



大规模 MIMO 系统中的 STBC-BF 发射方案

康 涛, 战金龙

(西安邮电大学通信与信息工程学院 西安 710121)

摘 要: 提出了大规模 MIMO 系统中的特征波束形成结合空时编码 (space-time block coding combined with eigen-beamforming, STBC-BF) 的发射方案。首先进行发射符号的空时编码, 然后进行特征波束成形。接收端在两个正交的空间波束上进行空时译码, 既可以获得空间分集增益, 又可以获得阵列增益。理论分析和仿真结果都证明了该方案的有效性。

关键词: 大规模 MIMO; 波束成形; 空时编码; STBC-BF

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015263

A STBC-BF Transmit Scheme in Massive MIMO System

Kang Tao, Zhan Jinlong

(School of Telecommunication and Information Engineering, Xi'an University of
Posts & Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: A STBC-BF transmit scheme in massive MIMO system was proposed. Firstly, the signal was space-time block coded, then passed into the eigen-beamformers, respectively. At the receiver, the space-time decoding was performed on two orthogonal beams. The diversity gain and beamforming gain can be obtained simultaneously. Both theory analysis and simulation results confirm the validity of the proposed scheme.

Key words: massive MIMO, beamforming, space-time block coding, STBC-BF

1 引言

随着数据业务的高速发展以及更加高速率、大容量的通信要求, 传统的 MIMO 技术显然已经无法适应这种业务需求, 而由贝尔实验室的 Marzetta 提出的大规模 MIMO 已经成为研究的热点^[1,2]。大规模 MIMO 系统是通过在基站配置由成百上千根天线组成的天线阵列, 同时在有限的时频资源上服务更多的用户终端, 并且可以通过数量庞大的天

线来增加有用信号的功率, 提高了功率利用率, 同时也增大了 SINR 以此来减少干扰的影响。

空时编码和波束成形则是两种不同的发送分集技术。空时编码的目的是通过编码的方式来提供发射分集, 通过在不同的天线上发送有特定关系的符号, 从而可以使接收端正确地获取原始发送信号^[3]; 波束成形, 简单地说就是对数据先加权再发送, 将信号能量聚集在期望用户上, 等效于形成一个窄的发送波束^[4]。在大规模 MIMO 系统中波束

收稿日期: 2015-05-06; 修回日期: 2015-10-10

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(No.2011JM8027), 国家自然科学基金资助项目(No.61501371)

Foundation Items: Natural Science Foundation of Shaanxi(No.2011JM8027), The National Natural Science Foundation of China(No.61501371)

论文引用格式: 康涛, 战金龙. 大规模 MIMO 系统中的 STBC-BF 发射方案. 电信科学, 2015263

Kang T, Zhan J L. A STBC-BF transmit scheme in massive MIMO system. Telecommunications Science, 2015263



成形/预编码方案对其信号处理发挥着巨大作用^[5-8]。在参考文献[6]中,分析了ZF(zero-forcing)在下行大规模MIMO系统中频谱效率、能量效率等方面的性能;在参考文献[7]中,提出了一种复杂度降低的ZFBF(zero-forcing beamforming)方案;在参考文献[8]中,对大规模MIMO系统中ZF与MRT(maximum ratio transmission)两种方案的性能进行了分析对比。本文在大规模MIMO系统中将空时编码和波束成形相结合(即STBC-BF技术),可以在不增加算法复杂度的情况下获得更好的性能。

2 STBC-BF

2.1 STBC

空时块码(STBC)是由Alamouti最先提出的,它是用于两根发射天线的复正交空时分组码^[9]。Alamouti空时编码首先需要将 k byte信息调制为 2^k 进制的符号,即通过调制将比特流变为符号流,之后再选取两个连续的符号,根据如下的空时编码矩阵进行编码。

$$X = \begin{bmatrix} x_1 & -x_2^* \\ x_2 & x_1^* \end{bmatrix} \quad (1)$$

即在当前时隙内,两根天线分别发送 x_1 和 x_2 ,而在下一个时隙,第一根天线发送的为 $-x_2^*$,第二个天线发送的为 x_1^* 。空时编码器结构如图1所示。

