

一种低复杂度非满秩正交随机波束成型传输方法

王德胜 郑志凯 刘应状 朱光喜 林宏志
(华中科技大学电信系 武汉 430074)

摘要 与现有研究点对点的无线通信手段不同,基于网络整体架构,分析 SINR、波束矢量、用户数、吞吐量内在关联,发掘网络内部多用户空间分布不一致性带来的用户间的分集增益,提升系统的吞吐量。将随机波束成型与迫零算法有机结合,研究一种新型非满秩正交波束成型算法,克服了满秩波束间的相互干扰,提升系统容量;最后对性能作了详细分析与验证,得出几个极有意义的结论。

关键词 多用户分集,随机波束形成,迫零算法,吞吐量

中图分类号 TN929 **文献标识码** A

Low-complexity Deficient-rank Orthogonal Random Beamforming Algorithm

WANG De-sheng ZHENG Zhi-kai LIU Ying-zhuang ZHU Guang-xi LIN Hong-zhi
(Huazhong University of Sci. & Tech., Wuhan 430074, China)

Abstract This paper achieved the user diversity by analyzing the relationship among the SINR, beamforming, user number and throughput, which is different with the traditional P2P communication. The deficient-rank ORBF algorithm, which we proposed can improve the throughput greatly, because the algorithm reduces the multi-beam interference and promotes the throughput. The simulation results are given at the end of paper.

Keywords User diversity, Random beamforming, Zero-forcing beamforming, Throughput

1 引言

多天线通信系统由于能显著提高无线链路的容量而受到广泛关注。目前,大多数针对多天线通信系统容量的研究都基于发射端能获得完整的信道状态信息(Channel State Information, CSI)的假设,但是在很多应用中,这种假设是不现实的。因此对部分 CSI 的反馈研究吸引了众多关注。文献[1, 2]借鉴传统意义上的波束形成概念,利用端对端的信干噪比(Single Interference Noise Rate, SINR)替代 CSI 的方法,对 SINR 较高的用户进行信息反馈,提出一种随机的波束形成概念,使随机产生的波束服务于相对性能最优的用户,使不同的用户有更多的机会成为最好的用户,提高系统的比例公平性。文献[3]在文献[2]的基础上,研究一种满秩的正交随机波束成型(orthogonal random beamforming, ORBF)方案,同时服务于多个用户。但是,我们在研究中发现,这种满秩的 ORBF 传输方案存在较大的多用户波束间的干扰,即使是在天线数耗费较高的情况下,系统性能也难以达到预期的效果。

MIMO 波束成型技术可分为随机波束成型(Random Beamforming, RBF)和迫零波束成型(Zero-Forcing Beamforming, ZFBF)两大类。随机波束成型是在发射端随机地构建 N 个波束(N 通常为发射端天线数)同时进行数据发射,接

收端分析得到最大的 SINR 波束,并将波束索引值反馈给发射端。然后,发射端在每个波束上选择 SINR 最优的用户作为服务用户。

随机波束成型的优点在于反馈开销小、实施复杂度低,且在用户数足够大的情况下能获得较高系统容量,但是在实际用户数较少的情况下,由于波束矢量与用户方位角匹配的精度的误差,随机波束成型的系统容量较低,远没有达到多用户 MIMO 系统的容量。

迫零波束成型是假设发射端已知所有用户的信道状态信息^[4],然后通过调度算法选择相应的用户并对这些用户的信道矩阵求逆来获得波束成型矢量的一种技术。由于各波束成型矢量是通过用户对信道求逆获得,因此它能消除用户信道间干扰,从而获得很高的系统容量。其代价是每个接收端需反馈精度足够高的信道状态信息,面临着巨大的反馈开销。

本文旨在通过对随机波束成型与迫零算法优缺点的研究,将二者有机结合,研究一种非满秩的 ORBF 方法,在不增加系统开销的前提下,使系统逼近系统容量上限,实现吞吐量最大化。方法步骤如下:1)基站发射随机导频矢量,各接收机根据接收导频信息估计精减的信道状态,并反馈给基站,基站进行最佳用户预选,生成备选调度用户集;2)将用户集通过信令方式发送给接收端;3)用户集中用户反馈完整 CSI 或迫

收稿日期:2008-04-16 本文受国家自然科学基金重大资助课题(60802009),国家 863 面上资助项目(No. 2008AA01Z204),博士后基金一等资助(20070410279),湖北省自然科学基金(2007ABA008)资助。

