

新型基于 QR 分解的低复杂度 MIMO 迭代接收机

陈 亮, 李建东

(西安电子科技大学综合业务网理论与关键技术国家重点实验室, 陕西西安 710071)

摘 要: 本文提出了一种应用于 MIMO 系统的新型低复杂度迭代接收机. 接收端采用基于 QR 分解的干扰抵消, 对不同层分组并进行部分并行干扰抵消, 组内采用 MAP 联合检测输出软信息. 通过交织解交织器将软入软出检测器与 turbo 迭代译码器级联起来, 经过迭代有效的消除了多天线间的干扰. 文中采用三维外信息转移图分析了接收机迭代过程. 与传统基于 QR 分解的串行干扰抵消迭代接收机相比性能有了极大提高, 并且受信噪比估计误差的影响较小.

关键词: QR 分解; 迭代; 干扰抵消; 三维外信息转移图

中图分类号: TN911.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 6A-025-05

A Low-Complexity QR Factorization Based Iterative Receiver for MIMO Systems

CHEN Liang, LI Jian-dong

(State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: A novel low-complexity iterative receiver in Multiple Input Multiple Output (MIMO) channel is presented. Partial parallel interference cancellation based on QR decomposition is used in, which different layers is grouped and jointly detected by MAP. The interference between different antennas is cancelled effectively through serially concatenating a soft input soft output (SISO) detector and Turbo decoder by iterative process. Three dimension extrinsic information transfer characteristics (3D EXIT charts) are used to analysis the processes of iterative. Compared with traditional QR based serial interference cancellation iterative receiver, the performance of the proposed receiver is improved greatly. And it is not sensitivity to the mismatched SNR.

Key words: QR decomposition; iterative; interference cancellation; 3D EXIT charts

1 引言

已有研究表明在有丰富散射体的信道环境下多输入多输出(MIMO)系统可以提供极高的数据传输速率. 其中最大后验概率检测是最优的检测算法, 但是其复杂度随天线数以及调制阶数指数增长, 在大天线数高阶调制的系统中无法实现. 实际中采用次优的检测算法, 常用的线性检测算法如迫零检测^[1], 最小均方误差检测^[1]; 非线性干扰抵消检测有如基于最小均方误差准则的串/并行干扰抵消(MMSE-SIC/PIC)^[2]. 非线性检测算法的性能优于线性检测, 但相对复杂, 其中以串行干扰抵消复杂度最低. 在文献[3]中分析的基于 QR 分解的串行干扰抵消算法具有较低的复杂度, 但性能相对较差.

目前 Turbo 处理技术备受关注, Turbo 接收机采用次优的解决方式通过检测模块与译码模块交换外信息形

成迭代. 与传统的接收机相比这种接收机可以获得数个 dB 的增益. 基于 QR 分解的串行干扰抵消算法结合迭代技术性能得到了改善, 但串行抵消算法的局限仍严重影响系统整体性能. 本文提出了一种改进型基于 QR 分解的迭代接收机, 与传统的基于 QR 分解迭代接收机相比受误差传播的影响小, 且性能得到极大提高.

2 迭代接收机系统模型

系统收发模型如图 1 所示.

图 1 中仅标示出了第一个译码单元的结构, 其他各译码单元结构与此相同, 故省略. 信息比特序列 \bar{b} 经过串并变换变为 M 路数据流, 每路表示为 $\bar{u}_i, i = 1, 2, \dots, M$. 其中第 i 路数据经过 Turbo 编码输出编码信息 \bar{c}'_i , 每个分支可以采用不同的编码方式. 编码后输出的信息经过比特交织得到 \bar{c}_i . 设映射符号集为 S , 对应 m -ary 调制记为 $\{s_i, i = 1, 2, \dots, 2^m\}$, 则映射后的符号 x_i^j 对应映射

收稿日期: 2007-06-11; 修回日期: 2007-10-10

基金项目: 国家杰出青年科学基金(No. 60725105); 国家自然科学基金重大项目(No. 60496316); 国家自然科学基金项目(No. 60572146); 高等学校博士学科点专项科研基金(No. 20050701007); 高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划; 教育部科学技术研究重点项目(No. 107103)

