

一种利用 MIMO 技术改进 TD-SCDMA 系统的方法

杨晓辉 李霜 何丹丹 李立华 张平
(北京邮电大学无线新技术研究所 北京 100876)

摘要: 针对 TD-SCDMA 系统的特点, 该文提出了一种基于 midamble 的 TD-SCDMA 系统 MIMO 模型。在此基础上将 MMSE 检测, Turbo 迭代均衡与多天线处理技术相结合, 提出了两种新的 MIMO 检测算法: MMSE-IC 检测算法和 MMSE-IC-Turbo 检测算法。通过比较这两种算法以及 3GPP 中提到的 RAKE-BLAST 算法, 从理论和仿真的角度分析了这几种算法在 TD-SCDMA 系统中的性能。结果表明 MMSE-IC-Turbo 检测算法性能最好, MMSE-IC 检测算法次之。由于使用了 MIMO 技术, TD-SCDMA 系统的容量大大提高。

关键词: MIMO; Turbo 迭代均衡; MMSE 检测

中图分类号: TN914.53

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)06-1319-05

A Method for TD-SCDMA System Improvement with MIMO Technology

Yang Xiao-hui Li Shuang He Dan-dan Li Li-hua Zhang Ping

(Wireless Technologies Innovation Lab. Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: According to the features of TD-SCDMA system, a new MIMO structure of TD-SCDMA system based on midamble sequences is proposed. Furthermore, by combining Turbo iterative equalization and MIMO technology, MMSE-IC detection and MMSE-IC-Turbo detection are put forward. The two algorithms are measured with generally accepted RAKE-BLAST detection proposed in 3GPP. Simulation results show that MMSE-IC-Turbo detection performs best, and MMSE-IC also has better performance than the traditional algorithm. The capacity of TD-SCDMA system is largely improved by using the MIMO technology.

Key words: MIMO; Turbo iterative equalization; MMSE detection

1 引言

时分同步码分多址(TD-SCDMA)系统是中国提出的、被国际电联和 3GPP 接受的第三代移动通信标准。主要采用时分双工块传输结构, 利用联合检测技术抑制影响码分多址系统容量的符号间干扰(ISI)和多址干扰(MAI)^[1]。MIMO 技术是一种多天线处理技术, 利用空间分集合并提高系统容量。对于 $M_t \times M_r$ 维 MIMO 系统, 其信道容量随着 $\min(M_t, M_r)$ 线性增加^[2]。目前 MIMO 技术已经成为 3GPP 中关于高速下行分组接入(HSDPA)的关键技术之一。

当前, 3GPP 针对 WCDMA 系统物理层的结构, 利用不同发射天线之间相互正交的导频序列区分空间信道, 提出了基于正交导频序列的 MIMO 模型^[3]。但是对于现有 TD-SCDMA 系统采用的 burst 帧结构, 无法使用正交导频序列, 因此不能通过类似的方法区分空间信道。为了解决这个问题, 提出了利用 midamble 码的特性进行空间信道估计, 构建基于 midamble 的 MIMO 模型。在 3GPP 中, WCDMA 系统采用 RAKE-BLAST 检测算法分离多天线多用户信号。对于 TD-SCDMA 系统, 通过拓展 MMSE 检测技术和 Turbo 迭代均衡技术, 提出了适用于 MIMO 模型的 MMSE-IC 检测算法和 MMSE-IC-Turbo 检测算法。同时对这两种算法以及

RAKE-BLAST^[3]进行了分析, 比较了它们的抗干扰能力和不同信道环境、不同系统参数条件下的性能。

2 基于 midamble 的 TD-SCDMA 系统 MIMO 模型

为了在现有 TD-SCDMA 系统采用的 burst 帧结构基础上实现 MIMO 技术, 提出了基于 midamble 的 TD-SCDMA 系统 MIMO 模型。将所有天线上所有用户的不同信息全部当作多用户信息去处理, 分配在不同天线上的同一用户的不同数据块采用不同的 midamble 移位, 利用 midamble 的不同移位进行 MIMO 的空间信道分离。

