

一种基于检测信息可靠度的部分软干扰消除迭代多用户检测算法

梅中辉 吴乐南

(东南大学无线电工程系 南京 210096)

摘要 该文提出了一种基于检测信息可靠度的部分软干扰消除迭代多用户检测算法。如果由从信道译码器所获得的发送字符的先验信息大于某一预定阈值,则认为对其检测具有较高的可靠度,因而可以考虑将其对应的多址干扰成分从匹配滤波器输出向量中直接消除,相当于减小了干扰用户的数目,从而可以减小迭代多用户检测算法的复杂度。该算法的计算复杂度能够随着多址干扰的减小和信道信噪比的增大而降低。

关键词 迭代多用户检测, 部分软干扰消除, 多址干扰

中图分类号: TN914.53

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)09-1693-04

An Iterative Multiuser Detection Algorithm Using Partial Soft Interference Cancellation Based on Detection Reliability

Mei Zhong-hui Wu Le-nan

(Department of Radio Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract In this paper, an iterative multiuser detection algorithm using partial soft interference cancellation based on detection reliability is proposed. If the *a priori* information of the transmitted symbols provided by the channel decoder in the previous iteration is larger than a predefined threshold, the detection of these symbols are thought to be reliable and the corresponding MAI (Multiuser Access Interference) can be eliminated from the outputs of the matched filters. This is equal to decrease the number of the interference users, thus the complexity of the iterative multiuser detection algorithm is decreased. Furthermore, when the MAI is moderate and the SNR is high, the computational complexity of this algorithm can be reduced adaptively.

Key words Iterative multiuser detection, Partial soft interference cancellation, MAI (Multiuser Access Interference)

1 引言

迭代多用户接收机通过交换多用户检测器和信道译码器间的软信息,可以达到接近于单用户的性能,如文献[1-4]所示。但是基于最大后验概率准则(MAP)的最优迭代多用户检测(IMD)算法的计算复杂度随用户数呈指数增长,因此研究低复杂度的算法成为必然。文献[5]提出的准最优 IMD 算法根据信道译码器所获得的发送字符的先验信息,对匹配滤波器的输出向量进行完全软干扰消除,算法的计算复杂度最小,但是当用户的特征波形的互相关较大时,由于错误传递的存在,其性能将显著下降。文献[6]提出的低复杂度 IMD 算法首先对匹配滤波器的输出进行软干扰消除,然后再进行 MMSE 滤波、高斯逼近等,该算法能够取得较好的性能,但是其复杂度并不能随着信道条件的改善而下降。本文提出一种基于检测信息可靠度的部分软干扰消除 IMD 算法,复杂度介于最优算法和文献[5]算法之间,当多址干扰较小、信道信噪比较高时,计算复杂度能够显著下降;而当多址干扰较大、信道信噪比较低时,该算法能向最优算法逼近而使系统性能改善。

2 系统模型

本文考虑的是理想的同步 CDMA 信道模型,如图 1。假设无码间干扰存在,时刻 t 信道的输出为

$$r(t) = \sum_{k=1}^K A_k b_k(i) s_k(t - iT) + \sigma n(t), \quad t \in [iT, iT + T] \quad (1)$$

式中 $\{b_k(i) \in \{-1, +1\}\}$ 是第 k 个用户发送的字符系列 A_k 为第 k 个用户的信号幅度; $s_k(t)$ 为第 k 个用户的扩频波形; T 是字符间隔; $n(t)$ 为具有单位功率谱密度的高斯白噪声, σ 为噪声方差。

先将接收信号 $r(t)$ 经过 K 个匹配滤波器,然后对匹配滤波器的输出再采样,则 K 个匹配滤波器的输出向量 $\mathbf{y}(i) = [y_1(i) \cdots y_K(i)]^T$ 可以写成:

$$\mathbf{y}(i) = \mathbf{R} \mathbf{A} \mathbf{b}(i) + \mathbf{n}(i) \quad (2)$$

式中 \mathbf{R} 为归一化的扩频系列互相关矩阵,且有 $[\mathbf{R}]_{k,l} = \rho_{kl}$

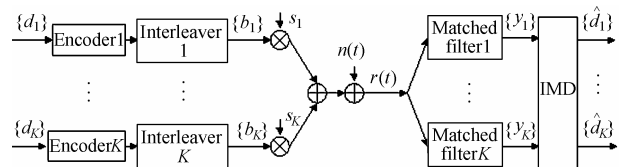


图 1 系统模型
Fig.1 System model

$$= \int_0^T S_k(t)S_1(t)dt, \quad \mathbf{A} = \text{diag}\{A_1, \dots, A_K\}, \quad \mathbf{b}(i) = [b_1(i), b_2(i), \dots, b_K(i)]^T; \mathbf{n}(i) \text{ 为高斯噪声矢量, 其均值为 } 0, \text{ 均方差为 } \sigma^2 \mathbf{R}.$$

