

一种低复杂度的空时多用户迭代检测方案

杜娜 徐大专

(南京航空航天大学信息科学与技术学院 南京 210016)

摘要: 该文针对已有的对多用户空时编码系统的研究大都集中在多用户 STTC 和 STBC 方案, 提出一种联合 Turbo-BLAST 的多用户空时方案。在接收端, 针对传统的基于符号干扰抵消(Symbol-Level Cancellation, SLC)与检测的迭代接收机复杂度仍然较高的前提下, 提出一种低复杂度的基于比特级干扰抵消(Bit-Level Cancellation, BLC)的迭代检测方案。该方案在检测部分将 M-QAM 调制符号分解成为一系列的 BPSK 符号的线性组合, 采用比特级的干扰抵消。理论分析和仿真结果表明, 该文提出的方案在保持 BLAST 高频谱效率的同时, 与传统检测方案相比, 在不降低系统性能的前提下, 计算复杂度得到了很大程度的降低。

关键词: 空时处理; Turbo-BLAST; 迭代接收机; 软干扰抵消; 比特级干扰抵消

中图分类号: TN911

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)02-0396-04

A Low Complexity Scheme for Space-Time Multi-user Iterative Detection

Du Na Xu Da-zhuan

(College of Information Science & Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In multiuser space-time coding system the research already made is almost focused on STTC and STBC scheme. For this reason, a multiuser space-time coding system combined with Turbo-BLAST scheme is proposed. The conventional iterative receiver with Symbol-Level Cancellation (SLC) and detection still has a high computation complexity, so a low complexity iterative receiver scheme with Bit-Level Cancellation (BLC) and detection is proposed which can performs bit-level cancellation by decomposing of an M-QAM constellation into a linear combination of binary constellations. Theoretic analysis and simulation results show that the proposed scheme has a low complexity with no performance degradation compared with conventional iterative receiver, while the high spectral efficiency of the system from BLAST is retained.

Key words: Space-time processing; Turbo-BLAST; Iterative receiver; Soft interference cancellation; Bit-Level Cancellation (BLC)

1 引言

迭代处理作为一种有效的多用户检测方案, 近年来成为研究的热点^[1-3]。每个用户利用信道编码, 在软输出多用户检测器和软输入软输出(Soft-Input Soft-Output, SISO)信道译码器之间进行迭代处理^[4,5], 接收机的复杂度很大程度上是由各用户计算编码比特的对数似然比来进行迭代操作所产生。在已有的对多用户系统的研究中, Wang 和 Poor 在文献[6]中提出了基于软干扰抵消和 MMSE 滤波的低复杂度的多用户检测方案, 这种方案已被推广用于 MIMO 系统的 Turbo 检测中。在此基础上, Lu 和 Wang 在文献[7]中提出了多用户空时编码方案包括多用户 STTC 方案和多用户 STBC 方案。Wang 在文献[6]中提出的基于软干扰抵消的接收机的计算复杂度在很大程度上由多用户检测部分决定。而检测器的复杂度又和星座图的大小, 用户数以及发送天线数有关。Wang 提出的软干扰抵消接收机是基于对符号的软干扰抵消

(Symbol-Level Cancellation SLC)和 MMSE 滤波。如果星座图的尺寸比较大(如 64QAM), 则在解调时复杂度也随之增加。为此 Choi 在文献[8]中提出了 BICM-BLC 方案, Tran 等在文献[9]中提出了 sigma mapping 方案, 它们的基本思想是使编码比特矢量和发送符号以线性的方式相关联, 把一个 QAM 调制的符号分解成一系列的 BPSK 符号的线性组合。Yang 和 Nguyen 在文献[10]中比较了采用 8QAM sigma mapping 方案和 SSP mapping 方案时, 多用户 STBC 系统和多用户 STTC 系统的性能。

以上文献中提到的多用户空时编码系统的方案大都局限于多用户 STBC 和 STTC 空时方案。与之相比的是, 贝尔实验室的分层空时码 BLAST 方案具有空间复用增益能极大地提高 MIMO 系统的容量^[11,12], 联合 BLAST 和迭代检测的 Turbo-BLAST 方案成为提高 MIMO 系统高频谱利用率和高性能的有效方案^[13,14]。本文把 Turbo-BLAST 方案用于多用户系统中, 提出一种联合 Turbo-BLAST 的多用户空时方案, 在接收端, 受 Choi 在文献[8]中 BLC(Bit-Level Cancellation)思想的启发, 提出一种基于比特干扰抵消(BLC)的多用户空时检测方案。这样就将检测模块的检测部分和软