如图 1 所示, 假设有 K 个用户, 每个用户总共发送 NM_t 个符号, M_t 个发射天线, M_r 个接收天线。将每个用户的 NM_t 个符号分成 M_t 段, 通过 M_t 个天线发送 K 个用户的 NKM_t 个符号, 接收端 M_r 个接收天线每次接收 NKM_t 个符号

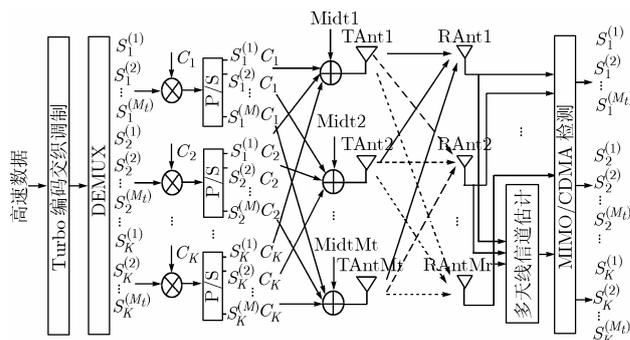


图 1 基于 midamble 的 TD-SCDMA 系统 MIMO 模型

2005-10-14 收到, 2006-03-30 改回

韩国 LG 电子和国家“863 计划”(2004AA123180)资助课题

号, 通过 MIMO 技术及联合检测解出这 NKM_t 个符号。

发送信号表示为

$$\mathbf{S} = [\mathbf{S}^{(1)}, \mathbf{S}^{(2)}, \dots, \mathbf{S}^{(M_t)}] \quad (1)$$

其中第 m_t 个天线上发送的数据为

$$\mathbf{S}^{(m_t)} = [\mathbf{S}_1^{(m_t)}, \mathbf{S}_2^{(m_t)}, \dots, \mathbf{S}_K^{(m_t)}]^T \quad (2)$$

K 表示用户总数; 第 k 个用户在第 m_t 个天线上发送的数据用 $s_k^{m_t}$ 可以表示成如下形式:

$$\mathbf{s}_k^{m_t} = [s_{k,1}^{(m_t)}, s_{k,2}^{(m_t)}, \dots, s_{k,N}^{(m_t)}]^T \quad (3)$$

其中 N 表示每个天线上发送的每个用户的符号个数。

空间信道矩阵表示为

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}^{(1,1)} & \mathbf{H}^{(2,1)} & \dots & \mathbf{H}^{(M_t,1)} \\ \mathbf{H}^{(1,2)} & \mathbf{H}^{(2,2)} & \dots & \mathbf{H}^{(M_t,2)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{H}^{(1,M_r)} & \mathbf{H}^{(2,M_r)} & \dots & \mathbf{H}^{(M_t,M_r)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中第 m_t 个发射天线与第 m_r 个接收天线之间的信道响应表示如图 2 所示:

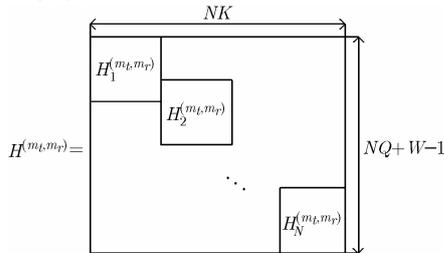


图 2 第 m_t 个发射天线与第 m_r 个接收天线之间的信道响应第 n 个符号单元:

$$\mathbf{H}_n^{(m_t, m_r)} = [\mathbf{H}_{1,n}^{(m_t, m_r)}, \mathbf{H}_{2,n}^{(m_t, m_r)}, \dots, \mathbf{H}_{K,n}^{(m_t, m_r)}] \quad (5)$$

$$\mathbf{H}_{k,n}^{(m_t, m_r)} = \mathbf{c}_k * \mathbf{h}_k^{(m_t, m_r)} \quad (6)$$

