D, *et al.* Analysis of resource transfer in peer-to-peer file sharing applications using fluid models [J]. *Performance Evaluation Journal: Peer-to-Peer Computing Systems*, 2006, 63(3): 149–174.

(上接第 2320 页)

增加,但是三种优化算法都能提高下载速率,下载点选择算法能够均衡集群负载。

下一步工作主要集中在如下四方面:1)针对 HDFS 集群 NameNode 性能瓶颈问题进行进一步的分析和研究;2)在本文算法的基础上,选择合适的算法与 Map/Reduce 进行匹配,达到数据下载与数据计算的同步;3)通过为多个 HDFS 建立的文件索引、MD5 文件唯一性标识,实现 HDFS 跨集群文件级分布式文件消重系统,以提高 HDFS 集群内磁盘的空间利用率;4)采用分离原始数据块与备份数据块在 HDFS 中的存放策略,改进 HDFS 的存储架构。

参考文献:

- [1] BORTHAKU D. The Hadoop distributed file system: architecture and design [EB/OL]. (2007-07-01) [2011-01-17]. http://hadoop.apache.org/common/docs/r0.18.2/hdfs_design.pdf.
- [2] GHEMAWAT S, GOBIFF H, LEUNG S-T. The Google file system [C]// *Proceedings of 19th ACM Symposium on Operating System Principles*. New York: ACM, 2003: 29–43.
- [3] DEAN J, GHEMAWAT S. MapReduce: simplified data processing on large clusters [C]// *OSDI '04: Sixth Symposium on Operating System Design and Implementation*. Berkeley: USENIX Association, 2004: 137–150.
- [4] CHANG F, DEAN J, GHEMAWAT S, *et al.* Bigtable: a distributed storage system for structured data [C]// *Proceedings of the 7th USENIX Syrup on Operating Systems Design and Implementation*.