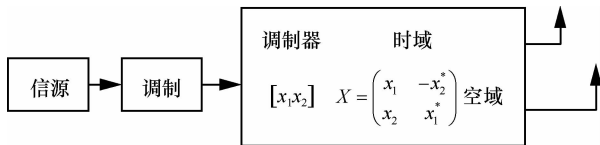


图1 空时编码器结构

相邻两个符号周期内接收到的信号表示为:

$$\begin{cases} r_1 = h_1 x_1 + h_2 x_2 + n_1 \\ r_2 = -h_1 x_2^* + h_2 x_1^* + n_2 \end{cases} \quad (2)$$

其中, n_1, n_2 为加性高斯白噪声。

译码过程如下:

$$\begin{bmatrix} h_1^* & h_2 \\ h_2^* & -h_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} = (|h_1|^2 + |h_2|^2) \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_1^* n_1 + h_2 n_2^* \\ h_2^* n_1 - h_1 n_2^* \end{bmatrix} \quad (3)$$

从而可以得到如下输出信号:

$$\begin{pmatrix} \tilde{s}_1 \\ \tilde{s}_2 \end{pmatrix} = (|h_1|^2 + |h_2|^2) \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \tilde{z}_1 \\ \tilde{z}_2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

由于Alamouti空时编码可以实现满分集、全速率,并且通过采用简单的最大似然译码准则可以获得完全的天线增

益,而且易于实现,因此本文以Alamouti为例进行讨论。

2.2 STBC-BF

根据发射端天线的阵列分组情况,此方案可以分为两类^[10,11]:一类是单天线阵,即发射端的所有天线作为一个天线阵,将加权后的信号在所有天线上同时发送,如图2所示;另一类是多天线阵,即发射天线分为多个子阵,将各自加权后的信号通过各自的天线阵发送,如图3所示。

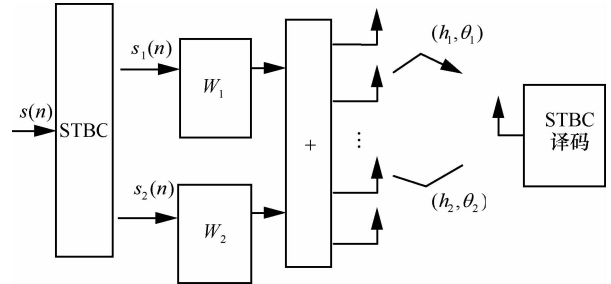


图2 单天线子阵模型

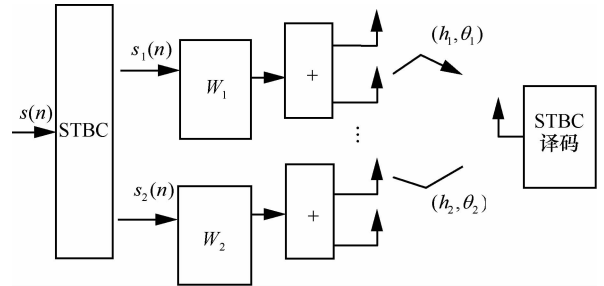


图3 多天线子阵模型

在单天线阵模型中, $s(n)$ 先经STBC后分为两个分支,再经过两个波束成形权 W_1, W_2 后,再直接相加,并通过所有天线发射,其发射的信号为:

$$x(n) = W_1^H s_1(n) + W_2^H s_2(n) \quad (5)$$

假设空间中包含 L 条可分离的路径, h_l 为信道衰落因子, θ_l 为下行波达角(DOA), $\alpha(\theta)$ 为下行导向矢量, $l=1, \dots, L$ 。

$$\alpha(\theta_l) = \left[1, e^{-j2\pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta_l}, \dots, e^{-j2\pi (N-1) \frac{d}{\lambda} \sin \theta_l} \right]^T \quad (6)$$

其中, d 为阵元间隔, λ 为波长。

空间信道为:

$$h = \sum_{n=1}^N h_n \cdot \alpha(\theta_n) \quad (7)$$

则下行协方差矩阵可以表示为:

$$R = E[h \cdot h^H] \quad (8)$$

经过波束成形加权后的符号在所有发射天线上发送,再通过对下行协方差矩阵进行特征值分解,用几个最大特

征值对应的特征向量作为加权向量^[12]。假设空间路径数 W_1 、 W_2 是下行协方差矩阵 R 的两个最大特征值对应的特征向量。这里只分析单用户单数据流,并未讨论功率分配问题。对于多数据流的情况,Li C G等提出了基于能量效率最大化的功率分配方案^[13,14]。