第 k 个用户的扩频码: $\mathbf{c}_k = \{c_{k,1}, c_{k,2}, \dots, c_{k,Q}\}^T$, 其中 Q 为扩频因子。第 k 个用户在第 m_t 个发射天线与第 m_r 个发射天线之间的信道表示为

$$\mathbf{h}_k^{(m_t, m_r)} = [h_{k,1}^{(m_t, m_r)}, h_{k,2}^{(m_t, m_r)}, \dots, h_{k,W}^{(m_t, m_r)}]^T \quad (7)$$

其中 W 为信道响应窗长。

根据式(1)和式(4), 接收信号可以表示为

$$\mathbf{R} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{S} + \mathbf{N}_0 \quad (8)$$

其中 \mathbf{N}_0 为噪声。而接收数据:

$$\mathbf{R} = [\mathbf{R}^{(1)}, \mathbf{R}^{(2)}, \dots, \mathbf{R}^{(M_r)}] \quad (9)$$

其中第 m_r 个接收天线收到的信号表示为

$$\mathbf{R}^{(m_r)} = [r_{1,1}^{(m_r)}, r_{2,1}^{(m_r)}, \dots, r_{Q,1}^{(m_r)}, r_{1,2}^{(m_r)}, r_{2,2}^{(m_r)}, \dots, r_{Q+W-1,N}^{(m_r)}]^T \quad (10)$$

$r_{q,n}^{(m_r)}$ 表示第 m_r 个接收天线的接收到的第 n 个符号的第 q 个 chip。

为了实现多天线空间信道分离, 将 M_t 个发射天线上的所有用户信息段一起考虑, 这样就相当于有 KM_t 个用户经过 M_t 个发射天线发送不同的数据。因此就有: $KM_tW = P$ 。 P 表示 midamble 的总长度。将基本 midamble 码表示为

$$\mathbf{m}_{\text{basic}} = [m_1, \dots, m_K, m_{K+1}, \dots, m_{KM_tW}]^T \quad (11)$$

分配第 k 个用户在第 m_t 个发射天线上使用的 midamble 为

$$\mathbf{m}_{k,m_t} = [m_{\text{shift}_k+1}, \dots, m_{KM_tW}, m_1, \dots, m_{\text{shift}_k}]^T \quad (12)$$

其中 $\text{shift}_k = km_tW$ 。这样对此系统的信道分离就相当于对 KM_t 个用户的系统进行多用户信道分离。TD-SCDMA 系统中多用户信道估计的方法主要是运用迫零准则, 通过 FFT 进行计算, 详细过程可以参考文献[1]。

3 MIMO检测算法

3.1 MMSE-IC 检测

对于式(8)的系统, MMSE 检测可以表示为

$$\hat{\mathbf{S}} = (\mathbf{R}_s^{-1} + \mathbf{H}^H \mathbf{R}_n^{-1} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H \mathbf{R}_n^{-1} \mathbf{R} \quad (13)$$

对于信号的协方差矩阵 $\mathbf{R}_s = E\{\mathbf{s}\mathbf{s}^H\} = \sigma_s^2 \mathbf{I}$, 噪声的协方差矩阵 $\mathbf{R}_n = E\{\mathbf{n}\mathbf{n}^H\} = \sigma_n^2 \mathbf{I}$, 此式可以简化为

$$\hat{\mathbf{S}} = \left(\mathbf{H}^H \mathbf{H} + \frac{\sigma_n^2}{\sigma_s^2} \mathbf{I} \right)^{-1} \mathbf{H}^H \mathbf{R} \quad (14)$$

MMSE-IC 检测过程如下:

首先通过式(14)对接收信号进行 MMSE 检测

$$\mathbf{y}_0 = \mathbf{W}\mathbf{R} = \left(\mathbf{H}^H \mathbf{H} + \frac{\sigma_n^2}{\sigma_s^2} \mathbf{I} \right)^{-1} \mathbf{H}^H \mathbf{R} \quad (15)$$