王德胜(1975—),男,副教授,博士后,主要研究方向为 MIMO 信息论、MIMO-OFDM 系统建模、空时信道建模、公平性资源调度等, E-mail: dswang@hust.edu.cn;刘应状(1964—),男,教授,主要研究方向为新一代移动通信系统、多媒体及应用、信号处理等;朱光喜(1945—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为宽带多媒体通信等。

零成型波束矢量;4)基站从用户集中再次选取最优用户,完成用户调度。该策略预期将同时具有随机波束成型和迫零波束成型的优点,降低了系统的反馈开销和实施复杂度,提高了系统容量。同时,在仿真与结论部分,将给出若干一直被忽视、但却很有意义的几个结论,对于提高系统整体性能具有相当大的意义。

2 系统模型

考虑一种通用的多天线多用户广播信道模型,发射天线数为 N_T ,接收天线数为 N_R 、用户数为 K 。假设信道是块衰落的,即信道矩阵在相干间隔 T 内保持不变。考虑到蜂窝系统中,用户个数通常远大于基站的天线数,且基站的天线数通常大于每个用户的接收天线数,因此,可假定 $K \gg N_T$ 和 $N_R \leq N_T$ 。

令 $S(t)$ 表示时隙 t 发射的 $N_T \times 1$ 符号向量,则时隙 t 第 i 个用户的 $N_R \times 1$ 接收信号矢量 $Y_i(t)$ 可以表示为:

$$Y_i(t) = \sqrt{\rho_i} H_i S(t) + W_i, i=1, \dots, n \quad (1)$$

其中 ρ_i 为信道衰落, H_i 是 $N_R \times N_T$ 复信道矩阵, W_i 是 $N_R \times 1$ 加性噪声, H_i 和 W_i 相互独立且服从零均值单位方差的复高斯分布 $CN(0, 1)$, 约定总发射功率为 P_T 。

显然,对于式(1)而言,在分析 SINR(Signal Interference Noise Rate)时,需要对接收信号进行合并,考虑到收发两端是独立的,因此,合并的性能并不影响发射端波束形成的策略,因此,为简化分析,我们可暂设接收端天线数 $N_R = 1$ 。

考虑在满秩的正交 ORBF 中,发射端随机构造 N_T 个独立分布的正交向量 $\Phi_m (m=1, \dots, N_T)$, 每一向量与特定的用户对。在时隙 t , 总的发射信号为^[1]:

$$S(t) = \sum_{m=1}^{N_T} \Phi_m(t) s_m(t), t=1, \dots, T \quad (2)$$

为表示方便,下面将省去时间索引。因此,第 i 个用户的接收信号为

$$Y_i = \sqrt{\rho_i} \sum_{m=1}^{N_T} H_i \Phi_m s_m + W_i, i=1, \dots, n \quad (3)$$

用户 i 通过对接收信号 Y_i 分析,反馈其 SINR _{i,m} 至发射端,基站通过对收到的 SINR _{i,m} 分析,形成矢量 Φ_m 的用户集初选。然后,将用户集通过广播信道发送至用户端,为迫零波束形成奠定基础。

3 备选用户性能分析

式(3)中,若第 i 个用户对第 m 个随机波束矢量感兴趣,将 s_m 以外的信号视为干扰,对应的 SINR 值为^[1]:

$$\text{SINR}_{i,m} = \frac{|H_i \Phi_m|^2}{1/\rho + \sum_{k \neq m} |H_i \Phi_k|^2}, m=1, \dots, N_T \quad (4)$$

假定用户 i 反馈信息为二元组 $(\max_{1 \leq m \leq N_T} \text{SINR}_{i,m}, \arg \max_{1 \leq m \leq N_T} \text{SINR}_{i,m})$, 即反馈信息为各用户所能获取的最大 SINR 及其对应的波束索引值 m ; 显然,当用户较多时,每一波束矢量 Φ_m 将有多个用户的二元信息组与之对应。然后,基站再从与 Φ_m 有关的用户集中进行优中选优,即选取 $\arg \max_{1 \leq i \leq K} \text{SINR}_{i,m}$ 的用户 i 。建立用户 i 与波束矢量 m 之间的一对一映射关系。基于这个调度方案的吞吐量为:

$$R_{\text{beam}} = E \left\{ \sum_{i=1}^{N_T} \log_2(1 + \text{SINR}_{i,m}) \right\}$$

$$= N_T E \{ \log_2(1 + \text{SINR}_{i,m}) \} \quad (5)$$

其中 $(i, m) = \underset{\substack{1 \leq i \leq N_T \\ 1 \leq m \leq n}}{\text{argmax}} \text{SINR}_{i,m}$