则两个符号周期内接收到的信号可以表示为:

$$r_1 = h^T \cdot (W_1^H s_1 + W_2^H s_2) + n_1 \quad (9)$$

$$r_2 = h^T \cdot (W_1^H (-s_2^*) + W_2^H s_1^*) + n_2 \quad (10)$$

将 $h^T \cdot W_1^H$ 和 $h^T \cdot W_2^H$ 分别看作两个虚拟信道,然后采用传统 Alamouti 的检测方法进行信号检测。

而在多天线性子阵模型中,发射端被划分为两个子阵,每个子阵都有一条从天线阵列到终端的空间传播路径,与单天线阵不同的是,经 Alamouti 编码后的两支路信号,通过各自的加权后,两个波束分别在两个天线阵上发射。

两个符号周期内的接收信号可以表示为:

$$r_1 = (h_1 a(\theta_1))^T \cdot (W_1^H s_1) + (h_2 a(\theta_2))^T \cdot (W_2^H s_2) + n_1 \quad (11)$$

$$r_2 = (h_1 a(\theta_1))^T \cdot (W_1^H (-s_2^*)) + (h_2 a(\theta_2))^T \cdot (W_2^H s_1^*) + n_2 \quad (12)$$

将 $(h_1 a(\theta_1))^T \cdot W_1^H$ 和 $(h_2 a(\theta_2))^T \cdot W_2^H$ 分别看作两个虚拟信道,然后采用传统 Alamouti 的检测方法进行信号检测。

3 大规模 MIMO

假定在一个多小区多天线的蜂窝系统中,共有 I 个小区,且每个小区都有一个配置有 M 根天线的基站及 K 个单天线的终端($K \leq M$),且该系统的信道衰落是由路径损耗和阴影衰落以及快衰落共同组成的^[15]。假设第 i 个小区中基站的第 m 根天线和第 j 个小区中第 k 个移动终端之间的信道传输系数为 g_{ikm} ,可以表示为:

$$g_{ikm} = h_{ikm} \cdot \sqrt{\beta_{jk}} \quad (13)$$

其中, h_{ikm} 是快衰落系数,且为服从独立同分布的零均值、方差为1的循环对称的复高斯随机变量。 β_{jk} 是第 j 个小区中第 k 个用户与第 i 个小区之间的大尺度衰落系数。本文考虑的是在TDD模式下的下行数据传输。在TDD模式下,利用互易性可以通过上行链路信道矢量 g_j 的转置 g_j^T 来表示下行信道状态信息^[16]。那么小区 j 中的第 K 个移动终端收到的信号矢量 y_j 就可以表示为:

$$y_j = \sqrt{p_d} \sum_{i=1}^I g_j^T s_i + n_j \quad (14)$$

其中, s_i 表示小区 i 的基站发送的数据信号矢量, n_j 表示加性高斯白噪声, $p_d > 0$ 表示基站的平均发射功率。

传送的数据矢量可以表示为:

$$s_i = \sqrt{\lambda_i} \sum_{k=1}^K w_{ik} x_{ik} = \sqrt{\lambda_i} W_i x_i \quad (15)$$

其中, $W_i = [w_{i1} \cdots w_{iK}] \in C^{N \times K}$ 为预编码矩阵, $x_i = [x_{i1} \cdots x_{iK}]^T \in C^K$ 为发送的数据符号, $\sqrt{\lambda_i}$ 为编码矩阵的归一化因子。

因此,式(14)可以重写为:

$$y_j = \sqrt{p_d} \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sqrt{\lambda_i} g_{ik}^T w_{ik} s_{ik} + n_j \quad (16)$$