2007-09-11 收到, 2008-10-20 改回

移动通信国家重点实验室开放基金(N200502)和江苏省自然科学基金项目(BK2007192)资助课题

解调部分简化成了单一的检测部分。直接由检测部分基于 BLC 和 MMSE 滤波的输出产生编码比特的 LLRs (Log-Likelihood Ratios), 这样很大程度上降低了复杂度。

2 系统模型

图 1 给出了多用户 BLAST 系统发送示意图, 图中 $\{b_k(i)\}$, $\{d_k(l)\}$, $\{c_k(j)\}$ 分别表示信息比特流, 卷积编码比特流和经过调制的符号流。假定发送端有 K 个用户, 每个用户有 N 个发送天线, 接收端有 M_R 个接收天线。同时假定从发送端到接收端的每个天线对之间的路径为准静态平坦衰落信道。这样基带接收信号可以表示为

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{c} + \mathbf{n} \quad (1)$$

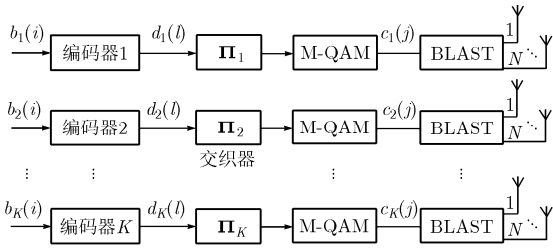


图 1 联合 Turbo-BLAST 的多用户空时系统发送端结构图

其中 $\mathbf{r} = [r_1, r_2, \dots, r_{M_R}]^T$, 这里 r_m , $m = 1, \dots, M_R$ 表示第 m 个接收天线上的接收符号, $\mathbf{c} = [c_1(1), \dots, c_1(N), c_2(1), \dots, c_2(N), \dots, c_K(1), \dots, c_K(N)]^T$, $c_k(l)$ 表示第 k 个用户的第 l 根天线上的发送信号。 \mathbf{H} 为 $M_R \times NK$ 维信道矩阵, 它的元素 H_{mk} 表示第 k 个用户上的 N 个发送天线到第 m 个接收天线之间的等效信道矩阵, \mathbf{n} 为 M_R 维加性高斯白噪声矢量。

3 传统的多用户迭代检测

Wang 在文献[6]中提出了一种基于软干扰符号抵消和 MMSE 滤波的多用户接收机, 相比最优的基于 MAP 算法的接收机, Wang-Poor 检测算法的复杂度比较低, 而被广泛用于 MIMO 迭代检测系统中。Wang 提出的多用户迭代接收机包括两个模块, SISO 多用户检测器和一些列的 SISO 信道译码器, 如图 2 所示。

SISO 多用户检测(Multi-User Detection, MUD)模块又包括软检测部分和软解调器部分。软检测部分的输入是来自

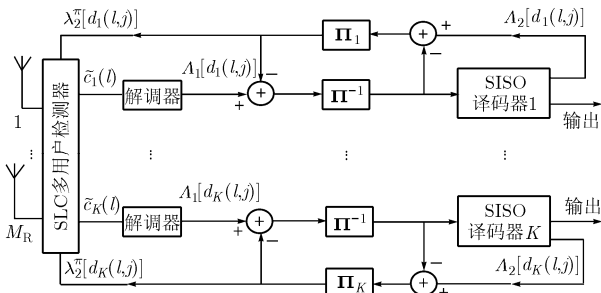


图 2 传统的多用户迭代检测框图

于 M_R 个接收天线的接收信号以及来自于 K 个用户的 SISO 译码器反馈的编码比特的外赋软信息 $\{\lambda_2^\pi[d_k(l, j)]\}$, 其基本思想是采用基于软干扰符号抵消 SLC(Symbol-Level Cancellation)以及 MMSE 滤波的算法计算输出 k 个用户发送的信道符号 $c_k(l)$ 的软估计 $\hat{c}_k(l)$ 。然后软解调部分由检测部分得到的信息符号的软估计 $\hat{c}_k(l)$, 输出编码比特的对数似然比(LLR)软信息 $\{A_1[d_k(l, j)]\}$, 减去先验信息 $\{\lambda_2^\pi[d_k(l, j)]\}$ 后获得外赋信息 $\{\lambda_1[d_k(l, j)]\}$, 对它进行解交织并传送给信道译码器作为其先验信息 $\{\lambda_1^\pi[d_k(l, j)]\}$ 。