观察式(5)可知,基站天线个数对系统调度性能有相当大的影响。当基站只有一个天线时,该方案退化成调度有最大 SINR 的用户,这就失去了随机调度的意义,难以获取用户的空间分集;而当发射天线数 N_T 足够大时,从 SINR 的表达式(4)分母容易看出,系统主要受到基站波束间的干扰信号影响,即近基站的用户在接收较强信号的同时也遭受较强的干扰。这也是目前相关文献所忽略的潜在事实。

因此,要成为最好的用户不仅仅依赖于接收 SINR,而主要依赖于用户的信道向量 H_i 和最接近的波束 $\Phi_m (m=1, \dots, N_T)$ 的匹配程度、以及其它波束旁瓣的干扰。甚至在某些条件下,如在满秩条件下,由于波束间的相互干扰,简单的波束数的增多并不一定能获取容量上的增长,甚至可能出现消极作用。因此,满秩正交随机波束在逼近系统容量上限时面临着较大局限。第 5 节将由仿真实验对此进行详细分析。为克服这种用户间的波束干扰,本文拟在不增加反馈负荷的条件下,结合迫零波束形成算法降低用户间干扰。

4 降低复杂度的迫零波束成型算法

迫零波束成型算法的实施主要分为两个阶段:(1)选取最优用户集 S ; (2)计算波束成型权值矢量和最优功率分配。

在实际中用户数 K 比较大时,如何选择最优的发送矢量 w_k 与功率 P_k 分配是相当复杂的。而根据前一部分中 SINR _{i,m} 所选出的用户集,对有限的用户进行反馈,极大精简了反馈信息。且在该方案中,用户不必像现有 ZFBF 那样反馈完全 CSI 信息,仅需反馈最佳的波束形成矢量。此算法能很好地降低运算复杂度,同时也保证了较少的容量损失。

在 ZFBF 中,波束成型权值矢量选择的目标是实现调度用户之间的零干扰。令 $H(S)$ 和 $W(S)$ 分别为备选用户集 S 的信道子矩阵与发射矢量 $W = [w_1, \dots, w_K]$, 其中通过求 $H(S)$ 的伪逆来选取 $W(S)$, 即:

$$W(S) = H(S)^+ = H(S)^* (H(S)H(S)^*)^{-1} \quad (6)$$

那么式(5)简化为:

$$R_{\text{ZFBF}}(S) = \max_{\substack{P_i \\ i \in S}} \sum_{i \in S} \log(1 + P_i) \quad (7)$$

其中,

$$\gamma_i = \frac{1}{\|w_i\|^2} = \frac{1}{[(H(S)H(S)^*)^{-1}]_{i,i}} \quad (8)$$

为用户 i 的有效信道增益。在式(8)中的最优功率分配满足注水分布,

$$P_i = (\mu \gamma_i - 1)^+ \quad (9)$$

其中 $(x)^+$ 表示 $\max\{x, 0\}$, 那么注水深度 μ 由下式决定:

$$\sum_{i \in S} \left(\mu - \frac{1}{\gamma_i} \right)^+ = P \quad (10)$$

最后,在所有调度用户组合下所获得总速率的最大值即为 ZFBF 的总速率,即:

$$R_{\text{ZFBF}} = \max_{S \subset \{1, \dots, K\}, |S| < M} R_{\text{ZFBF}}(S) \quad (11)$$

此时由式(3)分解,用户 k 的接收信号为:

$$y_k = (\sqrt{P_k} h_k w_k) s_k + \sum_{j \neq k} \sqrt{P_j} h_k w_j s_j + z_k \quad (12)$$

第一项为有效信号,第二项为用户波束间干扰,最后为噪声项。在功率约束 $\sum_{k=1}^K \|w_k\|^2 P_k \leq P$ 条件下,可以获得的总速率为:

$$R_{BF} = \max_{w_k, P_k, k=1}^K \log \left(\frac{1 + \sum_{j=1}^K P_j |h_k w_j|^2}{1 + \sum_{j=1, j \neq k}^K P_j |h_k w_j|^2 + \sigma^2} \right) \quad (13)$$