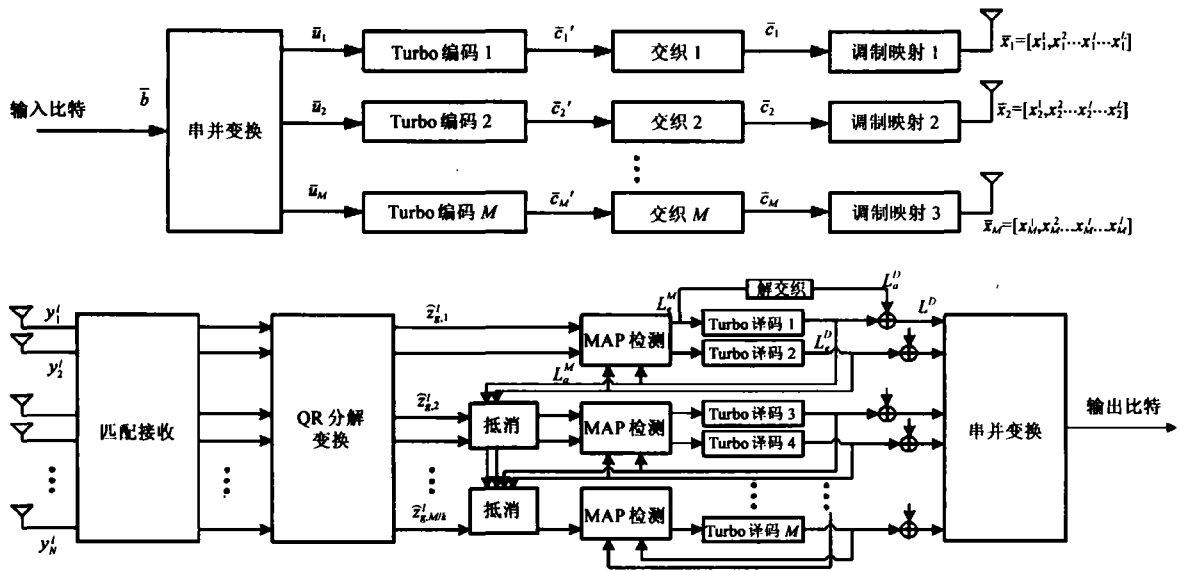


图 1 系统模型

前比特 $\{c_{i,0}^l, c_{i,1}^l, \dots, c_{i,m-1}^l\}$. 平坦衰落 MIMO 信道下系统接收信号可表示为:

$$y^l = H^l x^l + n^l \quad (1)$$

式(1)中 y^l, x^l 及 n^l 分别表示 l 时刻接收信号矢量 $[y_1^l, y_2^l, \dots, y_M^l]^T$, 发射信号矢量 $[x_1^l, x_2^l, \dots, x_M^l]^T$ 及噪声矢量 $[n_1^l, n_2^l, \dots, n_M^l]^T$, 噪声矢量中元素为零均值, 方差为 σ^2 相互独立复高斯随机变量, 噪声方差矩阵为 $E[n^l n^{lH}] = \sigma^2 I$, 其中 $[\cdot]^T$ 表示转置, $[\cdot]^H$ 表示转置共轭, $l = 1, 2, \dots, L, L$ 为一帧符号数; H^l 为 $M \times M$ 的随机矩阵, 矩阵中元素为零均值, 单位方差的相互独立的循环复高斯随机变量. 本文假设收发天线数相同, 即 H^l 为 $M \times M$ 的方阵, M 为收发天线数. 为了简化分析, 下文省略上标 l .

3 算法描述

3.1 基于 QR 分解的干扰抵消

信道矩阵 H 经过 QR 分解可表示为 $H = QR$, 其中 Q 是酉矩阵, R 为上三角矩阵, 则有:

$$\tilde{y} = Q^H y = R x + \tilde{n} \quad (2)$$

式中各矢量的下标采用逆序排列, 其中 $\tilde{y} = [\tilde{y}_M \ \tilde{y}_{M-1} \ \dots \ \tilde{y}_1]^T, x = [x_M \ x_{M-1} \ \dots \ x_1]^T, \tilde{n} = Q^H n = [\tilde{n}_M \ \tilde{n}_{M-1} \ \dots \ \tilde{n}_1]^T$, 并且 $E[\tilde{n}\tilde{n}^H] = \sigma^2 I$. 每层接收信号可表示为:

$$\tilde{y}_m = \sum_{i=1}^m r_{m,i} \tilde{x}_i + \tilde{n}_m, \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (3)$$

经过串行干扰抵消后输出 $z = [z_M \ z_{M-1} \ \dots \ z_1]^T$, 其中

$$z_m = \tilde{y}_m - \sum_{i=1}^{m-1} r_{m,i} \hat{x}_i \quad (4)$$

\hat{x}_m 是符号 x_m 的估计值. 通过估计值计算外信息后送至后续迭代单元. 该结构的接收机由于存在误差传播, 其性能主要取决于低层检测的性能好坏, 层数越低对系统性能的影响越大. 为了提高低层检测性能以及减少误差传播的影响, 类似多用户分组思想^[4], 通过对此结构进行改进, 本文提出了低复杂度的分组迭代干扰抵消检测.