其中 $\mathbf{y}_0 = [\mathbf{y}^{(1)}, \mathbf{y}^{(2)}, \dots, \mathbf{y}^{(M_t)}]$, $\mathbf{y}^{(m_t)} = [y_{1,1}^{(m_t)}, y_{2,1}^{(m_t)}, \dots, y_{K,1}^{(m_t)}, y_{1,2}^{(m_t)}, y_{2,2}^{(m_t)}, \dots, y_{K,N}^{(m_t)}]$ 表示第 m_t 个天线上 K 个用户的数据信息。经判决得到 $\hat{\mathbf{S}}_0 = Q(\mathbf{y}_0)$, 其中 $Q(\cdot)$ 表示判决。然后进行迭代干扰删除(IC)处理:

$$\mathbf{R}_{m_t,i} = \mathbf{R} - \sum_{l=1, l \neq NK(m_t-1)+1 \dots NKm_t} \hat{\mathbf{S}}_{l,i-1}(\mathbf{H})_l \quad (16)$$

其中 $(\mathbf{H})_l$ 为 \mathbf{H} 的第 l 列, K 为用户个数, $m_t = 1, 2, \dots, M_t$ 表示第 m_t 根天线, i 为干扰删除的迭代次数, 然后通过计算可得到第 m_t 根发射天线信号判决前的值:

$$\mathbf{y}_i^{(m_t)} = \left(\mathbf{H}_{m_t}^H \mathbf{H}_{m_t} + \frac{\sigma_n^2}{\sigma_s^2} \mathbf{I} \right)^{-1} \mathbf{H}_{m_t}^H \mathbf{R}_{m_t,i} \quad (17)$$

其中 \mathbf{H}_{m_t} 表示 \mathbf{H} 的从 $NK(m_t-1)+1$ 到 NKm_t 列组成的矩阵; $\mathbf{y}_i^{(m_t)}$ 表示第 m_t 个天线上 K 个用户的数据信息在第 i 次迭代的结果。最后判决得到估计值:

$$\hat{\mathbf{S}}_i^{(m_t)} = Q(\mathbf{y}_i^{(m_t)}) \quad (18)$$

选择合理的迭代次数以便达到理想的性能。

3.2 MMSE-IC-Turbo 检测

为了改进 MMSE-IC 检测的性能, 经过研究提出将 MMSE-IC 检测和 Turbo 迭代均衡相结合, 构造了 MMSE-IC-Turbo 检测算法, 利用 Turbo 迭代的软信息提高信号检测能力。

如图 3 所示, MMSE-IC-Turbo 检测算法本质是一个软输入软输出的结构。主要包括两部分: MMSE-IC 检测和 SISO 译码。这两部分通过软解调模块和软匹配模块相连接。MMSE-IC 模块通过多用户检测和软干扰删除抑制 MAI 和空

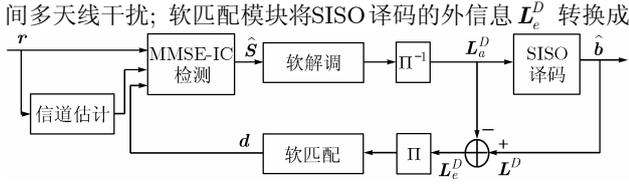


图 3 MMSE-IC-Turbo 检测算法结构

数据的软符号,通过软符号估计空间多天线干扰;软解调模块利用检测的结果为每一个符号计算所对应编码 bit 的最大似然比(LLR),所有符号的 LLR 经过解交织和重新组合形成先验信息 L_a^D ,作为 SISO 译码的输入;SISO 译码模块计算每一个编码 bit 的软信息 L^D 并输出信息 bit 的最终估值。其中,软信息 L^D 由先验信息 L_a^D 和外信息 L_e^D 两部分构成。