5 仿真结论与分析

从以上的分析可知,系统性能与波束数、波束的匹配精度、用户数、天线数等均有密切联系,探讨各变量之间所存在的相互影响与制约关系,对系统性能的提升具有相当大的意义;本节将从仿真的角度,对以上的分析作较为详细的验证,得出如下几个有意义的结论:

(1) 通信系统容量在满秩情况下不随发射天线增加而增加

在点对点的通信系统中,天线的增加能显著增加信道容量;然而,在点对多点的通信系统中,基站天线数的增加不随天线数的增加而增加。图 1 表示出在给定不同总发射功率限制 P_T 的条件下,使用 ORBF 系统的吞吐量与发射天线数的关系。其中吞吐量是用第 3 节的最大 SINR 调度算法容量式近似表示。系统用户数为 100。

从图 1 中可以看出,当发射天线数增长到一定程度时,吞吐量趋于饱和。这是因为 SINR 主要受到干扰信号的影响,而非白噪声。随着发射天线数与波束数的增长,干扰强度也随之增长,因此继续增加发射天线数并不能带来吞吐量的增加。

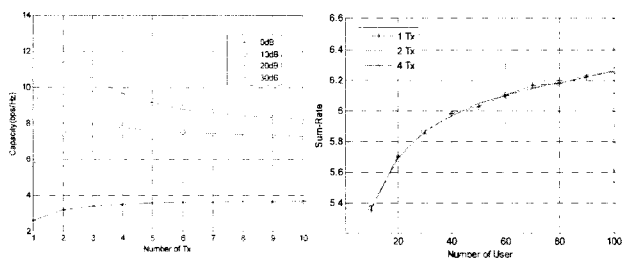


图 1 功率确定发射天线数对容量的影响

因此,从直观上考虑,假如减少传输的波束个数,在一定程度上减少了同时通信的空间通道数,但却可以减小干扰,使单个用户效率增加,因而有可能带来吞吐量的增加,以下将对此假说进行验证。

(2) 波束数确定时,容量与发射天线数无关

传统意义上的点对点 MIMO 能显著提升系统容量,原因在于能利用空间的复用增益;而利用随机波束形成时,由于充分利用了用户空间分布的不一致特性,通过寻求波束匹配最佳的用户,能实现 MIMO 等效的空间复用增益,实现容量提升。

基站首先构造 N_T 个 $N_T \times 1$ 波束 $\Phi_m (m=1, \dots, N_T)$,再从中随机选择 $M (M \leq N_T)$ 个波束进行传输。此时, SINR 的表达式(4)变化为

$$\text{SINR}_{i,m} = \frac{|H_i \Phi_m|^2}{M/\text{SNR} + \sum_{k=1, k \neq m}^M |H_i \Phi_k|^2}, m=1, \dots, M \quad (14)$$

图 2 是发射天线数分别为 1, 2, 4, 使用 1 个波束时系统总吞吐量与用户数的关系图。其中, $\text{SNR}=0\text{dB}$, 用户数范围是 1~100。从图中可以看出,在波束数固定、非满秩的情况下,总吞吐量与用户数的关系也不随发射天线数的改变而改

变;结合式(14),逆推可得结论: SINR 与发射天线数无关,而与实际使用的波束个数有关。

(3) 通信容量在满秩情况下并非最优

图 3 与图 4 是 $N_T=4$, SNR 分别为低(0dB)、高(30dB)时的吞吐量仿真图。低 SNR(0dB)下,当用户数较少时,由于波束的匹配较弱与相互干扰起主导作用,较少的波束获取的总吞吐量高于满波束时的吞吐量;当用户数增多时,由于用户分集增益增加,提高了波束的匹配精度,使用全部波束可以获得最高的总吞吐量。高 SNR 时,用户间的干扰起主导作用。因此,从使用较少的波束能有效避免用户间的干扰, 2 个波束时较其它波束数有明显的优势。

