

多输入多输出码分多址系统的 Turbo 联合检测

冯昂, 殷勤业, 张莹

(西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

摘要: 提出了一种基于随机分层空时结构的上行链路编码多输入多输出码分多址系统, 通过在发射天线之间插入空时交织器, 使得编码比特在各层随机发送, 从而获得空间分集增益. 再将 Turbo 原理应用在基站端, 提出了新的 Turbo 联合检测接收机, 它由软入软出空时多用户联合检测器和软入软出译码器构成, 检测器与译码器都将对方反馈的编码比特外信息作为自己的先验信息, 通过迭代的方法, 逐步降低系统误码率. 仿真结果表明, 经过 3 次迭代以后, 当误码率为 10^{-4} 时, Turbo 联合检测大约可获得 3.4 dB 增益.

关键词: 随机分层空时结构; Turbo 原理; 联合检测

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)04-0471-04

Turbo Joint Detection Algorithm for Multiple-Input Multiple-Output Code Division Multiple Access System

Feng Ang, Yin Qinye, Zhang Ying

(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A new uplink encoding multiple-input multiple-output code division multiple access based on random layered space-time (RLST) is proposed. A spatial-time interleaver between each transmitting antennas is inserted in RLST, so that the encoded bits can be transmitted on random layers. At node B, by applying the Turbo principle to the receiver, a new Turbo joint detection (Turbo-JD) receiver is proposed, which is composed of a soft-in soft-out space time multi-user joint detector and some soft-in soft-out decoders. The partner's external information is used by detectors and decoders as their prior information through the feedback encoding bit, and the BER of the system is gradually depressed by iterative method. The simulation shows that the Turbo-JD algorithm is able to acquire approximate 3.4 dB gain after 3 iterations when BER is 10^{-4} .

Keywords: random layered space-time; Turbo principle; joint detection

为了应对宽带无线接入技术带来的挑战, 第三代移动通信标准化组织(3GPP)启动了旨在增强系统容量和覆盖面积、提高数据传输速率, 同时降低成本和系统时延的长期演进(LTE)项目. 该项目在物理层考虑将多输入多输出(MIMO)技术引入到第三代移动通信(3G)系统中, 以满足未来 10 年人们对无线通信的需求. MIMO 技术通过在发射和接收两端使用多个天线, 利用空间信息来获取天线增益、分集增益、空间复用增益和干扰抵消^[1], 已被证明可以

显著提高系统容量^[2]. 在文献[3]中, Sellathurai 和 Haykin 提出了一种新型空时结构——随机分层空时结构(RLST), 它在编码后增加空时比特交织器, 使得编码比特可以在各层中传输, 从而获得了更大的空间分集增益.

从 Turbo 码^[4]译码结构中衍生出来的 Turbo 原理, 已被应用于信道均衡、多用户检测等通信场景中. 基于 Turbo 原理的 Turbo-MIMO 方法通过空域检测器和译码器之间迭代交换的软信息, 将接收

天线上的干扰信号进行抵消,使得误码率逐步下降.该算法最先在多用户检测中提出^[5],后来被应用于MIMO系统中^[6-7].

本文将 RLST 结构应用于同步 CDMA 系统中,提出一种新的 MIMO-CDMA 上行链路发射机结构,每个用户只使用一个扩频码,不同用户使用不同的扩频码,利用多个接收天线,发射信号可由扩频码与信道冲击响应(CIR)形成的空时特征向量来区分,在基站端采用基于 MMSE 准则的 Turbo 联合检测接收机,它由软入软出空时多用户联合检测器和软入软出译码器构成.仿真实验证明,在频率选择性衰落信道下,随着迭代次数的增加,本文算法可以获得优良的译码性能.