MMSE-IC-Turbo 检测算法利用迭代技术,重复地在 MMSE-IC 检测模块和 SISO 译码模块之间交换软信息以提高信息检测能力。MMSE-IC 检测模块的处理过程与 3.1 节中 MMSE-IC 检测算法基本一致,只是干扰删除采用软估计信息,而不是硬判决信息;SISO 译码模块采用经典的 MAP 译码算法,详细过程参考文献[4]。软匹配和软解调模块的处理过程如下:

(1)软匹配 软匹配模块的功能是利用 SISO 译码输出的外信息 L_e^D 估计数据符号。外信息 L_e^D 可以表示为

$$\text{LLR}(d_{j,i}) = \log \frac{P(d_{j,i} = 1)}{P(d_{j,i} = -1)} \quad (19)$$

其中 $d_{j,i}$ 是第 j 个数据符号的第 i 个编码 bit。数据符号 d_j 属于复数符号集合 A , 具有零均值和单位方差:

$$d_j \in A, \quad i = 1, 2, \dots, \log_2 |A| \quad (20)$$

如图 3 所示,在软匹配之前,外信息 L_e^D 首先经过交织,因此可以认为所有的信息 bit 相互独立。将 LLR 转换成 bit 概率:

$$P(d_{j,i} = \beta) = \frac{e^{\beta \text{LLR}(d_{j,i})/2}}{e^{-\text{LLR}(d_{j,i})/2} + e^{\text{LLR}(d_{j,i})/2}} \quad (21)$$

其中 $\beta = (+1, -1)$ 。

符号由 bit 组成,通过求解 bit 联合概率分布可以得到符号的估值和方差:

$$\eta_{s_j} = \sum_d [s(d_j) \prod_{i=1}^{M_c} P(d_{j,i})] \quad (22)$$

$$\sigma_{s_j}^2 = \sum_d [(s(d_j) - \eta_{s_j})^2 \prod_{i=1}^{M_c} P(d_{j,i})] \quad (23)$$

其中 \mathbf{d} 表示符号 s_j 的 bit 矢量。

由于 bit 之间相互独立,因此符号之间也相互独立。 η_{s_j} 和 $\sigma_{s_j}^2$ 作为先验信息传递给 MMSE-IC 模块。

(2)软解调 软解调模块的功能是利用 MMSE-IC 检测结果计算每一个符号所对应编码 bit 的 LLR,也就是将接收信号转换为软 bit,这种软 bit 表示了信息 bit 为 1 或者为 0 的概率。

符号 d_j 所对应编码 bit $d_{j,i}$ 的硬判决条件是: $P[d_{j,i} =$

$\beta | r] > P[d_{j,i} = (1 - \beta) | r]$ 。此时

$$\text{LLR}(d_{j,i}) = \log \frac{P[d_{j,i} = 1 | r]}{P[d_{j,i} = -1 | r]} = \log \frac{\sum_{d: d_j \in A_1^i} e^{-\frac{1}{\sigma^2} \|r - Hd\|^2}}{\sum_{d: d_j \in A_0^i} e^{-\frac{1}{\sigma^2} \|r - Hd\|^2}} \quad (24)$$

通过利用 Bayes 规则并假设被发射的符号具有相同的分布^[5],则此式可以简化为

$$\text{LLR}(d_{j,i}) = \frac{W_{j,j}}{1 - W_{j,j}} \left[\min_{a \in A_0^i} \psi_j^2(a) - \min_{a \in A_1^i} \psi_j^2(a) \right] \quad (25)$$

其中 $\psi_j(a) \triangleq \left| \frac{y_{\text{mmse},j}}{W_{j,j}} - a \right|$, Wiener 滤波参数 \mathbf{W} 和 \mathbf{y}_{mmse} 可以通过 MMSE-IC 模块得到。

4 性能分析

为了评价 MMSE-IC 和 MMSE-IC-Turbo 检测算法的性能,将这两种方法与 MMSE 及 WCDMA 系统采用的 RAKE-BLAST 方法在 TD-SCDMA 系统的 MIMO 模型中进行了仿真比较。