3.1 基于 MMSE 滤波的软检测

为了降低软输入软输出检测部分的计算复杂度, 采用基于软干扰符号抵消(SLC)以及 MMSE 滤波的检测算法, 抑制其他符号的干扰, 然后利用滤波器的软输出对该符号中相应比特提取软信息^[6,7,15]。

利用信道译码单元传送的编码比特的软信息, 在检测单元可以得到各码元 $c_k(l)$ 的软估计 $\hat{c}_k(l)$:

$$\hat{c}_k(l) = E[c_k(l)] = \sum_{C_i \in \Omega_C} C_i p(c_k(l) = C_i) \quad (2)$$

$$v_k(l) = \sum_{C_i \in \Omega_C} |C_i|^2 p(c_k(l) = C_i) - |E[c_k(l)]|^2 \quad (3)$$

然后对接收到的信号先进行符号软干扰抵消, 得到

$$\hat{\mathbf{r}}_k(l) = \mathbf{r} - \mathbf{H}\hat{\mathbf{c}}_k(l) = \mathbf{H}[\mathbf{c} - \hat{\mathbf{c}}_k(l)] + \mathbf{n} \quad (4)$$

其中 $\hat{\mathbf{c}} = [\hat{c}_1(1), \dots, \hat{c}_1(N), \hat{c}_2(1), \dots, \hat{c}_2(N), \dots, \hat{c}_K(1), \dots, \hat{c}_K(N)]^T$, $\hat{\mathbf{c}}_k(l) = \hat{\mathbf{c}} - \hat{c}_k(l)\mathbf{e}_k(l)$ 这里 $\mathbf{e}_k(l)$ 是一个 NK 维的列矢量, 其元素除了第 kl 个元素为 1 外, 其他元素全为 0。接着进行 MMSE 滤波得到

$$\tilde{c}_k(l) = \mathbf{w}_{k,l}^H \hat{\mathbf{r}}_k(l) \quad (5)$$

其中权向量 $\mathbf{w}_{k,l}$ 为

$$\mathbf{w}_{k,l} = [\mathbf{H}\mathbf{V}_k(l)\mathbf{H}^H + \sigma^2\mathbf{I}]^{-1}\mathbf{H}\mathbf{e}_k(l) \quad (6)$$

$\mathbf{V}_k(l) = \text{diag}[v_1(1), \dots, v_1(N), \dots, v_k(l-1), 1, v_k(l+1), \dots, v_k(1), \dots, v_k(N)]$ 滤波后得到的 $c_k(l)$ 的软估计 $\tilde{c}_k(l)$, 可以等效看作 $c_k(l)$ 通过一个加性高斯白噪声 AWGN 信道的输出, 即

$$\tilde{c}_k(l) = \mu_k(l)c_k(l) + v_k(l) \quad (7)$$

其中 $\mu_k(l) = \mathbf{w}_{k,l}^H \mathbf{H}\mathbf{e}_k(l)$, $v_k(l) = \mu_k(l) - \mu_k^2(l)$ 。

这样, 有上面的高斯近似, 很容易求得条件概率密度函数 $p[\tilde{c}_k(l)|c_k(l) = C_i]$, $i = 1, 2, \dots, M$, $C_i \in \Omega_C$ 。

3.2 软解调

软解调部分的输入来自于软检测 MMSE 滤波得到的符号软估计 $\tilde{c}_k(l)$ 以及外赋信息 $\{\lambda_2^\pi[d_k(l, j)]\}$, 由 MAP 算法计算输出编码比特的后验 LLR 信息 $\{A_1[d_k(l, j)]\}$, 假定每一个符号 $c_k(l)$ 包含 J 个比特矢量 $[d_k(l, 1), \dots, d_k(l, j), \dots, d_k(l, J)]^T$, $d_k(l, j) \in \{+1, -1\}$, $J = \log_2 Q$, $d_k(l, j)$ 表示 $c_k(l)$ 的第 j 个比特, 这样软解调的输出可以表示为

$$\begin{aligned} A_1[d_k(l, j)] &= \log \frac{P[d_k(l, j) = 1|\tilde{c}_k(l)]}{P[d_k(l, j) = -1|\tilde{c}_k(l)]} \\ &= \log \frac{\sum_{C_i \in C_j^+} p[\tilde{c}_k(l)|c_k(l) = C_i]P[C_i]}{\sum_{C_i \in C_j^-} p[\tilde{c}_k(l)|c_k(l) = C_i]P[C_i]} \end{aligned} \quad (8)$$