4 STBC-BF 在大规模 MIMO 中的应用

本文考虑基于单小区的大规模多天线系统,假设有一个位于小区中心的基站,其配置有个阵元的天线阵列,小区中有1个单天线的移动终端。

需要传输的符号流先通过 Alamouti 空时编码,然后再经过波束成形权进行加权,信号通过所有天线进行发送,而信道衰落包含了大尺度衰落及小尺度衰落。以单天线阵系统为例,其系统模型如图2所示。假设信道为平坦衰落信道,其衰落因子为 $g_i = h_i \cdot \sqrt{\beta}$,由互易性可知下行链路的信道状态信息为 g_i^T 。本文假设发射端完全已知信道状态信息 h_i ,设空间路径数 $L=2$,天线间距相对于终端到基站的距离而言可以忽略不计,因此两条空间路径的大尺度衰落系数 β 相同。即: $g_1 = h_1 \cdot \sqrt{\beta}$, $g_2 = h_2 \cdot \sqrt{\beta}$ 。

由式(6)、式(7)可得其空间信道响应为: $g = g_1 a(\theta_1) + g_2 a(\theta_2)$,则接收端收到的信号为:

$$r_1 = \sqrt{p_d} \cdot \sqrt{\beta} [h_1 a(\theta_1) + h_2 a(\theta_2)]^T \cdot (W_1^H s_1 + W_2^H s_2) \quad (17)$$

$$r_2 = \sqrt{p_d} \cdot \sqrt{\beta} [h_1 a(\theta_1) + h_2 a(\theta_2)]^T \cdot (W_1^H (-s_2^H) + W_2^H s_1^H) \quad (18)$$

再进行信号检测,虚拟信道可设为: $\eta_1 = (g_1 \cdot a(\theta_1) + g_2 \cdot a(\theta_1))^T W_1^H$, $\eta_2 = (g_1 \cdot a(\theta_1) + g_2 \cdot a(\theta_2))^T W_2^H$,由于 g_1 与 g_2 不相关,因此可得两个虚拟信道 η_1 与 η_2 不相关,采用与 Alamouti 编码相同的译码方案,即使用最大似然译码准则来进行信号检测。

$$\tilde{x}_1 = \eta_1^H \cdot r_1 + \eta_2 \cdot r_2^H = (|\eta_1|^2 + |\eta_2|^2) \cdot x_1 + \eta_1^H n_1 + \eta_2 n_2^H \quad (19)$$

$$\tilde{x}_2 = \eta_2^H \cdot r_1 - \eta_1 \cdot r_2^H = (|\eta_1|^2 + |\eta_2|^2) \cdot x_2 + \eta_2^H n_1 - \eta_1 n_2^H \quad (20)$$

5 性能仿真及分析

仿真主要参数见表1。

图4给出了6发射天线 STBC-BF 方案、单天线方案、2发1收 Alamouti 方案、6发射天线 BF 方案4种方案的误码率



表 1 主要仿真参数

仿真参量	定义
终端天线数	1
小区半径	1(归一化)
用户与基站距离	2/3(归一化)
路径损耗指数 α	3.7
空间路径数 L	2
调制方式	BPSK
阵元间距	1/2 波长

性能曲线。由图 4 可以看出,未经编码的 SISO 系统的性能最差;进行 STBC 编码后,带来了空间分集增益;而波束成形可以获得阵列增益,降低干扰;进一步将 STBC 与 BF 结合后,因为同时获得分集增益和阵列增益,系统性能得到明显的提升。图 5 给出了在 STBC-BF 方案中对单天线阵及多天线阵的性能对比。从图 5 可以看出,在一定的角度扩展条件下,多天线阵的性能更优。由参考文献[11]可知,单