仿真链路参考 3GPP TS25.221 中关于 TD-SCDMA 基本链路模型、参数和算法设计;信道传播条件参考 3GPP TR25945 中 9.7 节链路仿真假设条件^[6];MMSE-IC 和 MMSE-IC-Turbo 算法都采用 2 次迭代;每个 5ms 子帧的资源配置如表 1 所示。

表 1 仿真参数配置

速率 / 参数 (bps)	时隙数	每时隙 码道数	天线 方式	调制 方式
384k	4	10	1×1	QPSK
1M	6	16	1×1	QPSK
2.5M	6	16	1×1	16QAM
768k	4	10	2×2	QPSK
2M	6	16	2×2	QPSK
5M	6	16	2×2	16QAM

关于 WCDMA 系统中采用的 RAKE-BLAST 方法可以参考 3GPP TR25848 的描述,主要是将 RAKE 接收和多天线 BLAST 检测相结合。WCDMA 系统的信道估计采用导频序列估计,不同发射天线之间使用相互正交的导频序列,接收端通过检测正交导频序列区分不同发射天线之间的空间信道;仿真链路中 TD-SCDMA 系统的信道估计采用基于 midamble 的信道估计,分配在不同天线上的 burst 数据结构采用不同的 midamble 移位,利用 midamble 的不同移位进行多天线空间信道分离。RAKE-BLAST 检测的整个处理过程为:首先对每个接收天线上的信号各自进行解扩以区分不同用户信息,然后对每个用户信息做 RAKE 接收将各个多径信息合并,最后通过 BLAST 检测方法分离来自不同发射天线的信息,在具体实现时多天线 BLAST 检测一般采用 ZF+IC 的方法。

图 4,图 5 比较了这几种算法在 $[2 \times 2]$ TD-SCDMA 系

统中的性能。可以看出:对于使用MIMO技术的TD-SCDMA

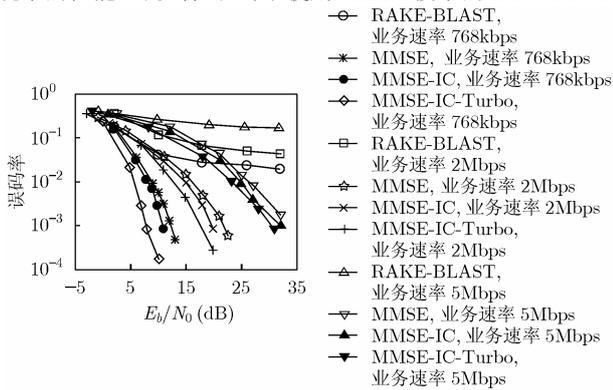


图 4 在多径衰落信道环境中, 各种算法在不同业务速率时的性能比较(天线: 2×2)

系统, MMSE-IC-Turbo 检测算法性能最好, MMSE-IC 优于 MMSE, RAKE-BLAST 相对较差。

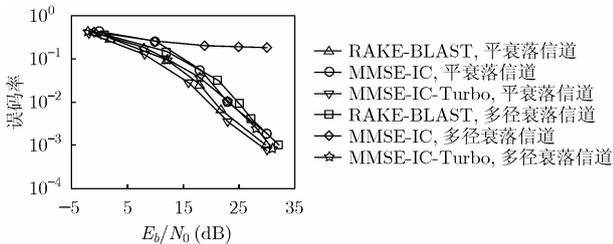


图 5 对于 5Mbps 的业务速率, 各种算法在不同信道环境中的性能比较(天线: 2×2)

