

SCDMA系统中MSJD技术的实现方案

杨丰瑞

(重庆邮电学院信科公司 重庆 400065)

【摘要】介绍了接近满码道工作时不能满足系统性能要求的联合检测技术,研究了能有效解决信噪比恶化问题、大大提高系统性能的多步联合检测技术;提出了改进的并行多步联合检测算法,减小了系统时延;并给出了SCDMA系统中的实现方案。

关键词 同步码分多址; 多用户检测; 联合检测; 多步联合检测

中图分类号 TN929.533 **文献标识码** A

Practical Scheme for Multi-Step JD Technology in SCDMA System

YANG Feng-rui

(Information Technology Co., Ltd., Chongqing University of Post and Telecommunication Chongqing 400065)

Abstract Joint detection is introduced, which can not reach the need of system performance when system loads is close to the spread factor. MSJD is put forth to overcome the problem, and a improved parallel MSJD is presented to reduce system time delay, and then a practical scheme for MSJD in SCDMA is proposed.

Key words synchronous CDMA; multi-user detection; joint detection; multi-step JD

码分多址(Code Division Multiple Access, CDMA)具有高容量、软切换等优点,已经成为第三代移动通信中的主要技术。但是 CDMA 是干扰受限系统,多址干扰(Multiple Access Interference, MAI)和符号间干扰(InterSymbol Interference, ISI)是影响系统容量和性能提高的主要因素。文献[1]提出了同时消除 MAI 和 ISI 的联合检测技术。相对于单用户检测,它大大提高 CDMA 的系统性能。但由于信噪比恶化,系统接近满码道工作时,联合检测技术不能达到系统性能要求。多步联合检测有效地解决了信噪比恶化的问题,大大提高了系统的性能^[2,3]。

1. 联合检测技术

假设同步码分多址(Synchronous CDMA, SCDMA)系统有 K 个用户,在发送端用户 k 对 M 帧的信息比特 $\{b^{(k)}\}$ 进行信道编码后交织,得到数据符号 $\{d^{(k)}\}$;然后用扩频系数为 SF 的扩频码 $c^{(k)}$ 进行扩频,得到用户 k 的发射数据,经过冲激响应为 $h^{(k)}$ 的信道到达接收端,得到用户 k 的接收信号 $e^{(k)} = A^{(k)}d^{(k)}$,且有:

$$A_{(j-1)*SF+l,j}^{(k)} = \begin{cases} B_l^{(k)} = c^{(k)} \otimes h^{(k)} & j=1,2,\dots,J;l=1,2,\dots,SF+W-1;k=1,2,\dots,K \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

式中 A 为系统矩阵; $B^{(k)}$ 为合并信道冲激响应,它考虑了信道特性和扩频码的影响; W 为估计窗长; J 为一帧中数据符号的长度。

假定信道噪声为 n ,则 K 个用户到达基站接收端后收到的总信号为 $e = \sum_{k=1}^K e^{(k)} + n = Ad + n$ 。

在接收端采用联合检测(Joint Detection, JD)技术对接收数据进行检测,得到所有用户的数据符号。联合检测技术包括ZF-BLE算法和MMSE-BLE算法^[1,4]。

当噪声 n 为加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN)时, ZF-BLE 算法所得的估计值为:

$$\hat{d}_{c,ZF-BLE} = (\mathbf{A}^{*T} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^{*T} e = \mathbf{d} + (\mathbf{A}^{*T} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^{*T} n$$

当噪声 n 为 AWGN, 噪声功率为 σ^2 , 数据符号矢量 \mathbf{d} 的协方差矩阵 $\mathbf{R}_d = \mathbf{G}_{KJ}$ (\mathbf{G}_{KN} 表示 $KJ \times KJ$ 单位阵) 时, MMSE-BLE 算法所得估计值为 $\hat{d}_{c,MMSE-BLE} = (\mathbf{A}^{*T} \mathbf{A} + \sigma^2 \mathbf{G}_{KJ})^{-1} \mathbf{A}^{*T} e$ 。

总的来讲, MMSE-BLE 算法比 ZF-BLE 算法的性能好: 当噪声功率 σ^2 趋于零时, MMSE-BLE 等价于 ZF-BLE, 对抗 MAI 及 ISI 是最优的; 当噪声功率远高于信号功率, MMSE-BLE 相当于传统的 MF, 对抗噪声是最优的。

