

文章编号:1001-5132 (2010) 01-0034-04

DS-CDMA 中一种低复杂度的多用户检测算法

胡观华^{1,2}, 李有明^{1,2*}

(1.宁波大学 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211; 2.宁波大学 通信技术研究所, 浙江 宁波 315211)

摘要: 为降低常规解相关多用户检测算法的运算量和复杂度, 利用相关矩阵的对角占优性提出了一种低复杂度的三对角线性检测算法. 新算法首先将相关矩阵分解为三对角矩阵及其余式, 然后将相关矩阵的求逆问题近似为特殊矩阵的乘法问题. 与解相关检测算法相比, 新算法运算复杂度大大降低, 而检测性能良好. 计算机仿真结果验证了新算法的有效性.

关键词: 多用户检测; 多址干扰; 解相关; 对角占优; 线性检测

中图分类号: TN92

文献标识码: A

直接序列码分多址(DS-CDMA)技术作为第三代(3G)移动通信系统的关键技术, 具有系统容量大、抗多径衰落能力强、频带利用率高、保密性好等优点. 然而, 由于多个用户的随机接入及各用户使用的扩频码一般并非严格正交, 使得各用户之间存在多址干扰(MAI).

多用户检测算法可以分为非线性检测算法^[1-4]与线性检测算法^[5-6]. 其中, 最大似然序列多用户检测性能最优^[1], 但其计算复杂度随用户数呈指数增长. 线性检测算法具有复杂度低、易于实现等优点而成为多用户检测领域的研究热点. 解相关检测是性能优良的线性检测算法, 它无需知道各用户信号的功率, 具有最佳的抗远近效应性能. 虽然解相关检测具有众多的优点, 但它需要求取相关矩阵的逆, 仍具有较高的计算复杂度, 再者, 接收端扩频码的相关矩阵是不断变化的, 需要不断地求矩阵的逆, 复杂度难以接受. 文献[6-7]基于扩频序列相关矩阵的特点和矩阵理论, 提出一种低复

杂度的线性检测算法, 考虑到复杂度的问题, 实际中一般使用一阶逼近算法. 文献[6]中的一阶逼近算法与传统相关检测算法相比复杂度大大降低, 但其性能与传统解相关检测算法相比较差. 针对该问题, 笔者提出一种复杂度低, 但比文献[6]中算法性能优越的三对角分解线性检测算法.

1 多用户检测系统模型

考虑1个用户数为 K 的同步二进制 DS-CDMA 基带通信系统, 假设各用户时延都为 0, 则接收数据 $r(t)$ 的表达式如下:

$$r(t) = \sum_{k=1}^K A_k(t)s_k(t)b_k(t) + n(t), \quad (1)$$

其中, $A_k(t)$ 为第 k 个用户的信号幅度; $s_k(t)$ 为第 k 个用户信号的归一化扩频码; $b_k(t)$ 为第 k 个用户在时刻 t 发送的信息比特; $n(t)$ 为均值为 0, 方差为 σ^2 的加性高斯白噪声(AWGN). 经过匹配滤波器后, 第 k 个匹配滤波器的输出 $y_k(t)$ 可表示为:

收稿日期: 2009-03-26.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://3xb.nbu.edu.cn>

基金项目: 国家自然科学基金(60772126); 宁波市自然科学基金(2006A610002).

第一作者: 胡观华(1983-), 男, 浙江丽水人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 多用户通信信号处理. E-mail: hu_1106hua@163.com

*通讯作者: 李有明(1963-), 男, 陕西扶风人, 博士生导师/教授, 主要研究方向: 宽带接入技术. E-mail: liyouming@nbu.edu.cn

$$y_k(t) = \int_0^{T_b} r(t)s_k(t)dt = A_k b_k + \sum_{j=1, j \neq k}^K A_j b_j \rho_{jk} + n_k = A_k b_k + MAI_k + n_k, \quad (2)$$