1 系统模型

假设系统有 U 个活动用户,每个用户配备了 N_t 个发射天线,系统中共有 $U \times N_t$ 个发射天线,在接收端则配备了 N_r 个接收天线,并且满足条件 $N_r \geq N_t$. 用户发出的信息比特首先被解复用为 N_t 个子数据流,各个数据流分别经过前向纠错码(FEC)编码器,我们用 $\mathbf{b}_n^{(u)}$ 和 $\mathbf{c}_n^{(u)}$ 来表示用户 u 第 n 个天线上编码前的信息序列和编码后的序列.对 $\mathbf{c}_n^{(u)}$ 进行空时交织,空时交织器由 N_t 个时域交织器和一个对角旋转空域交织器组成,各层的时域交织器拥有不同的置换方式,交织过程未对空时二维做最优化处理,只是采用简单的随机置换矩阵.空域交织器工作原理参考文献^[6],每经过一段时间 T_d ,码字会在各层间循环移位,这种空时结构称为 RLST,交织后的数据用 $\mathbf{c}_n^{(u)}$ 表示.如果一个传输块包括 M 个调制符号,则 $\mathbf{c}_n^{(u)}$ 通过数字调制后得到的调制符号为

$$\mathbf{d}_n^{(u)} = [\mathbf{d}_n^{(u)}(1) \quad \mathbf{d}_n^{(u)}(2) \quad \cdots \quad \mathbf{d}_n^{(u)}(M)]^T$$

假设每个用户只分配一个扩频码,不同用户分配不

同的扩频码,则用户 u 的扩频码表示为

$$\mathbf{s}^{(u)} = [s^{(u)}(1) \quad s^{(u)}(2) \quad \cdots \quad s^{(u)}(Q)]^T$$

式中: Q 是扩频因子.扩频后的发射信号如下

$$\mathbf{x}_n^{(u)} = \mathbf{S}^{(u)} \mathbf{d}_n^{(u)} \quad (1)$$

其中 $\mathbf{S}^{(u)}$ 是用户 u 的扩频矩阵, $\mathbf{S}^{(u)} = \mathbf{I}_M \otimes \mathbf{s}^{(u)}$, $\otimes$ 表示 Kronecker 积, $\mathbf{I}_M$ 表示 M 维单位矩阵.本文提出的发射机结构如图 1 所示.

用户 u 第 n 个天线的发射信号与基站第 m 个天线之间的多径衰落信道为

$$\mathbf{h}_{m,n}^{(u)} = [h_{m,n}^{(u)}(1) \quad h_{m,n}^{(u)}(2) \quad \cdots \quad h_{m,n}^{(u)}(L_c)]^T$$

式中: L_c 是码片级多径个数; $L_s = \lceil (Q + L_c - 1)/Q \rceil$ 是符号级多径个数.在接收同步的前提下,接收天线 m 上的信号为

$$\mathbf{r}_m = \sum_{u=1}^U \sum_{n=1}^{N_t} \mathbf{h}_{m,n}^{(u)} \mathbf{x}_n^{(u)} + \mathbf{n}_m \quad (2)$$

每个发射天线在多个接收天线上的对应特征向量包含了它的空间特征.为了简化 N_r 个接收天线的模型,定义操作符

$$\text{vec} \left\{ \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & \cdots \\ b_1 & b_2 & \cdots \end{bmatrix} \right\} = [a_1 \quad b_1 \quad a_2 \quad b_2 \quad \cdots]^T$$

对发射信号和接收信号以及噪声进行如下操作

$$\mathbf{d} = \text{vec} \{ [\mathbf{d}_1^{(1)} \quad \mathbf{d}_2^{(1)} \quad \cdots \quad \mathbf{d}_{N_t}^{(U)}]^T \}$$

$$\mathbf{r} = \text{vec} \{ [\mathbf{r}_1 \quad \mathbf{r}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{r}_{N_r}]^T \}$$

$$\mathbf{n} = \text{vec} \{ [\mathbf{n}_1 \quad \mathbf{n}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{n}_{N_r}]^T \}$$

将用户 u 的扩频码 $\mathbf{s}^{(u)}$ 与对应收发天线的信道冲击响应 $\mathbf{h}_{m,n}^{(u)}$ 的卷积表示为 $\mathbf{v}_{m,n}^{(u)}$,即 $\mathbf{v}_{m,n}^{(u)} = \mathbf{h}_{m,n}^{(u)} * \mathbf{s}^{(u)}$, N_r 个接收天线上形成的空时特征向量 $\mathbf{v}_n^{(u)}$ 定义为

$$\mathbf{v}_n^{(u)} = \text{vec} \{ [\mathbf{v}_{1,n}^{(u)} \quad \mathbf{v}_{2,n}^{(u)} \quad \cdots \quad \mathbf{v}_{N_r,n}^{(u)}]^T \}$$