3.2 基于 QR 分解的低复杂度 BLAST 迭代检测

鉴于串行干扰抵消的特性, 将串行干扰抵消与并行干扰抵消相结合采用部分并行干扰抵消的方式, 通过将不同层分组并联合检测有效提高每层检测性能. 接收端信号经过 QR 分解变换后为 $\tilde{y} = [\tilde{y}_M \ \tilde{y}_{M-1} \ \dots \ \tilde{y}_1]^T$, 对变换后接收信号按层数由低到高分组, 每 $k \geq 2$ 层分为一组, k 越大性能越好但复杂度相对也较高. 组内采用 MAP 检测或 MMSE-Soft IC 检测^[5], 输出对数似然软信息供后续迭代译码使用. 译码输出的外信息再反馈至检测器进行新一轮迭代. 本文仅讨论基于 MAP 检测的分层迭代接收算法. QR 变换后的信号经过分组后可表示为:

$$\hat{y}_g = \hat{R} \hat{x} + \hat{n} \quad (5)$$

其中

$$\hat{R} = \begin{bmatrix} \hat{r}_{M/k, M/k} & \dots & \dots & \hat{r}_{M/k, 2} & \hat{r}_{M/k, 1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \hat{r}_{3,3} & \hat{r}_{3,2} & \hat{r}_{3,1} \\ 0 & \dots & 0 & \hat{r}_{2,2} & \hat{r}_{2,1} \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \hat{r}_{1,1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$\hat{r}_{i,i}, i = 1, 2, \dots, M/k$ 为 $k \times k$ 上三角矩阵, $\hat{y}_g = [\hat{y}_{g, M/k} \ \dots \ \hat{y}_{g, 2} \ \hat{y}_{g, 1}]^T, \hat{y}_{g, n} = [\hat{y}_{nk} \ \dots \ \hat{y}_{(n-1)k+1}]^T, \hat{x} = [\hat{x}_{M/k} \ \dots \ \hat{x}_2 \ \hat{x}_1]^T, \hat{x}_n = [x_{nk} \ \dots \ x_{(n-1)k+1}]^T, n = 1, 2, \dots, M/k$. 检测

器从最低层开始检测,第 n 层待检信号为

$$\hat{y}_{g,n} = \bar{r}_{n,n} \cdot \hat{x}_n + \sum_{j=1}^{n-1} \bar{r}_{n,j} \hat{x}_j + \hat{n}_n \quad (7)$$

高层接收到低层判决符号经过抵消后为:

$$\begin{aligned} \tilde{z}_{g,n} &= \bar{r}_{n,n} \cdot \hat{x}_n + \sum_{j=1}^{n-1} \bar{r}_{n,j} (\hat{x}_j - \hat{x}_j) + \hat{n}_n \\ &= \bar{r}_{n,n} \cdot \hat{x}_n + \hat{n}_{new_n} \end{aligned} \quad (8)$$

矢量 \hat{x}_j 为由低层 p 次迭代后译码器返回的软信息,经判决得到的码字集 $\{\hat{c}_{n,j}\}$, $j = 0 \sim km - 1$ 经符号映射而成,其中 $\hat{c}_{n,j} = \text{sign}(L_e^D(c_{n,j}))$. 对误差分量 $\sum_{j=1}^{n-1} \bar{r}_{n,j} (\hat{x}_j$

$-\hat{x}_j)$ 进行高斯近似和原有噪声 \hat{n}_n 统一记为 \hat{n}_{new_n} . 考虑低层的反馈信号是经过多次迭代译码后判决反馈的,近似认为反馈正确, \hat{n}_{new_n} 与 \hat{n}_n 具相同统计特性. 变型后的接收信号可表示为:

$$\tilde{z}_{g,n} = \bar{r}_{n,n}^H \bar{r}_{n,n} \cdot \hat{x}_n + \bar{r}_{n,n}^H \hat{n}_{new_n} \quad (9)$$