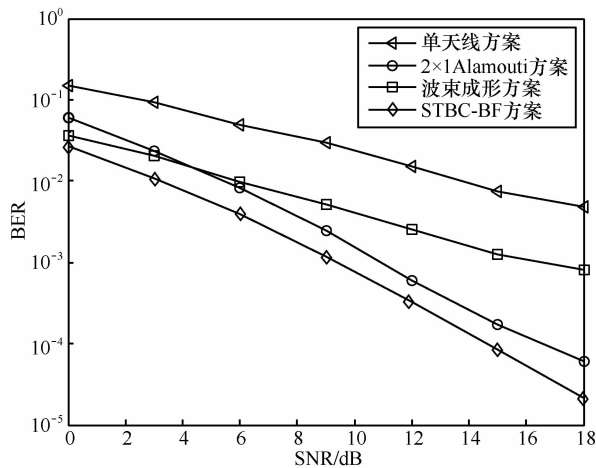


图 4 4 种方案的性能对比

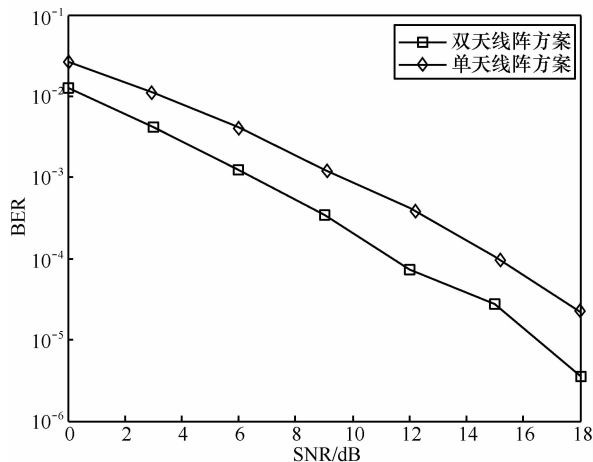


图 5 STBC-BF 中两种阵列方案的性能对比

子阵模型易受角度扩展与波达方向的影响,而多子阵模型则克服了这些缺点,因此性能更优。

图 6 给出了在大规模 MIMO 系统中单天线子阵方案与双天线子阵方案的性能比较。每个阵列的阵元数均为 128,均考虑大尺度衰落,大尺度衰落系数为 $\beta=d^{-\alpha}$,其中 d 为终端到基站的距离。从图 6 可以看出,两个方案在大规模 MIMO 系统下的性能非常接近。当天线数目很大时,波束宽度很窄,因而较双天线子阵模型而言,二者性能比较接近,但双子阵模型性能略优。

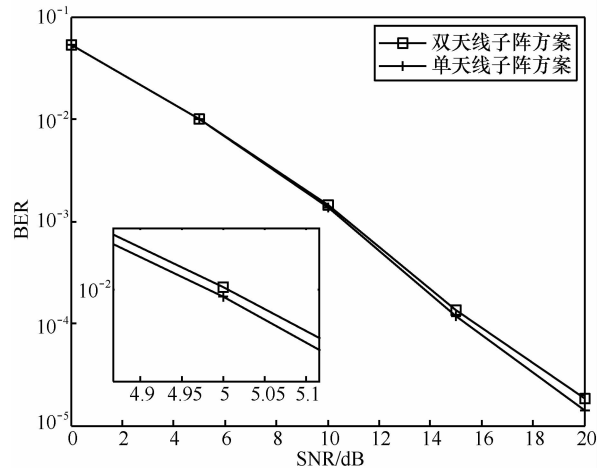


图 6 大规模 MIMO 系统中两种阵列方案的性能对比

图 7 给出了大规模 MIMO 系统中 STBC-BF 方案与 ZF 方案、MRT 方案的性能比较。STBC-BF 方案使用了单子阵模型,3 种方案天线数均为 128。从图 7 可以看出,当天线数目较大且接收端为单用户(即不考虑用户间干扰)时, MIMO 方案可以获得与 ZF 方案几乎相等的性能。而本文所提的方案是在空间中两个正交波束上进行信号传输,因而