因此,本文 MIMO-CDMA 系统模型表示为

$$\mathbf{r} = \mathbf{T} \mathbf{d} + \mathbf{n} \quad (3)$$

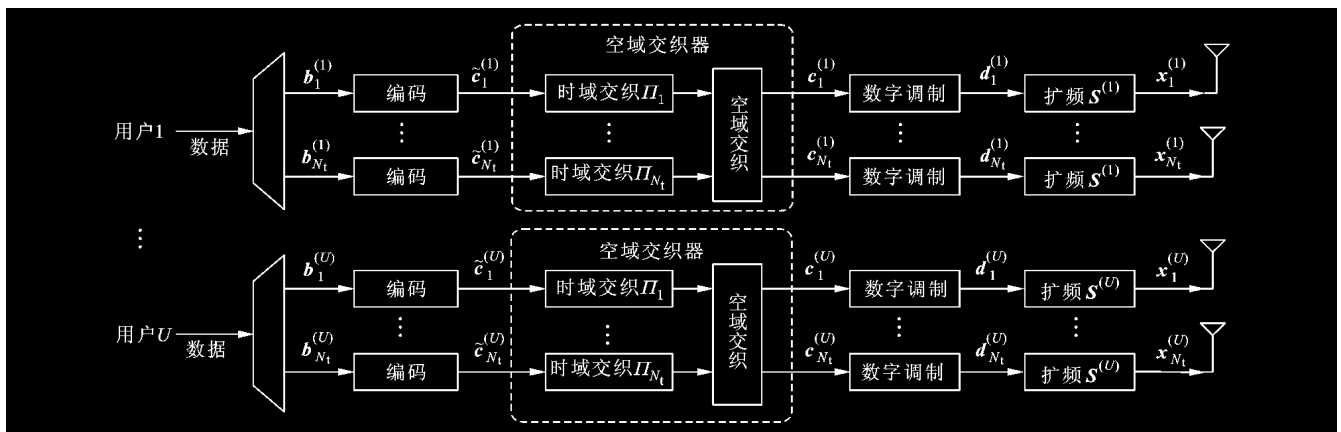


图1 发射机结构框图

式中:系统矩阵 $\mathbf{T}$ 按照图 2 来生成,图 2 中矩阵 $\mathbf{V}$ 是由所有发射天线上发射符号对应的空时特征向量构成,即

$$\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1^{(1)} \quad \mathbf{v}_2^{(1)} \quad \cdots \quad \mathbf{v}_{N_t}^{(1)}]$$

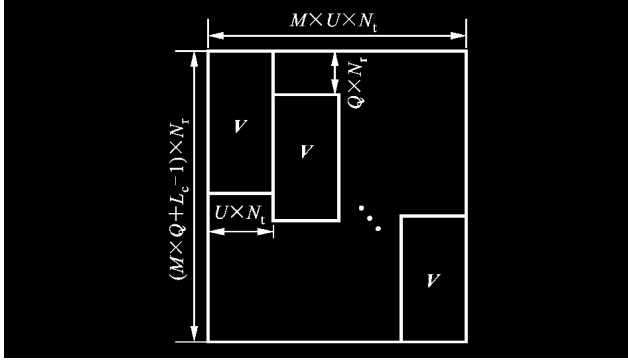


图2 系统矩阵 $\mathbf{T}$ 生成示意图

2 Turbo 联合检测接收机

Turbo 联合接收机主要由两部分组成:① 软入软出空时多用户联合检测器,它的输入包括基站的接收信号 $\mathbf{r}$ 和上一次译码器输出的编码比特先验信息 $\lambda^b[\mathbf{d}]$ (即对数似然比),输出的编码比特外信息 $\lambda_1[\mathbf{d}]$ 经过空时解交织后送入译码器;② $U \times N_t$ 个采用 Log-MAP 算法的软入软出译码器,它们的输入是检测器输出的先验信息 $\lambda^b[\tilde{\mathbf{d}}]$,输出的编码比特外信息 $\lambda_2[\tilde{\mathbf{d}}]$ 经过空时交织后又被送回到联合检测器,从而构成了一个迭代过程.接收机结构如图 3 所示.