因此在已知接收信号 \hat{x}_n 的条件下矢量 $\tilde{z}_{g,n}$ 的概率密度函数表示为:

$$\begin{aligned} P(\tilde{z}_{g,n} | \hat{x}_n) &= \frac{1}{\pi^k \det(\bar{r}_{n,n})} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_{new}^2} (\tilde{z}_{g,n} - \bar{r}_{n,n} \hat{x}_n)^H \right. \\ &\quad \left. \cdot \bar{r}_{n,n}^{-1} \cdot (\tilde{z}_{g,n} - \bar{r}_{n,n} \hat{x}_n)\right] \\ &= C \exp\left[\frac{1}{2\sigma_{new}^2} (2\bar{z}_{g,n}^H \hat{x}_n - \hat{x}_n^H \bar{r}_{n,n} \hat{x}_n)\right] \end{aligned} \quad (10)$$

其中 C 为与待检信号矢量 \hat{x}_n 无关的系数, $\bar{r}_{n,n} = \bar{r}_{n,n}^H \cdot \bar{r}_{n,n}$. 由于采用基于比特的最大后验概率检测,待检比特 $c_{n,i}$ 与接收矢量 $\tilde{z}_{g,n}$ 联合概率密度函数为:

$$\begin{aligned} P(\tilde{z}_{g,n}, c_{n,j} = \hat{c}) &= \sum_{\hat{x}_n, \hat{c}_{n,i} = \hat{c}} P(\tilde{z}_{g,n} | \hat{x}_n) P(\hat{x}_n), \\ & \quad j = 0, 1, \dots, k \cdot m - 1 \end{aligned} \quad (11)$$

其中 $\hat{c} = +1, -1$. 由此可得条件概率密度函数为

$$P(\tilde{z}_{g,n} | c_{n,j}) = \sum_{\hat{x}_n, \hat{c}_{n,i} = \hat{c}} P(\tilde{z}_{g,n} | \hat{x}_n) \prod_{i=1}^{km} P(c_{n,i}) \quad (12)$$

在第一次迭代时初始 $P(c_{n,j}) = 1/2$. 第一次迭代以后,根据后级译码单元反馈的软信息对码字的概率按式(13)进行更新:

$$P(c_{n,j} = \hat{c}) = \frac{\exp(\hat{c} \cdot L_a^M(c_{n,j}))}{1 + \exp(\hat{c} \cdot L_a^M(c_{n,j}))} \quad (13)$$

每层对应比特输出的软信息为:

$$\begin{aligned} L^M(c_{n,j}) &= \ln \frac{P(c_{n,j} = +1 | \tilde{z}_{g,n})}{P(c_{n,j} = -1 | \tilde{z}_{g,n})} = \ln \frac{P(\tilde{z}_{g,n} | c_{n,j} = +1)}{P(\tilde{z}_{g,n} | c_{n,j} = -1)} \\ & \quad + \ln \frac{P(c_{n,j} = +1)}{P(c_{n,j} = -1)} \end{aligned} \quad (14)$$

其中 $\ln \frac{P(c_{n,j} = +1)}{P(c_{n,j} = -1)} = L_a^M(c_{n,j})$ 为检测器先验软信息,由后级译码器反馈的外信息 $L_e^D(\cdot)$ 经交织获得;

$\ln \frac{P(\tilde{z}_{g,n} | c_{n,j} = +1)}{P(\tilde{z}_{g,n} | c_{n,j} = -1)} = L_e^M(c_{n,j})$ 为检测器输出的外信息,经解交织作为译码单元的先验软信息 $L_a^D(\cdot)$.

3.3 迭代接收各分支译码单元算法描述

前级检测器完成 M 路数据流的检测并输出软信息. 后级由 M 个基于比特最大后验概率检测的 Turbo 译码器完成译码. 计算得到外信息可表示为:

$$L_e^D(c_n^m) \triangleq \log \frac{P(c_n^m = 1 | L_a^D(\bar{c}^m), L_a^D(\bar{u}^m))}{P(c_n^m = -1 | L_a^D(\bar{c}^m), L_a^D(\bar{u}^m))} - L_a^D(c_n^m) \quad (15)$$