出现这种结果主要原因是: 3GPP 协议上提到的 RAKE-BLAST 方法对于收到的信号直接解扩以区分不同用户信息, 这样没有考虑用户之间的 MAI 干扰问题, 而且 TD-SCDMA 系统使用的多用户扩频码(OVSF 码+16bit 的 SCRAMBLE)码字较短, 在多径环境下的自相关和互相关性不是很好, 此时采用 RAKE 方法接收就不能很好地区分多径信道的各径分量并进行独立的解扩合并, 因此性能势必受到影响; 而 MMSE-IC 检测算法利用所有用户之间的相关性信息检测单个用户的信息, 并考虑了噪声的影响, 充分抑制了扩频码之间的干扰; 参考式(15)及 MMSE-IC 检测的处理过程, 可以看出 MMSE-IC 检测的第 1 步就是 MMSE 检测, 通过 MMSE 检测获得初值, 然后通过迭代干扰删除进一步消除多天线之间的干扰, 提高检测精度, 一般 2~3 次迭代可以迅速提高系统性能, 迭代次数继续增加改善很小; MMSE-IC-Turbo 检测算法在 MMSE-IC 检测的基础上, 将检测模块和译码相结合, 利用 SISO 译码的软信息进行软判决反馈和软干扰删除, 代替了 MMSE-IC 检测算法中的硬判决和硬干扰删除, 通过迭代在检测模块和译码模块之间重复交换软信息更好地改善了系统的性能。

图 6 比较了现有的单发单收 TD-SCDMA 系统(1.28 Mcps TDD)和采用了 MIMO 结构的[2×2]TD-SCDMA 系统容量。如果保持单发单收 TD-SCDMA 系统原有的调制方式和编码方式不变, 增加天线数目至 2×2, 利用 MMSE-IC 和 MMSE-IC-Turbo 算法, 系统的传输速率可以提高到接近

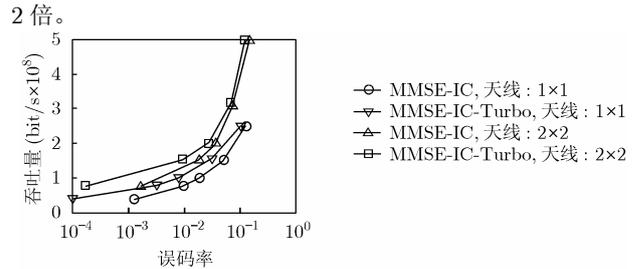


图 6 在多径衰落信道环境中, 两种算法在天线数不同时的容量比较(SNR: 10dB)

以下对 MMSE、MMSE-IC 和 MMSE-IC-Turbo 的计算量进行了分析比较。MMSE: 根据式(14), 如果直接计算, 需要对 $\left(\mathbf{H}^H \mathbf{H} + \frac{\sigma_n^2}{\sigma_s^2} \mathbf{I} \right)$ 求逆, 考虑到其可以表示为对称三对角 Toeplitz 矩阵, 利用 Cholsky 分解的方法避开求逆能够得到简化后的 MMSE 计算量(乘法)约为 $20/3(KM_t)^3 N$; MMSE-IC: 根据式(16)和式(17), IC 的计算量主要是每一个发射天线的干扰删除和信号估计, 假设 I 为迭代次数, 计算量约为 $M_t[M_r N K(Q+W-1) + 20/3K^3 N]I$ 。从 MMSE-IC 的处理过程可以看出, 其计算量为 MMSE 和 IC 的总和。MMSE-IC-Turbo: Turbo 译码本身的复杂度为 $O(2^v)$, 其中 v 为约束长度^[7]。接收算法一般的处理过程是先检测, 然后将检测的结果送给 Turbo 译码, MMSE-IC-Turbo 算法将检测和译码一块处理, 从上面的过程可以看出, 其中增加的计算来自软匹配、软解调和迭代。根据式(21)、式(22)和式(25), 计算量主要由译码信息的长度 $L(=KNM_t)$ 决定, 约为 $9KNM_t I$, 在硬件实现时, 具体数值的指数和对数运算通常查表得到。

从上面的计算量分析可以看出, MMSE-IC, MMSE-IC-Turbo 与一般的接收算法(MMSE 检测+Turbo 译码)相比较, 在 1 次迭代过程中, 由于 IC 和软匹配、软解调带来的复杂度增加并不是很大, 整个算法的复杂度主要由迭代次数决定。从性能分析可以看出, 一般 I 取 2~3 就可以迅速提高系统性能。