2.1 软入软出译码器

检测器的输出经过空域解交织和时域解交织后作为译码器的先验信息,和传统 Turbo 译码器不同,本文中的译码器在迭代中输出编码比特的外信息 $\lambda_2[\tilde{\mathbf{d}}_n^{(w)}(j)]$,在迭代结束时才输出信息比特的后验信息 $\Lambda_2[\mathbf{b}_n^{(w)}]$. 编码比特的后验信息为

$$\Lambda_2[\tilde{\mathbf{d}}_n^{(w)}(j)] = \log \frac{P_r\{\tilde{\mathbf{d}}_n^{(w)}(j) = +1 \mid \lambda_1[\tilde{\mathbf{d}}_n^{(w)}(j)]\}}{P_r\{\tilde{\mathbf{d}}_n^{(w)}(j) = -1 \mid \lambda_1[\tilde{\mathbf{d}}_n^{(w)}(j)]\}} = \lambda_2[\tilde{\mathbf{d}}_n^{(w)}(j)] + \lambda_1^b[\tilde{\mathbf{d}}_n^{(w)}(j)] \quad (4)$$

式中: $P_r\{\cdot\}$ 为概率; $\Lambda_2[\tilde{\mathbf{d}}_n^{(w)}(j)]$ 为后验信息; $\lambda_1^b[\tilde{\mathbf{d}}_n^{(w)}(j)]$ 为先验信息; $\lambda_2[\tilde{\mathbf{d}}_n^{(w)}(j)]$ 为译码器的外信息

$$\lambda_2[\tilde{\mathbf{d}}_n^{(w)}(j)] = \Lambda_2[\tilde{\mathbf{d}}_n^{(w)}(j)] - \lambda_1^b[\tilde{\mathbf{d}}_n^{(w)}(j)] \quad (5)$$

信息比特的硬判决值可以由 $\hat{\mathbf{b}}_n^{(w)} = \text{sgn}(\Lambda_2[\mathbf{b}_n^{(w)}])$ 得到.

2.2 软入软出空时多用户联合检测器

软入软出空时多用户联合检测器的主要功能是在接收到 $\mathbf{r}$ 后估计出发射符号的外信息 $\lambda_1[\mathbf{d}]$. 本文

提出一种低复杂度的基于 MMSE 准则的空时联合检测算法,如果直接根据式(3)来进行 MMSE 检测,运算量将会很大.实际上,系统矩阵 $\mathbf{T}$ 是一个块-Toeplitz 矩阵,因此可使用窗函数法来降低运算量.

接收信号 $\mathbf{r}$ 是长度为 $(N \times Q + L_c - 1) \times N_r$ 的一维向量,根据式(3)和图 2 知道, j 时刻所发射的符号 $d_n^{(w)}(j)$ 在 $\mathbf{r}$ 上的对应向量只在 $[(j-1) \times Q \times N_r, ((j-1) \times Q + L_c - 1) \times N_r]$ 空间内是非 0 的,而在其他空间为 0,因此用滑动窗函数将该空间截取出来,对应的发射信号也只截取与该空间相关的部分,得到新的系统模型

$$\tilde{\mathbf{r}} = \tilde{\mathbf{T}}\tilde{\mathbf{d}} + \tilde{\mathbf{n}} \quad (6)$$

假定采用 BPSK 调制,首先根据公式

$$\hat{d}_n^{(w)}(j) = \tanh\left(\frac{1}{2}\lambda_1^b[d_n^{(w)}(j)]\right) \quad (7)$$

计算出所有编码符号的软估计值,定义

$$\hat{\mathbf{d}}_n^{(w)}(j) = \hat{\mathbf{d}}(j) - \hat{d}_n^{(w)}(j)\mathbf{e}_n^{(w)} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{e}_n^{(w)}$ 为长度为 $UN_t(2L_s - 1)$ 的列向量,它的第 $(L_s - 1)UN_t + uN_t + n$ 个分量为 1,其他分量都为 0.再定义

$$\tilde{\mathbf{r}}_n^{(w)}(j) = \tilde{\mathbf{r}}(j) - \tilde{\mathbf{T}}\hat{\mathbf{d}}_n^{(w)}(j) \quad (9)$$