3 最优迭代多用户检测算法

迭代多用户接收机的系统模型如图2所示。λ₂[b_k(i)] 为由信道译码器输出的发送字符的先验信息；λ₁[b_k(i)] 为SISO多用户检测器输出的外信。

对于最优 IMD 算法，SISO 多用户检测器将基于 MAP 准则来计算 λ₂[b_k(i)]，如式(3)所示。

$$\lambda_1[b_k(i)] = \log \frac{\sum_{\mathbf{b} \in \mathbf{B}_k^+} \exp[-(\mathbf{y}(i) - \mathbf{RAB})^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y}(i) - \mathbf{RAB}) / (2\sigma^2)] \prod_{j \neq k} p(b_j)}{\sum_{\mathbf{b} \in \mathbf{B}_k^-} \exp[-(\mathbf{y}(i) - \mathbf{RAB})^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y}(i) - \mathbf{RAB}) / (2\sigma^2)] \prod_{j \neq k} p(b_j)} \quad (3)$$

式中 $\mathbf{B}_k^+ \equiv \{b_1, \dots, b_{k-1}, +1, b_{k+1}, \dots, b_K\}, b_j \in \{+1, -1\}, j \neq k$ 。类似可写出 \mathbf{B}_k^- 。

用 $[\mathbf{B}_k^+]$ 表示 \mathbf{B}_k^+ 中向量 \mathbf{b} 的数目，则有 $[\mathbf{B}_k^+] = [\mathbf{B}_k^-]$ ， $= 2^{K-1}$ 可见最优算法的计算复杂度随用户数而呈指数增长。

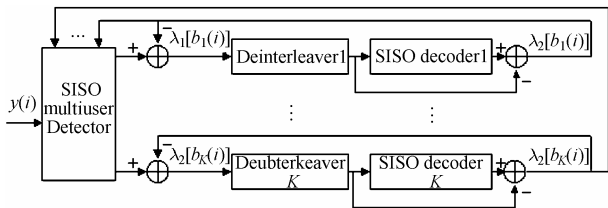


图2 迭代多用户接收机
Fig.2 Iterative multiuser receiver

4 基于检测信息可靠度的部分软干扰消除IMD算法

为了减小 IMD 算法的计算复杂度，一种可行的途径是仅选择 \mathbf{B}_k^+ (或 \mathbf{B}_k^-) 中对计算式(3)影响较大的 \mathbf{b} 来计算 λ₁[b_k(i)]，如文献[4,7]所示。本文所提出算法的出发点是认为可以将具有较高检测可靠度的字符所对应的多址干扰信息从匹配滤波器输出向量中直接消除，从而可达到减小计算复杂度的目的。

对用户 k 而言，匹配滤波器输出向量中的多址干扰成分可以写为

$$\begin{aligned} \mathbf{y}(b_k(i) = 0) &= \mathbf{RA}[b_1(i) \dots b_{k-1}(i) 0 b_{k+1}(i) \dots b_K(i)]^T \\ &= \mathbf{RA}[\dots b_m^{(1)}(i) \dots b_n^{(2)}(i) \dots]^T \\ &= \mathbf{RAB}^{(1)}(i) + \mathbf{RAB}(i) \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)中当 λ₂[b_j(i)] ≥ L 时，将 b_j(i) 表示成 b_j⁽¹⁾(i)；当 λ₂[b_j(i)] < L 时，将 b_j(i) 表示成 b_j⁽²⁾(i)；L 为某一选定的可靠度阈值。

因此根据前次迭代运算中信道译码所提供的发送字符的先验信息，我们可以将多址干扰分为两类：一类为具有较高检测可靠度的 $\mathbf{b}^{(1)}(i)$ 所对应的多址干扰成分；另一类为只