其中

$$P[C_i] = \prod_{j=1}^J P[d_k(l, j) = D(i, j)] \quad (9)$$

这里 $D(i, j) \in \{+1, -1\}$ 是 C_i 的第 j 个比特; C_j^+ 和 C_j^- 分别是第 j 个比特为 +1 和 -1 的复符号集。这样得到 $d_k(l, j)$ 的外信息 LLR 为

$$\lambda_1[d_k(l, j)] = A_1[d_k(l, j)] - \lambda_2^*[d_k(l, j)] \quad (10)$$

外信息 $\lambda_1[d_k(l, j)]$ 经过交织传递给软输入软输出 SISO 信道译码器, 经过译码, 得到编码比特的后验 LLR, 提取外信息, 经过解交织后反馈给检测部分, 形成一次迭代。

4 提出的基于 BLC 多用户迭代检测

正像 Choi 和 Tran 等在文献 [8, 9] 中提到的 sigma mapping, 它的基本思想是使编码比特矢量和发送符号以线性的方式相关联。受此启发, 一个经过 M -QAM 调制的符号, 可以分解成一个线性的 BPSK 调制符号的组合。也就是对于一个调制符号 $c_k(l)$, 可以由它所对应的 J 个编码比特的 BPSK 矢量 $\mathbf{d}_k(l) = [d_k(l, 1), \dots, d_k(l, j), \dots, d_k(l, J)]$ 表示为

$$c_k(l) = \mathbf{w} \cdot \mathbf{d}_k^T(l) \quad (11)$$

这里 $\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_J]$, 其元素 w_j , $j = 1, \dots, J$, 为 J 个复基矢量。

若 4QAM 调制则对应的一组基为 $\mathbf{w} = [1, 1i]/\sqrt{2}$, 16QAM 对应的一组基为 $\mathbf{w} = [2, 1, 2i, 1i]/\sqrt{10}$, 64QAM 对应的基则为 $\mathbf{w} = [4, 2, 1, 4i, 2i, 1i]/\sqrt{42}$ 。假定所有的用户都用相同的一组基。这样

$$\begin{aligned} \mathbf{c} &= [c_1^T(1), \dots, c_1^T(N), c_2^T(1), \dots, c_2^T(N), \dots, c_K^T(1), \dots, c_K^T(N)]^T \\ &= [\mathbf{w} \cdot \mathbf{d}_1^T(1), \dots, \mathbf{w} \cdot \mathbf{d}_1^T(N), \mathbf{w} \cdot \mathbf{d}_2^T(1), \dots, \mathbf{w} \cdot \mathbf{d}_2^T(N), \dots, \\ &\quad \mathbf{w} \cdot \mathbf{d}_K^T(1), \dots, \mathbf{w} \cdot \mathbf{d}_K^T(N)]^T \end{aligned}$$

即

$$\mathbf{c} = (\mathbf{I}_{NK} \otimes \mathbf{w}) \mathbf{b} \quad (12)$$

这里

$$\mathbf{b} = [d_1^T(1), \dots, d_1^T(N), d_2^T(1), \dots, d_2^T(N), \dots, d_K^T(1), \dots, d_K^T(N)]^T$$

把式(11)代入式(1)式得到:

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{c} + \mathbf{n} = \mathbf{H}(\mathbf{I}_{NK} \otimes \mathbf{w})\mathbf{b} + \mathbf{n} = \mathbf{H}_b\mathbf{b} + \mathbf{n} \quad (13)$$

其中

$$\mathbf{H}_b = \mathbf{H}(\mathbf{I}_{NK} \otimes \mathbf{w}) = \mathbf{H} \cdot \text{diag}(\mathbf{w}, \mathbf{w}, \dots, \mathbf{w}) \quad (14)$$

这样, 接收信号在检测部分经过 BLC 和 MMSE 滤波得到编码比特 b_m 的软估计:

$$\bar{b}_m = \mathbf{g}_m^H (\mathbf{r} - \mathbf{H}_b \bar{\mathbf{b}}_m), \quad m = 1, 2, \dots, M, \quad M = K \cdot N \cdot J \quad (15)$$