下文 $L_e^D(\cdot)$ 和 $L_a^D(\cdot)$ 表示译码器对应的外信息和先验信息. 译码器内部由两个 SISO 译码单元级联而成,通过 BCJR 算法^[6]完成外信息的输出. 每个译码单元输入信息比特 u_i 和码字 c_i 的先验软信息,输出更新后的外信息. 对于每个译码器均有:

$$\begin{aligned} L_{e,v}^D(u_{n,j}) &= L^D(u_{n,j}) - L_{a,v}^D(u_{n,j}) \\ L_{a,v}^D(u_{n,j}) &= L^D(u_{n,j}) - L_{e,v}^D(u_{n,j}) \end{aligned} \quad (16)$$

其中 $v = 1, 2$ 分别表示两个内部译码单元. 在译码迭代过程中有:

$$\begin{aligned} L_{a,2}^D(u_{n,j}) &= L_{e,1}^D(u_{n,inv(j)}) \\ L_{a,1}^D(u_{n,inv(j)}) &= L_{e,2}^D(u_{n,j}) \end{aligned} \quad (17)$$

$inv(\cdot)$ 表示进行交织后对应的下标. 外信息在两个分量译码器之间传递,迭代 $p \geq 1$ 次后将两个分量译码器输出的码字外信息 $L_{e,1}^D(c_{n,j})$, $L_{e,2}^D(c_{n,j})$ 结合起来作为译码单元输出的外信息反馈至前端检测器. 译码器输出的信息比特软新息 $L^D(\bar{u}_n)$ 在最后一次迭代后作为最终输出软信息进行判决. M 路数据经串并变换后输出最终序列 \bar{b} .

4 系统仿真及性能分析

本文对所描述的接收机与串行干扰抵消迭代接收机进行了仿真. 仿真信道为 AWGN 加平坦衰落信道. 仿真 4×4 天线的 MIMO 系统. 发射端信号采用 BPSK 调制,对于采用其他调制方式情况同样适用. 每天线每帧发送 128 比特. 发端编码采用码率为 1/2,生成系数为 [7,5] 的 Turbo 编码,每天线采用相同的编码方式,采用不同的随机交织器. 每根天线的发射功率相同,信噪比 (SNR-total) 定义为 4 根发射天线上的发射信号总功率与噪声功率的比值. 首先对检测算法的复杂度进行粗略的分析:复杂度主要由用于迭代的后验概率的计算复杂性决定. 对于采用 m -ary 调制迭代接收的 M 发 M 收的 MIMO 系统,采用联合最大后验概率检测需要计算 2^{mM} 种可能的信号情况,每种情况对应着复数乘加运算,复杂度约为 $O(M2^{mM})$,采用串行干扰抵消的迭代接收每次只需计算一个发射信号的概率有 2^{mM} 种可能的信号

情况, M 个信号总复杂度约为 $O(M2^m)$. 本文所用接收机复杂度与分组内信号数 k 有关. M 个信号分为 M/k 组, 每组包含 k 个信号, 每组需计算 2^{km} 种情况, 因此总的复杂度约为 $O((M/k) \cdot k2^{km}) = O(M2^{km})$. 通常的选取比较小为 2 或 3 且不随天线数改变, 可以看出复杂度不随收发天线数指数增长.

文献[7]表明对于一个软输入软输出模块可以分别计算数据序列与该模块输入, 输出对数似然比(外信息)的互信息, 表示为 I_A, I_E , 可以通过式(18)求得:

$$I_{A/E} = I(L^{(A/E)}(c_n); c_n) = \frac{1}{2} \sum_{c_n \in \{-1, +1\}} \int_{-\infty}^{\infty} f(L^{(A/E)} | c_n) \cdot \log_2 \left(\frac{2f(L^{(A/E)} | c_n)}{f(L^{(A/E)} | c_n = +1) + f(L^{(A/E)} | c_n = -1)} \right) dL \quad (18)$$

其中 $I_{A/E}$ 表示互信息 I_A 或 I_E , $f(L^{(A/E)} | c_n)$ 为 c_n 的对数似然比概率密度函数. A/E 指先验似然比概率密度或后验似然比概率密度. 通过描述 I_A, I_E 的相互关系可以获得外信息转移曲线, 从而描述 SISO 模块之间迭代的过程. 由前端检测 SISO 模块, 后级译码 SISO 模块外信息转移曲线得到的外信息转移图如图 2 所示:

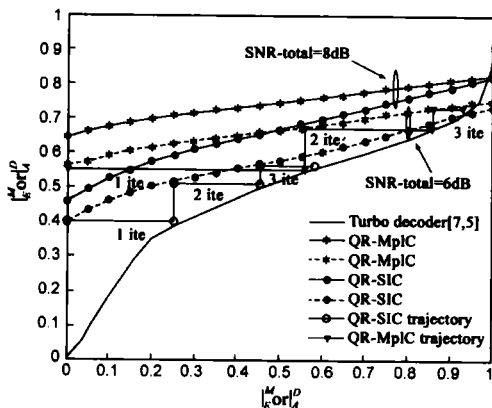


图 2 系统 EXIT chart 转移图

图 2 分别描述了本文所提接收机(QR-MpIC)的外信息转移图以及传统 QR 迭代接收机(QR-SIC)的外信息转移图, 横坐标为检测单元的互信息 I_A^M 或译码单元的互信息 I_E^D ; 纵坐标为检测单元的互信息 I_E^M 或译码单元的互信息 I_A^D . 图中包括总信噪比为 8dB 和 6dB 两种情况下的外信息转移图. 可以看出通过迭代输出的外信息与数据序列的互信息越来越大, 表明外信息可靠性逐渐增大. 根据迭代轨迹(QR-MpIC /QR-SIC trajectory)可以看出接收机在前两次迭代中互信息增加的很快, 但在三次迭代后每次迭代所提高的互信息值很少, 每次迭代改善程度逐渐减小. 说明此种迭代接收机一般比较有效的迭代次数是 2~3 次, 更高的迭代次数所带来的性能提高有限, 反而更多的增加了系统延时.

由于每层外信息的分布有所不同, 通过三维外信息转移描述可以更为准确的描述迭代过程. 以检测器

包含两层 SISO 模块为例, 低层 SISO 输出外信息与高层无关, 我们可以按式(18)获取 I_A, I_E ; 高层输出的外信息不仅与先验信息有关还与低层反馈的外信息有关, 我们采用条件互信息转移 $I_{E-high} = T(I_{A-high}, SNR | I_{A-low})$ 进行描述, 获得高层在低层反馈外信息大小不同时的转移关系曲线. 三维外信息交换图如图 3 所示, 其中 X 轴表示低层或高层检测器的互信息 I_A^M 或译码单元的互信息 I_E^D ; Y 轴表示高层检测器的互信息 $I_E^M - up$ 或译码单元的互信息 I_A^D ; Z 轴表示低层检测器的互信息 $I_E^M - low$ 或译码单元的互信息 I_A^D . X 轴和 Z 轴构成的平面描述低层的外信息转移关系, X 和 Y 轴构成的平面描述高层的外信息转移关系, 并且转移关系随纵坐标 Z 的不同而变化:

图 3 中标为 1 ite low 的黑线描述的为低层检测器一次迭代时的外信息转移, 标为 1 ite up 的黑线描述高层检测器一次迭代时的外信息转移, 其中初始高层先验信息为 0. 此三维转移图比传统二维转移图更为精确的描述了系统的迭代过程, 可以更准确的对系统迭代过程以及性能进行估计. 系统误比特性能如图 4 所示.