具有较低检测可靠度的 $\mathbf{b}^{(2)}(i)$ 所对应的多址干扰成分。对于 $b_m^{(1)}(i) \in \mathbf{b}^{(1)}(i)$ ，我们计算出其软估值如下：

$$\begin{aligned} \hat{b}_m^{(1)}(i) &= \sum_{b_m^{(1)} \in \{+1, -1\}} b_m^{(1)} p(b_m^{(1)}) \\ &= (+1) \frac{\exp\{\lambda_2[b_m(i)]\}}{\exp\{\lambda_2[b_m(i)]\} + 1} + (-1) \frac{1}{\exp\{\lambda_2[b_m(i)]\} + 1} \\ &= \frac{\exp\{\lambda_2[b_m(i)]\} - 1}{\exp\{\lambda_2[b_m(i)]\} + 1} \end{aligned} \quad (5)$$

由于 $\hat{\mathbf{b}}^{(1)}(i) = [\dots \hat{b}_m^{(1)}(i) \dots]^T$ 具有较高的可靠度近似于 $\mathbf{b}^{(1)}(i) = [\dots b_m^{(1)}(i) \dots]^T$ ，因此可以考虑将其对应的多址干扰成分从匹配滤波器输出向量中直接消除：

$$\begin{aligned} \mathbf{y}^{(2)} &= \mathbf{y}(i) - \mathbf{RAB}^{(1)}(i) \\ &\approx \mathbf{y}(i) - \mathbf{RA}\hat{\mathbf{b}}^{(1)}(i) \end{aligned} \quad (6)$$

当对 $\mathbf{b}^{(1)}(i)$ 中字符的检测完全正确时， $\mathbf{y}^{(2)}(i)$ 中将只剩下被检测用户的信息、 $\mathbf{b}^{(2)}(i)$ 所对应的多址干扰成分和信道噪声，因此可以将 λ₁[b_k(i)] 写成如式(7)所示。

$$\begin{aligned} \lambda_1[b_k(i)] &= \log \left\{ \frac{\sum_{\mathbf{b}^{(2)} \in \mathbf{B}_k^{(2)}} \exp[-[\mathbf{y}^{(2)}(i) - \mathbf{RAB}^{(2)} - \mathbf{RAe}_k]^T \cdot \mathbf{R}^{-1}[\mathbf{y}^{(2)}(i) - \mathbf{RAB}^{(2)} + \mathbf{RAe}_k] / (2\sigma^2)] \prod_{j \neq k} p(b_j)}{\sum_{\mathbf{b}^{(2)} \in \mathbf{B}_k^{(2)}} \exp[-[\mathbf{y}^{(2)}(i) - \mathbf{RAB}^{(2)} - \mathbf{RAe}_k]^T \cdot \mathbf{R}^{-1}[\mathbf{y}^{(2)}(i) - \mathbf{RAB}^{(2)} + \mathbf{RAe}_k] / (2\sigma^2)] \prod_{j \neq k} p(b_j)} \right\} \quad (7) \end{aligned}$$

在式(7)中对 p(b_j) 的计算如下：

$$\begin{aligned} p(b_j) &= p(b_j(i) = b_j) \\ &\propto \frac{(\exp\{\lambda_2[b_j(i)]\})^{b_j}}{1 + (\exp\{\lambda_2[b_j(i)]\})^{b_j}} \end{aligned} \quad (8)$$

显然有 $[\mathbf{B}_k^{(2)}] \leq [\mathbf{B}_k^+] = [\mathbf{B}_k^-]$ ，因而算法的计算复杂度比最优算法小，本文将用 $\alpha = \frac{[\mathbf{B}_k^{(2)}]}{[\mathbf{B}_k^+]}$ 来评估该算法的复杂度。

下面我们将给出本文算法与最优算法及文献[5]所提出算法间的关系。

(1) L = +∞ 时， $\mathbf{b}^{(2)}(i) = [b_1(i) \dots b_{k-1}(i) 0 b_{k+1}(i) \dots b_K(i)]^T$ ，对所有干扰用户所发送字符的检测均认为不可靠，此时该算法等价于最优算法，因而具有最优的系统性能。

(2) L = 0 时， $\mathbf{b}^{(1)}(i) = [b_1(i) \dots b_{k-1}(i) 0 b_{k+1}(i) \dots b_K(i)]^T$ ，对所有干扰用户所发送字符的检测均认为是可靠的，从而将其对应的多址干扰从匹配滤波器输出向量中直接消除，此时该算法等价于文献[5]的算法，因而具有最小的计算复杂度。