其中 $\bar{\mathbf{b}}_m = [\bar{b}_1, \dots, \bar{b}_{m-1}, 0, \bar{b}_{m+1}, \dots, \bar{b}_M]$, $\bar{b}_m = E[b_m] = P(b_m = +1) - P(b_m = -1)$ 。

MMSE 滤波的权向量如下形式:

$$\begin{aligned} \mathbf{g}_m &= \arg \min E[|b_m - \mathbf{g}_m^H (\mathbf{r} - \mathbf{H}_b \bar{\mathbf{b}}_m)|^2] \\ &= [\mathbf{H}_b \mathbf{V}_m \mathbf{H}_b^H + \sigma^2 \mathbf{I}]^{-1} \mathbf{H}_b \mathbf{e}_m \end{aligned} \quad (16)$$

其中 $\mathbf{e}_m = [\mathbf{0}_{1 \times (m-1)}, 1, \mathbf{0}_{1 \times (M-m)}]^T$, $\mathbf{V}_m = \text{diag}(E[b_1^2] - \bar{b}_1^2, \dots, E[b_{m-1}^2] - \bar{b}_{m-1}^2, 1, E[b_{m+1}^2] - \bar{b}_{m+1}^2, \dots, E[b_M^2] - \bar{b}_M^2)$ 。

由 MMSE 滤波输出的软估计 \bar{b}_m 可以直接得到编码比特的 LLR 软信息 $A(b_m)$

$$A_1(b_m) = \log \frac{P(b_m = +1 | \bar{b}_m)}{P(b_m = -1 | \bar{b}_m)} \quad (17)$$

这样, 就去掉了传统检测方案框图(图 2)中由软输出 MUD 部分计算发送符号的软估计这个中间环节, 也就是将软输出 MUD 部分和 K 个软解调器结合为了一个模块, 这个模块允许在 MUD 和 K 个信道译码器之间迭代处理时进行比特级的干扰抵消。本文提出的迭代检测方案的结构图见图 3 示。

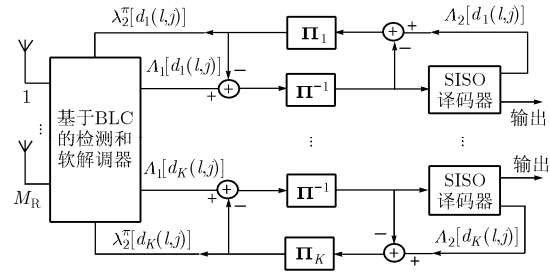


图3 本文提出的多用户迭代检测框图

我们对两种检测方案的复杂度进行分析, 传统的基于符号干扰抵消(SLC)的迭代检测方案, 计算复杂度为 $O(M_R^3 KN)$ (式(6)中矩阵求逆) + $O(M_R^2 KN 2^J)$ (式(8)中软解调计算对数似然比), 当调制阶数较高时, 第2项的复杂度起决定作用, 与调制阶数 J 成指数关系。而本文提出的迭代检测算法的复杂度是 $O(M_R^3 KNJ)$ (来自于式(16)矩阵求逆), 与 J 成线性关系。这就进一步验证了本文提出的方案复杂度较低。

5 仿真与分析

这里用仿真来证实前面提出的方案的性能。仿真时假设用户数为 $K=2$, 每个用户配置 $N=2$ 根天线, 接收端配置 $M_R=4$ 根天线, 信噪比定义为单用户的信噪比 $E_b/N_0 = NE_s/N_0$, 信道环境为平坦瑞利衰落信道。假定采用 4QAM 的调制方式, 相应的基矢量为 $\mathbf{w} = [1, 1i]/\sqrt{2}$ 。每个用户采用码率为 $R_c=1/2$, 生成多项式为 [07, 05] 的递归系统卷积码进行独立编码。

图 4 和图 5 分别给出了传统基于符号干扰抵消的多用户方案和本文提出的基于比特干扰抵消的方案经过 4 次迭代时的性能。

由图 4 和图 5 的性能仿真曲线可以看出, 采用基于 BLC 的多用户迭代检测方案, 与采用基于 SLC 的检测方案, 有着几乎一致的性能。但是采用 BLC 的迭代方案, 由于将传统接收机的软检测和软解调部分简化为一个单一的软检测模块, 因此与传统方案相比, 极大地降低了计算复杂度。