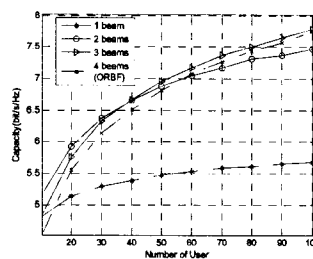


图 3 SNR=0dB 时,用户数对容量的影响

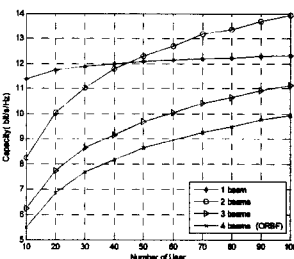


图 4 SNR=30dB 时,用户数对容量的影响

综上所述,所采用波束数、SNR 与系统性能有密切关系,波束满秩时并非最优。

(4) 合理利用波束瞬态特性提高系统性能

图 3 与图 4 是对系统波束个数确定的条件下对众多瞬态的统计的结果,而实际上,瞬态吞吐量是呈起伏变化的,特定的波束个数与容量大小之间并不是确定的关系,不同的波束数均有可能以一定的概率呈现较大的吞吐率。因此,鉴于随机波束形成的良好特性,我们可设想进一步采用“峰值”通信的方式,在波束数上限确定的条件下,尽可能采用瞬态容量较大的波束数进行通信,预期有望进一步提升系统的性能,对随机波束成型作进一步延伸。

本部分仿真在 $P_T=30\text{dB}$, $N_T=4$ 的条件下,波束上限 L 分别为 2, 3, 4 个波束时系统容量随用户数的变化情况,并仿真同条件下 ORBF 的系统容量作为比较。从图 5 可以看出,瞬态波束数可调的随机波束成型算法较 ORBF 有较大优势,频谱效率能获取 5bit/Hz/s 的提升,在无线通信中实现了实质性的跨越。同时可以看出,当发射端使用波束数上限 L 为 2 或 3 时,就能获得很好的性能,再增加可选波束集的大小($L=4$)所带来的容量提升已非常有限。

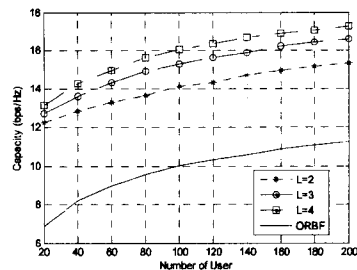


图 5 波束个数可变条件下的性能

6 进一步的研究

以上的分析与仿真表明,ORBF 虽然能以多个波束与多

(下转第 50 页)