但是, 采用传统的联合检测技术, 随着用户数的增加, 信噪比恶化 δ 会增大, 传输质量将下降。文献[2]提出了一个经验公式来近似表示 $\delta \approx \frac{K_a * SF + 1}{K_a * SF - K + 1}$, 其中 K_a 表示接收端的天线数, 这里假定天线的接收数据不相关。

2 多步联合检测技术

接收信号包含的用户被分为两组, 各自进行联合检测, 由多个周期来完成。设第一组包含用户 1 至用户 K_g , 第二组包含用户 $K_g + 1$ 至用户 K , 一般取 $K_g \approx K/2$ 。 \mathbf{A}_1 和 \mathbf{A}_2 分别表示第一组用户和第二组用户的系统矩阵。 d_1 和 d_2 表示第一组用户和第二组用户的数据符号。接收信号 e 表示为:

$$e = \sum_{k=1}^K e^{(k)} + n = \sum_{k=1}^{K_g} e^{(k)} + \sum_{k=K_g+1}^K e^{(k)} + n = \sum_{k=1}^{K_g} \mathbf{A}^{(k)} d^{(k)} + \sum_{k=K_g+1}^K \mathbf{A}^{(k)} d^{(k)} + n = \mathbf{A}_1 d_1 + \mathbf{A}_2 d_2$$

可以采用下面的步骤来实现所有用户的检测:

1) 接收端把总的接收信号 e 作为 ZF-BLE 算法的输入信号, 对第一组用户进行 JD, 而把其他用户信号当作噪声处理, 估计出第一组用户的数据符号 $\hat{d}_{1,ZF-BLE} = (\mathbf{A}_1^{*T} \mathbf{A}_1)^{-1} \mathbf{A}_1^{*T} e$ 。

信号的重构是在译码比特的基础上进行的, 重构的过程就是进行与发送端相同的编码、扩频以及信道模拟。根据 $\hat{e}_{d,1} = \sum_{k=1}^{K_g} \mathbf{A}^{(k)} \hat{d}^{(k)}$, 可以重构出第一组用户信号, 然后从总的用户信号中减去它, 得到第二组用户输入信号 $e_2 = e - \hat{e}_{d,1}$ 。

2) 采用 ZF-BLE 算法得到第二组用户的数据符号 $\hat{d}^{(k)}, k = K_g + 1, \dots, K$ 。经过与第 1) 步类似的处理, 估计出第二组用户信息比特, 得到第一组用户的输入信号: $e_1 = e - \hat{e}_{d,2} = e - \sum_{k=K_g+1}^K \mathbf{A}^{(k)} \hat{d}^{(k)}$

通过第 1) 步和第 2) 步检测, 检测出所有用户的信息比特, 这是多步联合检测的第一个周期。在下面进行的第二个周期, 采用 MMSE-BLE 代替 ZF-BLE, 这就需要知道噪声功率 σ^2 , 噪声 \hat{n} 可由 $\hat{n} = e_2 - \hat{e}_{d,2}$ 估计得出。

3) 采用 MMSE 算法, 检测出第一组用户的数据 $d^{(k)} (k = 1, 2, \dots, K_g)$, 由 $\hat{d}_{c,MMSE-BLE} = (\mathbf{A}_1^{*T} \mathbf{A}_1 + \sigma^2 \mathbf{G}_{KJ})^{-1} \mathbf{A}_1^{*T} e$ 容易得到第二组用户的输入信号 $e_2 = e - \hat{e}_{d,1}$ 。

4) 采用 MMSE 算法, 检测出第二组用户的数据 $\hat{d}^{(k)} (k = K_g + 1, \dots, K)$, 容易得到第一组用户下一周期的输入信号 $e_1 = e - \hat{e}_{d,2}$ 。

第 3) 步和第 4) 步检测称为多步联合检测的第二个周期, 以后周期的处理过程与第二周期相似。在最后一个周期估计出所有用户的信息比特。

在 MSJD 的每一个周期, 由于信道编码及交织、解交织及译码是以每 M 帧为一个单位进行的, 只有等 M 帧的数据完全检测出来才能进行译码, 重构, 将造成多步联合检测延时较大。从仿真可以看出, 第 2) 步检测的性能并不比第 1) 步检测好多少, 这是因为在第 1) 步检测中, 其实是把第二组用户的信号作为噪声来处理了, 第 2) 步检测的输入信号又是由第一组数据重构生成。