6 结束语

本文提出一种联合 Turbo-BLAST 的多用户空时方案,

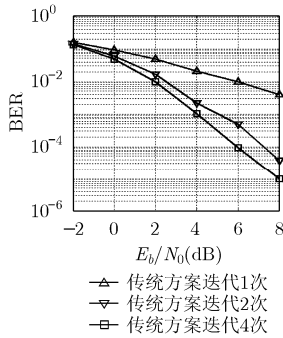


图4 传统的迭代检测方案的性能

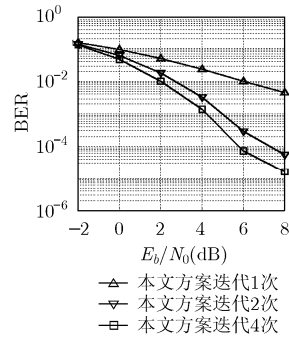


图5 本文提出的迭代检测方案的性能

在提高系统的频谱效率的同时,接收端采用一种基于比特干扰抵消(BLC)的迭代检测方案,将MQAM调制符号分解成一系列BPSK符号的线性组合,这样就将迭代接收机检测模块的软检测和软解调部分简化为一个单一的检测部分。仿真结果和理论分析表明,与传统基于符号干扰抵消(SLC)的检测方案相比,在不降低系统性能的前提下,计算复杂度大大降低。

参考文献

- [1] Moher M. An iterative multiuser decoder for near-capacity communications. *IEEE Trans. on Commun.*, 1998, 46(7): 870-880.
- [2] Lampe A and Huber B. On improved multiuser detection with iterated soft decision interference cancellation. In Proc. IEEE Int. Conf. Communications (ICC), Vancouver, BC, Canada, June 1999: 172-176.
- [3] Gamal H El and Geraniotis E. Iterative multiuser detection for coded CDMA signals in AWGN and fading channels. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, 18(1): 30-41.
- [4] Berrou C, Glavieux A, and Thitimajshima P. Near Shannon limit error-correction coding and decoding: Turbo codes. Proc. 1993 Int. Conf. on Communications (ICC'93), Geneva Switzerland, 1993: 1064-1070.
- [5] Tschler M, Koetter R, and Singer A C. Turbo equalization: Principles and new results. *IEEE Trans. on Commun.*, 2002, 50(5): 754-766.
- [6] Wang X and Poor H V. Iterative (Turbo) soft interference cancellation and decoding for coded CDMA. *IEEE Trans. on Commun.*, 1999, 47(7): 1046-1061.
- [7] Lu B and Wang X. Iterative receivers for multiuser space-time coding systems. *IEEE J. Select. Areas in Commun.*, 2000, 18(11): 2322-2335.
- [8] Choi J. Iterative receivers with bit-level cancellation and detection for MIMO-BICM systems. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2005, 53(12): 4568-4577.
- [9] Tran N H, Nguyen H H, and Le-Ngoc T. Performance of BICM-ID with signal space diversity. Proc. IEEE Int. Conf. on Communications-Communication Theory Symposium, ICC'06, Istanbul, Turkey, June 2006: 1712-1717.
- [10] Yang Y, Nguyen H H, and Shweddyk E. A low-complexity iterative receiver for multiuser space-time coding systems. In Proc. Queen's Biennial Symposium on Communications (QBSC), May-June 2006: 26-30.
- [11] Wolniansky P W, Foschini G J, and Golden G D, et al. V-BLAST: An architecture for realizing very high data rates over the rich scattering wireless channel. In Proc. URSI Int. Symp. Signals, Systems, Electronics. Pisa, Italy, Sept.-Oct. 1998: 295-300.
- [12] Foschini G J. Layered space-time architecture for wireless communications in a fading environment when using multi-element antennas. *Bell Labs Technical Journal*, 1996, 1(2): 41-59.
- [13] Sellathurai M and Haykin S. TURBO-BLAST for high-speed wireless communications, Wireless Comm. And Network Conf. 2000, WCNC2000, Chicago, Sept. 2000: 315-320.
- [14] Sellathurai M and Haykin S. TURBO-BLAST for wireless communications: Theory and experiments. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2002, 50(10): 2538-2546.
- [15] Li Ping. Approximate MMSE-APP estimation for linear systems with binary inputs. *IEEE Commun. Letters*, 2005, 9(2): 172-174.

杜娜: 女, 1979年生, 博士生, 研究方向为MIMO无线通信和空时信号处理。

徐大专: 男, 1963年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为编码理论、通信信号处理和数字信号处理。