5 结束语

通过建立 TD-SCDMA 系统的 MIMO 模型以及比较 MMSE-IC, MMSE-IC-Turbo, MMSE 及 RAKE-BLAST 检测算法在此模型中的性能, 可以看出: 利用 MIMO 技术可以成倍提高系统的容量; 基于 midamble 的 MIMO 模型能够较好地分离 TD-SCDMA 系统中的多天线空间信道; 同时 MMSE-IC 和 MMSE-IC-Turbo 检测算法相比较于现有的 MMSE 及 3GPP 中 WCDMA 系统采用的 RAKE-BLAST 方法更适用于 TD-SCDMA 系统, 性能更好, 具有较高的实用价值。

参考文献

[1] 康绍莉, 裘正定, 李世鹤. TD-SCDMA 系统中低代价信道估计方法的改进. 通信学报, 2002, 10(23): 108-112.

- [2] Rao P and Prabhu V K. A successive interference cancellation multiuser detector for MIMO CDMA systems. Vehicular Technology Conference 2003-fall IEEE 58th. Orlando Florida, USA., 2003, vol.2: 1075–1079.
- [3] 3rd Generation Partnership Project. Technical Specification Group Radio Access Network. Physical layer aspects of UTRA High Speed Downlink Packet Access. 3GPP TR 25.848 V4.0.0, 2001.
- [4] Butler M and Collings I. A zero-forcing approximate log-likelihood receiver for MIMO bit-interleaved coded modulation. *IEEE Communications Letters*, 2004, 8(2): 105–107.
- [5] Seethaler D, Matz G, and Hlawatsch F. An efficient MMSE-based demodulator for MIMO bit-interleaved coded modulation. Proc. IEEE Global Telecommunication Conference 2004. Dallas Texas, USA., 2004, vol.4: 2455–2459.
- [6] 3rd Generation Partnership Project, Technical Specification Group Radio Access Networks; RF requirements for 1.28 Mcps UTRA TDD option. 3GPP TR 25.945V5.1.0, 2004.
- [7] Giallorenzi T R and Wilson S G. Multiuser ML sequence estimator for convolutionally coded asynchronous DS-SS systems. *IEEE Trans. on Communications*, 1996, 8(44): 997–1008.
- [8] 陶小峰, 秦海燕, 张平. 频率选择性信道下 V-BLAST 信道矩阵的建模. 北京邮电大学学报, 2004, 27(2): 80–83.
- [9] Liu Sheng-mei, Xu Chang-jiang, and Feng Guang-zeng. The least square constant modulus algorithm for blind adaptive multiuser detection. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 2001, 8(4): 63–67.
- [10] Sellathurai M and Haykin S. Turbo-BLAST performance evaluation in correlated Rayleigh-fading environment. *IEEE J. on Select. Areas Communications*, 2003, 21(4): 340–349.
- [11] Hassibi B and Bertrand M. High rate codes that are linear in space and time. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2002, 7(48): 1804–1824.
- [12] Shen Cong, Zhuang Hairuo, and Zhou Shidong. Detection algorithm improving V-BLAST performance over error propagation. *IEE Electronics Letters*, 2003, 13(39): 1007–1008.
- 杨晓辉: 男, 1975 年生, 博士生, 研究方向为多天线多用户系统的联合发送和联合检测等.
- 李 霜: 女, 1980 年生, 硕士生, 研究方向为迭代译码和空时信号处理.
- 何丹丹: 女, 1982 年生, 硕士生, 研究方向为 TD-SCDMA 系统的检测理论和自适应处理技术.
- 李立华: 女, 1976 年生, 高级研究员, 研究方向为多天线 MIMO OFDM 系统理论.
- 张 平: 男, 1959 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为未来宽带移动通信系统理论与技术等.