因此, 本文对上述 MSJD 做了改善, 如图 1 所示。第 i 个周期两组用户联合检测的输入数据分别表示为

$$e_1^{(i)} = e - \hat{e}_{d,2}^{(i-1)} \text{ 和 } e_2^{(i)} = e - \hat{e}_{d,1}^{(i-1)}。$$

第一周期 ($i=1$), 把总的接收信号 e 作为联合检测的输入信号, 即 $\hat{e}_{d,1}^{(0)}, \hat{e}_{d,2}^{(0)}$ 均取 0, 采用 ZF-BLE 算法, 这样就可以并行处理第 1) 步检测和第 2) 步检测。同理, 第二周期及其以后周期 ($i=2,3,\dots$) 的两组用户信号的处理也可以并行处理, $\hat{e}_{d,1}, \hat{e}_{d,2}$ 分别由上一周期的重构生成, 并根据上一周期的噪声估计结果采用 MMSE-BLE 进行联合检测, 这样就大大减少了多步联合检测的延时。

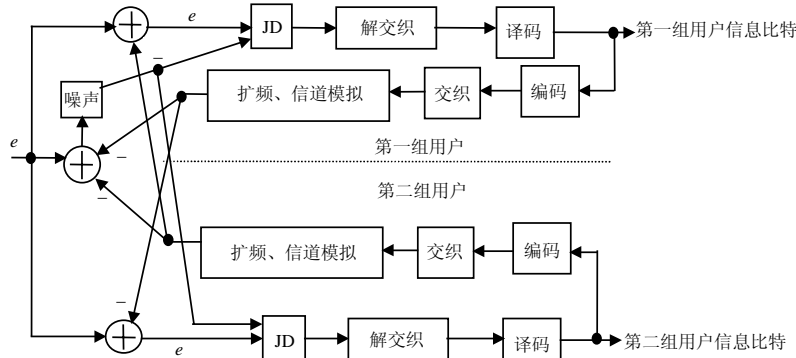


图1 改进的并行多步联合检测

3 多步联合检测技术的性能

信息比特的编码方式采用 3GPP 推荐的 Turbo 编码方案, 其交织长度取为 700, 采用 MAX-LOG-MAP 算法进行迭代译码, 迭代次数固定为 6。假定已经采用了有效的功率控制, 使得达到基站的所有用户功率相等。

图 2 给出了 AWGN 信道系统满码道 ($K=16$) 工作时, 多步联合检测对系统性能的改善。可见, 相对于传统的联合检测技术, 多步联合检测技术将提高系统性能。多步联合检测的第二周期由于去除了其他组用户对本组用户的影响, 而且采用 MMSE-BLE 算法, 相对于第一周期, 系统性能将提高。容易看出, 如果多步联合检测的周期数趋于无穷大, 不考虑重构时产生的错误, 当一个时隙占用 K 个码道时, 采用多步联合检测的系统性能可以接近采用传统检测技术时 $K/2$ 个码道的性能。

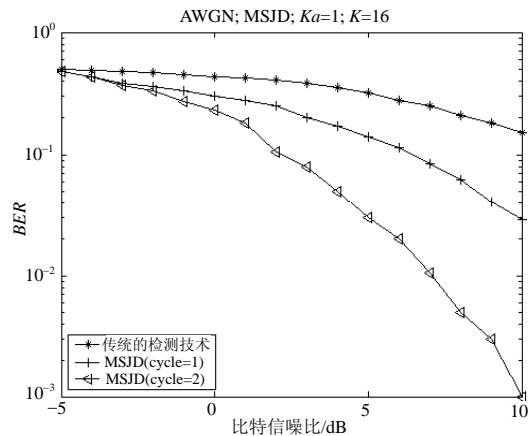


图 2 高斯白噪声信道下 MSJD 的性能曲线

4 多步联合检测技术的实现方案

根据前面对多步联合检测技术的介绍, 结合 TD-SCDMA 系统的帧结构和相应的处理方法, 得到了如图 3 所示的实现方案。其中, M 表示交织帧的帧数, I 表示多步联合检测周期数。