- [2] Deering S. Multicast Routing in Internetworks and extended LANs[J]. *ACM Transaction on Computer Systems*, 1990, 8(2): 85-110
- [3] Mantra-Monitoring C. Multicast on a Global Scale[OL]. <http://www.caida.org/tools/measurement/Mantra/>, 2008
- [4] Diot C, Levine B, Lyles J, et al. Deployment issues for the IP multicast services and architecture[J]. *IEEE Network*, 2000, 14(1): 78-88
- [5] Almeroth K. Multicast Help Wanted: From Where and How Much[C]// *IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*. Vegas, Nevada, 2007
- [6] Ratnasamy S, Ermolinskiy A, Shenker S. Revisiting IP Multicast[C]// *ACM SIGCOMM*. Pisa, Italy, 2006
- [7] Saltzer J, Reed D, Clark D. End-to-end arguments in system design[J]. *ACM Transactions on Computer System*, 1984, 2(4): 195-206
- [8] Francis P, Pryadkin Y, Radoslavov P, G, et al. Yoid: Extending the Internet Multicast Architecture[OL]. <http://www.aciri.org/yoid>, 2008
- [9] Chu Y H, Rao S G, Zhang H. A case for end system multicast [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, 2002, 20(8): 1456-1471
- [10] Pendarakis D, Shi S, Verma D, et al. ALMI: An application level multicast infrastructure[C]// the 3rd Usenix Symposium on Internet Technologies and System. Boston, USA, 2001
- [11] Banerjee S, Bhattacharjee B, Kommareddy C. Scalable application layer multicast[C]// *ACM SIGCOMM*. Pittsburgh, USA, 2002
- [12] Zhuang S Q, Zhao B Y, Joseph A D, et al. Bayeux: An architecture for scalable and fault-tolerant wide-area data dissemination [C]// the 11th Intl. Workshop on Network and Operating System Support for Digital Audio and Video (NOSSDAV). New York, USA, 2001
- [13] Helder D A, Jamin S. End-host multicast communication using switch-tree protocols [C]// the 2nd IEEE/ACM International Symposium on Cluster Computing and the Grid. Berlin, Germany, 2002
- [14] Ratnasamy S, Francis P, Handley M, et al. A scalable content-addressable network[C]// *ACM SIGCOMM*. New York, USA, 2001
- [15] Castro M, Druschel P, Kermarrec A M, et al. SCRIBE: A large-scale and decentralized application-level multicast infrastructure [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2002, 20(8): 1489-1499
- [16] Kostic D, Rodriguez A, Albrecht J, et al. Bullet: High bandwidth data dissemination using an overlay mesh[C]// the 20th ACM Symposium on Operating System Principles(SOSP). New York, USA, 2003
- [17] Castro M, Druschel P, Kermarrec A M, et al. Splitstream: High-bandwidth multicast in cooperative environments [C]// 20th ACM Symposium on Operating System Principles(SOSP). New York, USA, 2003
- [18] Li Z, Mohapatra P. HostCast: A new overlay multicasting protocol [C]// *IEEE International Conference on Communications (ICC)*. Alaska, USA, 2003
- [19] Cui Y, Li B, Nahrstedt K. oStream: Asynchronous streaming multicast in application-layer overlay network[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2004, 22(1): 91-106
- [20] Jannotti J, Gifford D K, Johnson K L, et al. Overcast: Reliable multicast with an overlay network[C]// the 4th Usenix Symposium on Operating System Design and Implementation (OSDI). Denver, Colorado, 2000
- [21] Chawathe Y, McCanne S, Brewer E. RMX: Reliable multicast in heterogeneous environments[C]// *IEEE INFOCOM*. Tel-Aviv, Israel, 2000
- [22] Shi S. A Proposal for A Scalable Internet Multicast Architecture [R]. WUCS-0103, Washington University in StLouis, USA, 2001
- [23] Chawathe Y. Scattercast: An adaptable broadcast distribution framework[J]. *ACM Multimedia System*, 2003, 9(1): 104-118
- [24] Banerjee S, Kommareddy C, Bhattacharjee K K B, et al. Construction of an efficient overlay multicast infrastructure for real-time applications[C]// *IEEE INFOCOM*. San Francisco, USA, 2003
- [25] Lao L, Cui J H, Gerla M. TOMA: A Viable Solution for Large-Scale Multicast Service Support [C]// *IFTP NETWORKING*. Waterloo, Canada, 2005
- [26] Clark D, Tennenhouse D L. Architectural Considerations for a New Generation of Protocols[C]// *ACM SIGCOMM*. Philadelphia, USA, 1990
- [27] Shi S, Turner J, Waldvogel M. Dimensioning server access bandwidth and multicast routing in overlay networks[C]// the 11th Intl. Workshop on Network and Operating SysSupport for Digital Audio and Video (NOSSDAV). New York, USA, 2001
- [28] Shi S, Turner J. Routing in Overlay Multicast Networks[C]// *IEEE INFOCOM*. New York, USA, 2002
- [29] Fei A, Cui J H, Gerla M, Faloutsos M. Aggregated Multicast: an approach to reduce multicast state[C]// 6th Global Telecommunications Conference(GLOBECOM). Texas, USA, 2001

(上接第 32 页)

个用户进行通信,实现了空间复用的最大化,但也面临着新的问题:波束越多,用户间干扰越大,导致系统整体性能的降低。鉴于天线个数、波束个数与系统性能之间的不确定性,尤其是无线信道时变特性,给系统性能改善带来极大挑战。因此,我们还将非满秩波束的基础上,结合波束成型的瞬态特性,研究非满秩的天线传输问题,即考虑从多个天线中选出部分最优的天线,进行空间多用户复用,在现有确定天线基础上增加一维新的自由度,以期达到较高的性能。

参 考 文 献

- [1] Sharif M, Hassibi B. On the capacity of MIMO broadcast chan-

nels with partial side information[J]. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 2005, 51(2): 506-522

- [2] Hassibi B, Marzetta T L. Multiple-antennas and isotropically random unitary inputs: The received signal density in closed form[J]. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 2002, 48(6): 1473-1484
- [3] Viswanath P, Tse D N C, Laroia R. Opportunistic beamforming using dumb antennas[J]. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 2002, 48(6): 1277-1294
- [4] Taesang Yoo, Goldsmith A. On the Optimality of Multiantenna Broadcast Scheduling Using Zero-Forcing Beamforming[J]. in *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 2006, 24(3): 528-541