式中: $\tilde{\mathbf{r}}_n^{(w)}(j)$ 包括当前检测符号 $d_n^{(w)}(j)$ 对应的接收信号、干扰抵消后残余误差产生的噪声以及接收噪声.瞬时 MMSE 准则 FIR 滤波器如下式

$$\mathbf{w}_n^{(w)}(j) = [\tilde{\mathbf{T}}\mathbf{\Lambda}_n^{(w)}\tilde{\mathbf{T}}^H + \sigma_n^2\mathbf{I}]^{-1}\tilde{\mathbf{T}}\mathbf{e}_n^{(w)} \quad (10)$$

式中: σ_n 指噪声方差;协方差矩阵 $\mathbf{\Lambda}_n^{(w)}$ 可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{\Lambda}_n^{(w)}(j) = & \text{diag}[1 - |\hat{d}_1^{(1)}(j - L_s)|^2, \\ & 1 - |\hat{d}_2^{(1)}(j - L_s)|^2, \dots, 1 - |\hat{d}_{n-1}^{(w)}(j)|^2, \\ & 1, 1 - |\hat{d}_{n+1}^{(w)}(j)|^2, \dots, 1 - |\hat{d}_{N_t}^{(w)}(j + L_s)|^2] \end{aligned} \quad (11)$$

此 FIR 滤波器的输出为 $d_n^{(w)}(j)$ 的 MMSE 估计,即

$$\hat{d}_n^{(w)}(j) = \mathbf{w}_n^{(w)H}(j)\tilde{\mathbf{r}}_n^{(w)}(j) \quad (12)$$

系统可以等效成衰落系数为 α 、方差为 β 的 AGWN 信道,很容易推出

$$\alpha_n^{(w)}(j) = E\{\hat{d}_n^{(w)}(j)d_n^{(w)}(j)\} = \mathbf{w}_n^{(w)H}(j)\tilde{\mathbf{T}}\mathbf{e}_n^{(w)} \quad (13)$$

$$\beta_n^{(w)}(j) = \text{var}\{\hat{d}_n^{(w)}(j)\} = \alpha_n^{(w)}(j) - \alpha_n^{(w)2}(j) \quad (14)$$

得到检测符号的 LLR 值为

$$\begin{aligned} \lambda_1[d_n^{(w)}(j)] = & \frac{| \hat{d}_n^{(w)}(j) + \alpha_n^{(w)}(j) |^2 - | \hat{d}_n^{(w)}(j) - \alpha_n^{(w)}(j) |^2}{\beta_n^{(w)}(j)} \end{aligned} \quad (15)$$