为减少重复运算量, MSJD 技术需要很大的存储空间来存储第一组码道和第二组码道从第 1 帧到第 M 帧的系统矩阵, 以完成 MSJD 第 1 个周期到第 I 周期的联合检测。

需要指明的是, 在前面关于 MSJD 的介绍中, 没有特别指明码道和用户的差别。而在实际的 SCDMA 系统中, 一个用户通常需要占用多个码道, 在发送端, 由于每个用户所有码道的信息比特是统一进行信道编码和交织的, 如果同一用户的不同码道被分配到不同的组, 那么, 在接收端, 同一周期的不同组的 JD 输出后, 应该把同一用户的所有码道的数据符号统一解交织后再进行译码; 在重构时, 编码、交织依然是各个用户统一进行, 但是在进行信道模拟时, 需要按组把码道分开, 分别乘以各组的系统函数, 得到各组的重构信号。

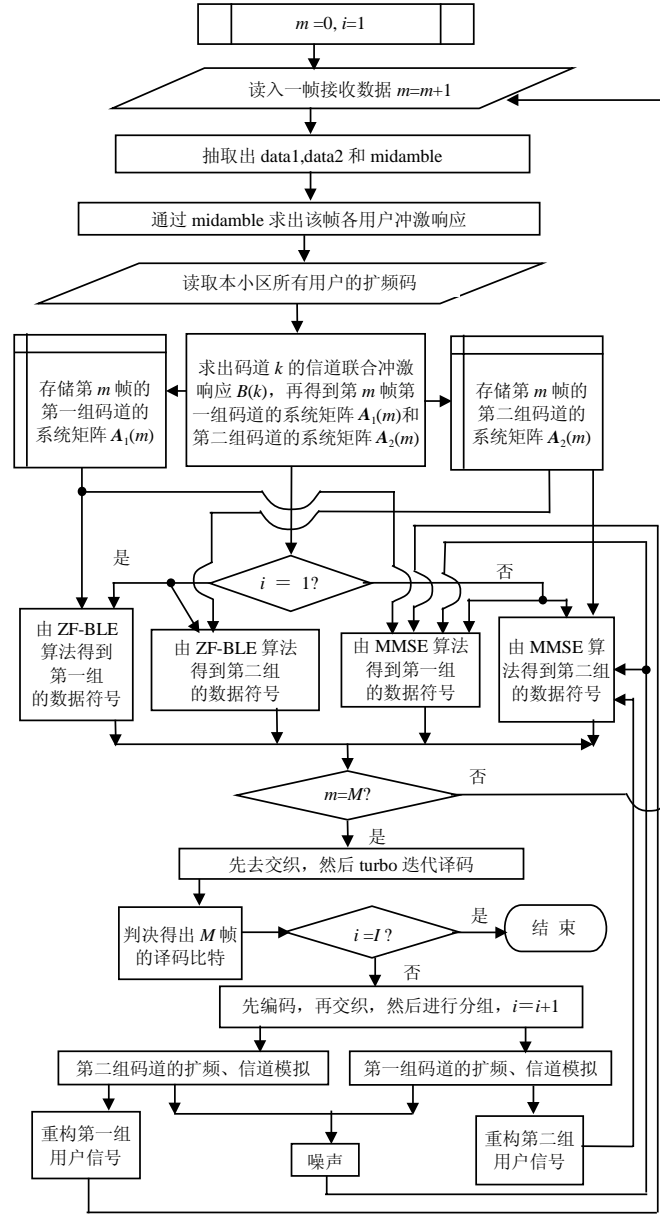


图3 多步联合检测实现方案的流程

参 考 文 献

- [1] Klein A, Kaleb G K, Baier P W. Zero forcing and minimum mean square error equalization for multi-user detection in code division multiple access channels[J]. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 1996, 45(2): 276-287
- [2] Weckerle M, Weber T, Oster J P, et al. Space-times signal processing utilizing multi-step joint detection for the uplink of time division CDMA[C]. In: Proc. International Conference on Communication Technologies, Beijing, 2000. 1 330-1 335
- [3] 于秀兰, 张 勇. SCDMA编码系统中MUD技术的应用研究[J]. 重庆邮电学院学报(自然科学版), 2004, 16(3): 39-42
- [4] 黄华生, 蒋 泽. TD-SCDMA系统中联合检测的原理和实现[J]. 重庆邮电学院学报(自然科学版), 2001, 13(2): 5-8