5 系统性能评估

本节我们将通过计算机仿真来评估该算法的性能。假设所有用户的信道编码器均采用码率为 1/2 的卷积码，其生成矩阵为 $G(23,35)$ ，约束长度为 5。数据帧的长度为 500。用户个数为 4，每个用户具有相等的接收能量，不同用户间的特征波形的互相关均相等，即 $\rho_{ij} = \rho, 1 \leq i, j \leq 4$ 。

从图 3 可以看出， $\rho = 0.7, K = 4$ 时，文献[5]所提出的准最优 IMD 算法的性能很不理想，原因是当 ρ 较大时，多址干扰较严重，而从信道译码器获得的部分发送字符的先验信息可能较小，因而对其检测不够准确。如果将其对应的多址干扰从匹配滤波器输出向量中直接消除，将不可避免地带来较为严重的错误传递现象。本文所提出算法 ($L = 3$) 的性能非常接近于最优算法，这是由于该算法仅将检测可靠度较高的发送字符所对应的多址干扰成分从匹配滤波器输出向量中直接消除，从而能够以一定的可靠度来避免错误传递现象。从图 4 可看出，当 $\rho = 0.4, K = 4$ 时，文献[5]所提出的准最优 IMD 算法和本文提出算法的性能均较为理想。原因是 ρ 较小时，多址干扰较小，从而对匹配滤波器输出向量进行软消除时所引起的错误传递也较小。因此我们可以根据多址干扰的严重程度来选择相应的可靠度阈值：多址干扰较大时可以取较大的阈值来获得较好的系统性能；当干扰较小时，在确保系统性能的前提下，可以取较小的阈值来减小算法的计算复杂度。

从图 5 和图 6 可以看出，当多用户干扰程度较小 (ρ 较小)、信道的信噪比较大时，该算法的复杂度将显著降低。原因是此时从信道译码器所获得的发送字符的先验信息较大，从而对较多发送字符的检测被判定为可靠性检测，将其所对应的多址干扰成分从匹配滤波器输出向量中直接消

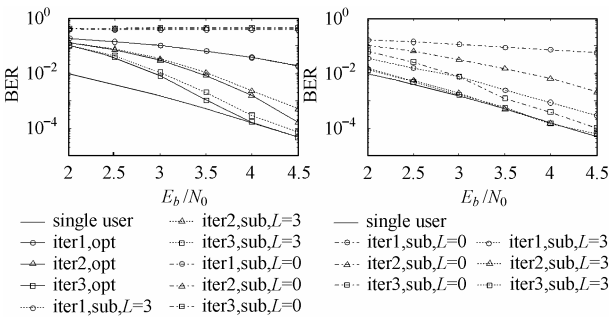


图 3 最优 IMD 算法，文献[5]所提出的准最优 IMD 算法 ($L=0$) 和基于检测信息可靠度的部分软干扰消除 IMD 算法 ($L=3$) 间的性能比较

图 4 文献[5]所提出的准最优 IMD 算法 ($L=0$) 和基于检测信息可靠度的部分软干扰消除 IMD 算法 ($L=3$) 间的性能比较

Fig.3 The performance comparison between the optimal IMD algorithm, the suboptimal IMD algorithm ($L=0$) of Ref.[5] and the partial soft interference cancellation based on detection reliability IMD ($L=3$)

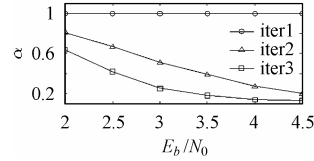


图 5 $\rho = 0.7, K = 4, L = 3$ 时基于检测信息可靠度的部分软干扰消除 IMD 算法的复杂度评估

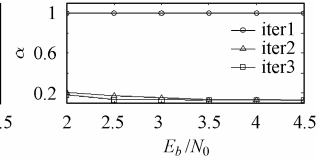


图 6 $\rho = 0.4, K = 4, L = 3$ 时基于检测信息可靠度的部分软干扰消除 IMD 算法的复杂度评估

除， $[B_k^{(2)}]$ 相应减小，从而系统的计算复杂度相应降低。但是由于第一次迭代运算时无法从信道译码器获得任何先验信息，因而进行该次迭代运算与最优算法完全相同，复杂度较大。下面我们将对该算法进行改进，从而降低第一次迭代运算时的计算复杂度。