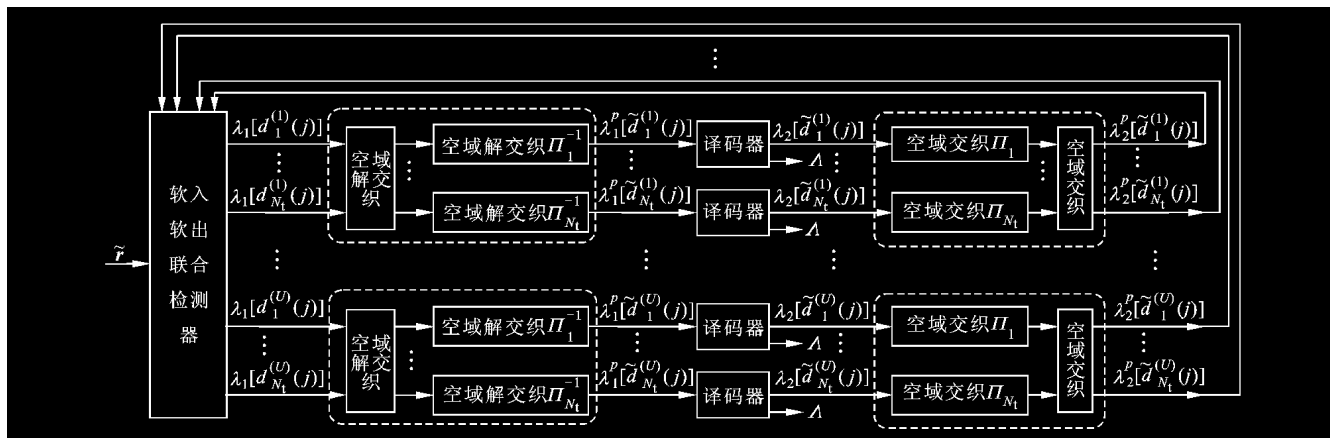


图3 Turbo联合检测接收机结构

3 仿真结果

设定参数 $U=4, N_t=4, N_r=4, M=88$, 扩频码为OVSF码, 扩频因子 $Q=4$. FEC编码器使用码率为 $1/2$ 的卷积编码方法, 其约束长度为3, 生成多项式为 $[7, 5]$. 假定天线间信道是相互独立的, 在 $L_c=5$ 的频率选择性衰落信道下, 基于RLST结构上行多用户CDMA系统的性能如图4所示, 从图中可以看出: 随着迭代次数的增加, 误码率逐渐减小, 但每次减少的量也在逐渐减少; 当误码率为 10^{-4} 时, 迭代2次与迭代1次之间有3.2 dB的增益, 在迭代3次与迭代2次之间这个值减少为0.2 dB, 这是因为

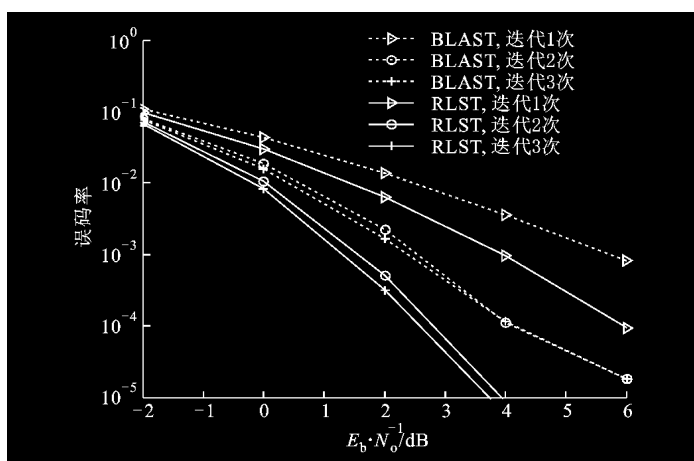


图4 BPSK调制下的系统性能

随着迭代的增加, 联合检测器与译码器之间交互的软信息在逐渐减少, 这一特点与Turbo码是一致的. 图4中还给出了应用Turbo原理的BLAST系统的仿真结果, 可以看出, RLST利用空间分集增益获得了更好的译码性能.

4 结束语

本文提出了基于RLST结构CDMA系统的空间复用模型, 通过将编码比特在各层上交替传输以获取空间分集增益, 可以提高编码MIMO-CDMA的系统性能, 并针对RLST提出了Turbo联合检测算法, 从理论上和计算机仿真上都可以看出, 随着迭代次数的增加, 该算法可以获得优良的译码性能.

参考文献:

- [1] Paulraj A J, Gore D A, Nabar R U, et al. An overview of MIMO communications — a key to Gigabit wireless [J]. Proceeding of IEEE, 2004, 92(2): 198-218.
- [2] Foschini G J, Gans M J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas [J]. Wireless Personal Commun, 1998, 1(6): 311-335.
- [3] Haykin S, Sellathurai M, Jong Y D, et al. Turbo-MIMO for wireless communications [J]. IEEE Commun Mag, 2004, 42(10): 48-53.
- [4] Berrou C, Glavieux A, Thitimajshima P. Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo-codes [C] // Proc IEEE ICC. Piscataway, USA: IEEE, 1993: 1064-1070.
- [5] Wang X D, Poor H. Iterative (Turbo) soft interference cancellation and decoding for coded CDMA [J]. IEEE Trans Commun, 1999, 47(7): 1046-1061.
- [6] Sellathurai M, Haykin S. Turbo-BLAST for wireless communications: theory and experiments [J]. IEEE Trans Signal Processing, 2002, 50(10): 2538-2546.
- [7] Lee H, Le B, Lee I. Iterative detection and decoding with an improved V-BLAST for MIMO-OFDM systems [J]. IEEE JSAC, 2006, 24(3): 504-513.

(编辑 刘杨)