其中, 扩频码间的互相关系数:

$$\rho_{jk} \leq s_j, s_k \geq \int_0^{T_b} s_j(t)s_k(t)dt. \quad (3)$$

当 $j=k$ 时, $\rho_{jj}=1$. 当 $j \neq k$ 时, $0 < \rho_{jk} < 1$. (2)式中, $A_k b_k$ 为第 k 个用户的期望信号; MAI_k 为第 k 个用户与其他用户互相关造成的多址干扰; n_k 为加性高斯白噪声. 匹配滤波器的输出写成向量的形式 $y = [y_1, y_2, \dots, y_K]^T$, 则:

$$Y = RAb + n, \quad (4)$$

其中, R 为归一化扩频码的互相关矩阵; A 是信号幅度对角阵; b 为用户信息比特, $b = [b_1, b_2, \dots, b_K]^T$; n 为噪声列向量, $n = [n_1, n_2, \dots, n_K]^T$.

解相关检测算法的原理为将扩频码互相关矩阵的逆 $L_{dec} = R^{-1}$ 乘以匹配滤波器的输出, 再对输出进行判决:

$$\hat{b}_{dec} = \text{sgn}(R^{-1}y) = \text{sgn}(Ab + \hat{n}), \quad (5)$$

其中, $\hat{n} = R^{-1}n$ 是均值为 0, 协方差矩阵为 $\sigma^2 R^{-1}$ 的噪声列向量.

2 低复杂度解相关检测算法

2.1 一对角分解检测算法

通常情况下扩频序列具有较大的自相关系数、较小的互相关系数, 因此其相关矩阵为对角占优矩阵. 文献[6]基于扩频序列相关矩阵的性质, 利用对角占优矩阵求逆逼近理论, 提出了低复杂度的线性多级检测算法. 其将相关矩阵 R 分解如下:

$$R = I + E, \quad (6)$$

其中, I 为单位矩阵; E 为 $R - I$ 是矩阵 R 中除去对角元素剩余元素构成的矩阵. 则 R^{-1} 可表示为:

$$R^{-1} \approx \hat{R}^{-1} = I - E + \dots + (-1)^N E^N. \quad (7)$$

该检测器的输出表达式为:

$$\hat{b}_{lms} = \text{sgn}(y - Ey + \dots + (-1)^N E^N y). \quad (8)$$

可记该算法的一级检测器为一对角分解检测

器 $L_{tod} = I - E$.

由以上分析可以看出, 当逼近阶数较高时, 线性多级检测算法性能接近与常规解相关检测算法. 然而在实际中, 受复杂度的限制, 一般采用一阶逼近算法. 该算法的一阶逼近与传统解相关算法相比虽然复杂度大大降低, 但性能下降比较明显. 针对这一问题, 笔者提出一种复杂度低, 但检测性能良好的三对角分解检测算法.

2.2 笔者提出的三对角分解检测算法

将相关矩阵 R 分解为 1 个三对角矩阵及其剩余元素的形式:

$$R = D_{\text{III}} + E_{\text{III}}, \quad (9)$$

其中,

$$D_{\text{III}} = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_{23} & \alpha_{33} & \ddots & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \ddots & \ddots & \ddots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & \alpha_{(K-1)(K-1)} & \alpha_{(K-1)K} \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \alpha_{K(K-1)} & \alpha_{KK} \end{pmatrix}, \quad (10)$$

$$E_{\text{III}} = R - D_{\text{III}}. \quad (11)$$

由于相关矩阵 R 为对角占优矩阵, 则:

$$R^{-1} = (I - D_{\text{III}}^{-1}E_{\text{III}} + (D_{\text{III}}^{-1}E_{\text{III}})^2 + \dots + (-1)^n (D_{\text{III}}^{-1}E_{\text{III}})^n + \dots) D_{\text{III}}^{-1}, \quad (12)$$

R^{-1} 的一阶逼近为:

$$L_{\text{tod}} = (I - D_{\text{III}}^{-1}E_{\text{III}}) D_{\text{III}}^{-1}, \quad (13)$$

因此称 L_{tod} 为三对角分解检测器.