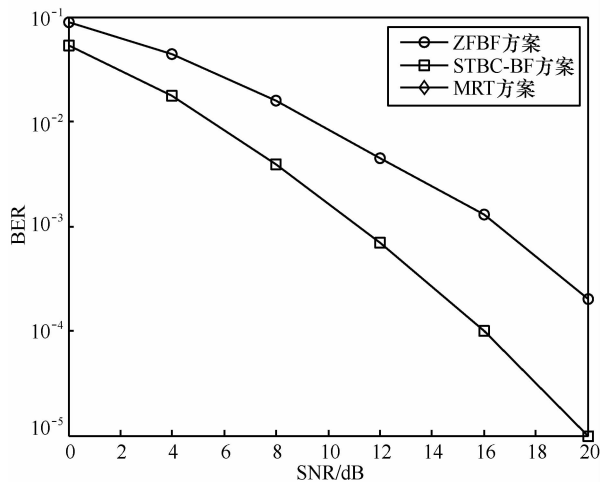


图 7 STBC-BF 方案与 ZF 方案、MRT 方案的性能对比

相比于其他两个方案还可以获得分集增益。本方案在进行权值计算时需要进行特征值分解,算法复杂度高于 MRT 方案,与 ZF 方案相当。

6 结束语

本文主要讨论了大规模 MIMO 系统中 STBC-BF 发射方案,发射端通过二者的结合,在接收端可以同时获得分集增益和阵列增益。仿真结果表明,STBC-BF 方案与 ZF 波束成形方案和 MRT 波束成形方案相比,性能有显著的提高,而计算复杂度与 ZF 波束成形方案接近。

参考文献

- 1 Rusek F, Persson D, Lau B K, *et al.* Scaling up MIMO: opportunities and challenges with very large arrays. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2012, 30(1):40~60
- 2 Marzetta, T L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(11):3590~3600
- 3 Tarokh V, Jafarkhani H, Calderbank A R. Space-time block coding for wireless communications performance results. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1999, 17(3): 451~460
- 4 孙波. 多天线系统的波束成形技术研究(硕士学位论文). 成都: 西南交通大学, 2009
Sun B. Research on beamforming of multiple-antenna system(master dissertation). Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009
- 5 Wagner S, Couillet R, Debbah M, *et al.* Large system analysis of linear precoding in MISO broadcast channels with limited feedback. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2012, 58(7): 4509~4537
- 6 Zhao L, Zheng K, Long H, *et al.* Performance analysis for downlink massive MIMO system with ZF precoding. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2014, 8(3): 390~398
- 7 Park C S, Byun Y S, Bokiye A M, *et al.* Complexity reduced zero-forcing beamforming in massive MIMO systems. *Proceedings of International Conference on Information Technology and Applications*, Xi'an, China, 2014
- 8 Parfait T, Kuang Y, Jerry K. Performance analysis and comparison of ZF and MRT based downlink massive MIMO systems. *Proceedings of 6th International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, Shanghai, China, 2014:383~388
- 9 Alamouti S M. A simple transmit diversity technique for wireless communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1998, 16(8):1451~1458
- 10 徐亮, 曾操, 廖桂生等. 基于特征波束形成的强弱信号波达方向与信源数估计方法. *电子与信息学报*, 2011, 22(2):321~325
Xu L, Zeng C, Liao G S, *et al.* DOA and source number estimation method for strong and weak signals based on eigen beamforming. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(2):321~325
- 11 王勇, 廖桂生, 叶子等. 天线子阵划分的 OSTBC 特征波束成形技术. *西安电子科技大学学报*, 2008, 35(6):1003~1008
Wang Y, Liao G S, Ye Z, *et al.* Study of OSTBC and eigen-beamforming with antenna array groups. *Journal of Xidian University*, 2008, 35(6): 1003~1008
- 12 Lei Z, Chin F, Liang Y C. Combined beamforming with space-time block coding for wireless downlink transmission. *Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference*, Birmingham, USA, 2002: 2145~2148
- 13 Li C G, Sun F, John M. Cioffi, *et al.* Energy efficient MIMO relay transmissions via joint power allocations. *IEEE Transactions on Circuits and Systems-II*, 2014, 61(7): 531~535
- 14 Li C G, Yang H J, Sun F, John M, *et al.* Approximate closed-form energy efficient PA for MIMO relaying systems in the high SNR regime. *IEEE Communications Letters*, 2014, 18(8): 1367~1370
- 15 Hoydis J, Brink S T, Debbah M. Comparison of linear precoding schemes for downlink massive MIMO. *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications*, Ottawa, Canada, 2012: 2135~2139
- 16 Smith G S. A direct derivation of a single-antenna reciprocity relation for the time domain. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2004, 52(6):1568~1577

[作者简介]



康涛,男,西安邮电大学通信与信息工程学院硕士生,主要研究方向为宽带无线通信。



战金龙,男,西安邮电大学副教授、硕士生导师,主要研究方向为大规模 MIMO 中的预编码技术、波束成形技术及信号检测技术等。