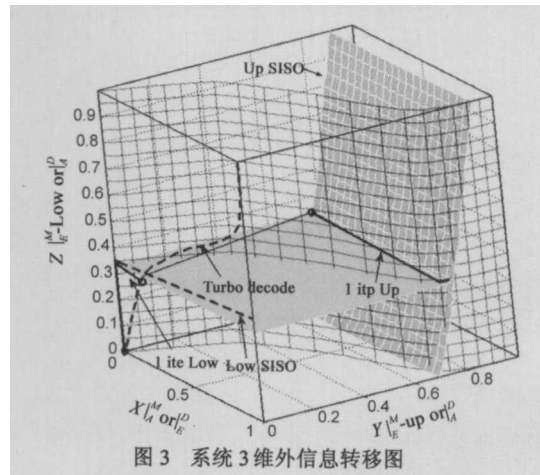


图 3 系统 3 维外信息转移图

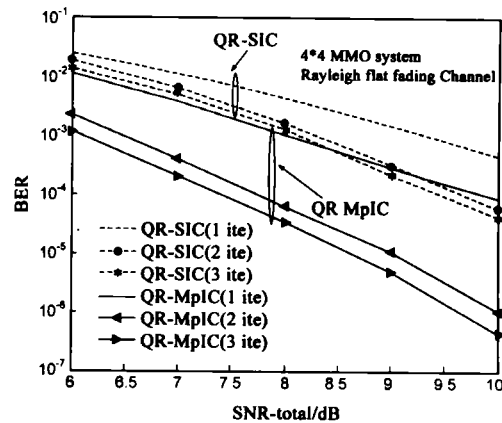


图 4 系统误码率性能比较

图 4 中比较了系统进行 1, 2, 3 次迭代时的性能, 可以看出性能有很大改善. 图中也可以看出随着迭代次

数的增加,每次迭代所提高的性能逐渐减少.本文对接收机所知信噪比存在误差的情况下进行了仿真.分别对 SNR = 4, 6, 8dB 的情况进行了仿真,信噪比误差由 -7dB ~ 7dB. 仿真结果如图 5 所示:

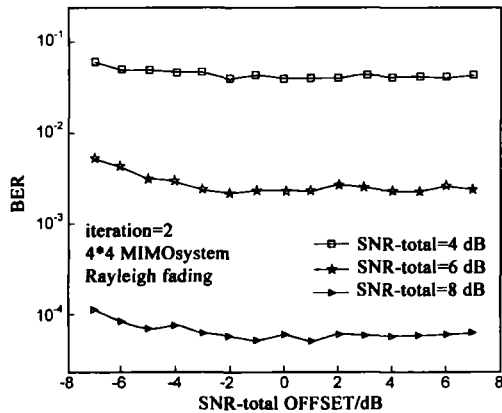


图 5 信噪比估计误差下的系统性能

可以看出该系统受信噪比估计误差的影响很小.当信噪比估计值比实际值偏小时系统性能略微变差,在估计值大于实际值时系统性能所受影响非常小.因此在实际使用中系统信噪比的估计精度要求不高.

5 结论

在使用 MIMO 的 V-BLAST 系统中,各天线发射数据不相同.当采用迭代接收时,联合最大后验概率检测方法可以获得最优的性能.但是因其复杂度随天线数以及信号调制阶数指数增长,在实际情况下很难采用.基于串行干扰抵消的检测算法极大的降低了系统复杂度,但性能损失也很大.本文提出的迭代接收机复杂度远低于联合最大后验概率接收机,略高于基于串行干扰抵消的迭代接收机,但性能较串行干扰抵消有了极大提高,并且有受信噪比误差影响小等特点.该接收机同样可以应用到 MIMO-OFDM 系统中.

参考文献:

[1] A J Paulraj, et al. An Overview of MIMO Communications-A Key to Gigabit Wireless [J]. Proc IEEE, 2004, 92(2): 198 -

218.

- [2] H Dai, et al. Downlink Capacity of Interference-Limited MIMO Systems With Joint Detection [J]. IEEE Trans, 2004, WC-3(2): 442 - 453.
- [3] J Choi. Nulling and Cancellation Detector for MIMO Channel and its Application to Multistage Receiver for Coded Signals Performance and Optimization [J]. IEEE Trans, 2006, WC-5(5): 1207 - 1216.
- [4] Brad W. Zerkoff, et al. An Iterative Groupwise Multiuser Detector With Soft Output [A]. The 15th IEEE International Symposium on PIMRC [C]. Barcelona, Spain, 2004: 2920 - 2924.
- [5] Xiaodong Wang, H. V. Poor, Iterative (Turbo) Soft Interference Cancellation and Decoding for Coded CDMA [J]. IEEE Trans, 1999, WC-47(7): 1046 - 1061.
- [6] J Hagenauer, et al. Iterative Decoding of Binary Block and Convolutional Codes [J]. IEEE Trans, 1996, IT-42(2): 429 - 445.
- [7] Stephan ten Brink. Convergence Behavior of Iteratively Decoded Parallel Concatenated Codes [J]. IEEE Trans on Communications, 2001, 49(10): 1727 - 1737.

作者简介:



陈 亮 男, 1979 年生于陕西西安, 西安电子科技大学通信与信息系博士生. 主要研究方向有移动通信、信号与信息处理等.
E-mail: lchen@pcn.xidian.edu.cn



李建东 男, 1962 年生于江苏省阜宁县, 现任西安电子科技大学通信工程学院院长和综合业务网理论和关键技术国家重点实验室主任、博士生导师. 从事宽带无线 IP 技术、移动通信、软件无线电、Ad Hoc 自组织网络等方面的研究.