6 改进的基于检测信息可靠度的部分软干扰消除 IMD 算法

文献[6]提出的 IMD 算法基本可分为两个步骤：首先与文献[5]一样，对匹配滤波器的输出向量进行完全软消除，然后再通过 MMSE 滤波器来进一步消除多址干扰。该算法能够取得较好的系统性能，因为 MMSE 滤波器能够在某种程度上抑制错误传递现象，其计算复杂度为 $o(K^2)$ (在此不对该算法作具体介绍，读者可参照相关文献)。因此，进行第一次迭代运算时，我们将用该算法来进行多用户检测。

同样，通过计算机仿真对该改进算法的性能进行评估。图 7 给出了用户数 $K=8, \rho=0.7$ 时系统的性能。从该图可以看出，取阈值 $T=3$ ，当 SNR 较大时，该算法的性能稍差于文献[6]所提出的算法(MMSE)；而当 SNR 较小时，该算法的性能又稍优于文献[6]所提出的算法。原因是当 SNR 较小时，从信道译码器所获得的发送字符的先验信息也较小，从而有较多发送字符的检测被判定为不可靠性检测，其所对应的多址干扰成分不能从匹配滤波器输出向量中直接消除，算法向

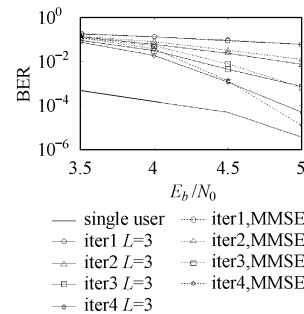


图 7 $\rho = 0.7, K = 8$ 时文献[6]提出的 IMD 算法 (MMSE) 与改进的基于检测信息可靠度的部分软干扰消除 IMD 算法 ($L=3$) 间的性能比较复杂度评估

Fig.7 The performance comparison between the IMD1 algorithm ($L=0$) of Ref.[5] (MMSE) and the partial soft interference cancellation based on detection reliability IMD ($L=3$) with $\rho = 0.7, K = 8$.

最优算法逼近, 复杂度增大, 性能相应提高; 反之则相反。

图8给出了相应的复杂度评估信息。

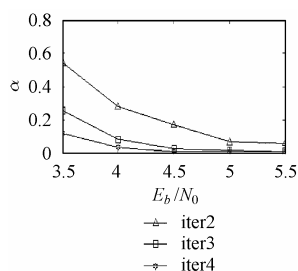


图8 $\rho = 0.7$, $K=8$, $L=3$ 时改进的基于检测信息可靠度的部分软消除 IMD 算法的复杂度评估

Fig.8 The computational complexity evaluation of the partial soft interference cancellation based on detection reliability IMD ($L=3$) with $\rho = 0.7$, $K=8$.

7 结束语

本文提出了一种基于检测信息可靠度的部分软干扰消除迭代多用户检测算法, 该算法不仅可以取得接近于单用户的性能, 而且计算复杂度可以随着信道条件的改善而相应降低。

参考文献

[1] Moher M. An iterative multiuser decoder for near-capacity communications. *IEEE Trans. on Communications*, 1998, 46(7):

870 – 880.

- [2] Boutros J, Caire G. Iterative multiuser joint decoding: Unified framework and asymptotic analysis. *IEEE Trans Info. Theory*, 2002, 48(7): 1772 – 1793.
- [3] Reed M C, Schlegel C B, Alexander P D, Asenstorfer J A. Iterative multiuser detection for CDMA with FEC: Near-single-user performance. *IEEE Trans. on Communications*, 1998, 46(12): 1693 – 1699.
- [4] Alexander P D, Reed M C, Asenstorfer J A, Schlegel C B. Iterative multiuser interference reduction: Turbo CDMA. *IEEE Trans. on Communications*, 1999, 47(7): 1008 – 1014.
- [5] Alexander P, Grant A, Reed M. Iterative detection in code-division multiple-access with error control coding. *Eur. Trans. Telecommun.*, 1998, 9(5): 419 – 426.
- [6] Wang Xiaodong, H Poor V. Iterative (Turbo) soft interference cancellation and decoding for coded CDMA. *IEEE Trans. on Communications*, 1999, 47(7): 1046 – 1061.
- [7] AlRustamani A A, Damnnjanovic A D, Vojcic B R. Turbo greedy multiuser detection. *IEEE J. on Selected Areas In Communications*, 2001, 19(8): 1638 – 1645.

梅中辉: 男, 1976年生, 博士生, 研究方向为通信中的联合信息处理、低复杂度检测等。

吴乐南: 男, 1952年生, 博士生导师, 主要研究方向为多媒体信号处理、通信信号处理等。