检测器的输出表达式为:

$$\hat{b}_{\text{tod}} = \text{sgn}(L_{\text{tod}} y). \quad (14)$$

2.3 三对角逆的快速实现算法

由(12)式可以看出, 三对角分解检测算法主要涉及三对角矩阵 D_{III} 的逆 D_{III}^{-1} 的计算. 由相关矩阵的性质可知, D_{III} 为对称矩阵.

采用 Doolittle 分解, 可以将 D_{III} 分解为 1 个上三角矩阵和 1 个下三角矩阵乘积的形式:

$$D_{\text{III}} = LU. \quad (15)$$

记 $U = D\hat{U}$, 则 $D_{\text{III}} = LD\hat{U}$, 其中, D 为 1 对

分别为三对角分解方法和其快速实现方法针对用户 1 误码率与信噪比之间的关系曲线. 从图 2 可以看出, 三对角快速实现接近于三对角分解.

表 1 矩阵 L 的系数表

	1	2	3	4	5
1	1.000	0	0	0	0
2	-0.032	1.000	0	0	0
3	0	-0.097	1.000	0	0
4	0	0	-0.033	1.000	0
5	0	0	0	-0.032	1.000

表 2 矩阵 L^{-1} 的逆系数表

	1	2	3	4	5
1	1.000	0	0	0	0
2	0.032	1.000	0	0	0
3	0.003	0.097	1.000	0	0
4	0.000	0.003	0.033	1.000	0
5	0.000	0.000	0.001	0.032	1.000

4 总结

基于相关矩阵对角占优性提出了一种低复杂度的线性多用户检测算法, 该算法克服了线性解

相关算法高复杂度的矩阵求逆问题, 与线性解相关算法相比复杂度大大降低, 而性能良好.

参考文献:

- [1] Verdu S. Minimum probability of error for asynchronous Gaussian multiple-access channels[J]. IEEE Trans Inform Theory, 1986, 32(1):85-96
- [2] 张东红, 廖桂生. 判决排序的解相关判决反馈多用户检测器[J]. 北京邮电大学学报, 2008, 31(2):104-107.
- [3] Liu T H. Decision-feedback multiuser detection with orthogonal feedforward transformation[J]. IEEE trans on Vehicular Technology, 2004, 53(5):1 370-1 378.
- [4] Michael L, Honig, Woodward G K. Adaptive iterative multiuser decision feedback detection[J]. IEEE trans on Wireless Communications, 2004, 3(2):477-485.
- [5] 史双宁, 尚勇, 梁庆林. 一种新的线性多用户检测器[J]. 电子学报, 2007, 35(3):426-429.
- [6] 仲文, 程时昕. 线性多级多用户检测器及其性能分析[J]. 东南大学学报, 1998, 28(6):11-16.
- [7] Horn R A, Jotmson C R. Matrix analysis[M]. London: Cambridge University Press, 1985.
- [8] 李有明, 王让定, 沈微, 等. 基于矩阵三对角分解的快速串音抑制算法[J]. 通信学报, 2008(3):10-15.

A Low Complexity Multi-user Detection Algorithm in DS-CDMA System

HU Guan-hua^{1,2}, LI You-ming^{1,2*}

(1. Faculty of Information Science and Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. Institute of Communication Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In order to reduce the computational complexity of conventional decorrelating multi-user detection algorithm, we propose a lower complexity tri-diagonal linear detection algorithm based on the diagonal dominance property of correlation matrix. In the algorithm, the correlation matrix is first split into a tri-diagonal matrix and matrix with residual elements, the inversion of correlation matrix can then be obtained by approximating it to the special matrix multiplication. Compared with the conventional decorrelating multi-user detection algorithm, the proposed algorithm has much lower complexity while maintaining a good performance. The efficiency of the presented algorithm is verified by the computer simulation results.

Key words: multi-user detection; multi-user interference; decorrelating diagonal dominance; linear detection

CLC number: TN92

Document code: A

(责任编辑 章践立)