

一种新的线性多用户检测器

史双宁, 尚 勇, 梁庆林

(北京大学电子学系卫星与无线通信实验室, 北京 100871)

摘 要: 量子信号处理是一种基于量子检测原理的信号处理框架. 本文通过借鉴量子信号处理的思想, 给出了一种新的线性多用户检测器: 加权正交匹配滤波检测器. 理论分析和仿真结果表明: 新检测器只需要多用户系统中的扩频码已知, 就可以在不同的工作环境下, 通过灵活调整影响因子, 分别实现与解相关检测器、匹配滤波检测器相同的性能; 且新检测器的最佳性能与线性最小均方误差检测器的性能接近.

关键词: 多用户检测; 量子信号处理

中图分类号: TN911.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2007)03-0426-04

A Novel Linear Multi-User Detector

SHI Shuang-ning, SHANG Yong, LIANG Qing-lin

(Satellite and Wireless Communication Lab, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Quantum Signal Processing is a framework based on the principle of quantum detection. Weighed Orthogonal Matched Filter Detector which is considered as a novel linear multi user detector is presented by using the ideas from quantum signal processing. Through adjusting impact factors under various environments, not only can the new detector achieve the same performance as the decorrelator and the matched filter with the same knowledge about the PN codes in multi user system, it also can approximate the performance of linear MMSE detector.

Key words: multi user detection; QSP(quantum signal processing)

1 引言

在第三代移动通信中, 以码分多址(CDMA)作为主要的多址接入方式获得了广泛的认可. 不过在CDMA通信系统中, 由于多个用户的随机接入, 且所使用的扩频码集一般并非严格正交, 因此用户码片之间的非零互相关值将引起用户间的干扰, 这样会严重限制系统的容量. 因此对于CDMA这样一个干扰限制的系统, 研究干扰抑制及多用户检测^[1]将非常有意义, 对多址干扰进行抑制以及有效的多用户检测将意味着系统容量的直接提高.

本文借鉴了量子信号处理^[2](Quantum Signal Processing: QSP)的思想, 给出了一种新的线性多用户检测器: 加权正交匹配滤波检测器(Weighed Orthogonal Matched Filter: WOMF). 新检测器无需估计噪声功率, 只需已知系统用户的扩频码, 就可以实现与解相关检测器相同或稍好的性能, 较线性最小均方误差(Minimum Mean Square Error: MMSE)检测器的性能稍差.

文章包括以下几部分: 首先给出多用户检测的系统模型; 接下来介绍新检测器的物理原理及其数学表述; 然后对新检测器的性能给出仿真分析, 最后是本文的结论.

2 多用户检测系统模型^[3]

研究一条同时被 K 个用户分享的信道, 每个用户分配到一个持续时间为 T 的扩频码 $p_k(t)$, 所有 K 个扩频码具有单位能量, 用户发送信息用 $b_k(m)$ 表示, 取值为 ± 1 . 考虑同步传输的情况下, 并假设发送信号受到加性高斯白噪声的影响, 那么接收信号经过匹配滤波器的输出并离散采样后得到的 $y_k(i)$ 如下所示:

$$y_k(i) = z_k b_i(i) + \sum_{j=1, j \neq k}^K z_j b_j(i) \vartheta_k + n_k \quad (1)$$

式中 z_k 为发送信号幅度, ϑ_k 是第 j 个用户与第 k 个用户扩频码之间的互相关值, 写为

$$\vartheta_k = \int_0^T p_j(t) p_k(t) dt,$$

$$n_k = \sigma \int_0^T n(t) p_k(t) dt$$

表示为一高斯随机过程, 其均值为零, 方差等于 σ^2 . 令

$$\mathbf{P} = [\mathbf{p}_1^T(t), \dots, \mathbf{p}_K^T(t)]^T,$$

$$\mathbf{Z} = \text{diag}[z_1, \dots, z_K], \mathbf{R} = E\{\mathbf{P}^* \mathbf{P}^T\} = [\theta_{kj}]_{j,k=1}^K$$

则式的向量表示形式:

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

且 $E\{\mathbf{n}\mathbf{n}^T\} = \sigma^2 \mathbf{R}$, 其中

$$\mathbf{y} = [y_1, \dots, y_K]^T$$

$$\mathbf{b} = [b_1, \dots, b_K]^T \text{ 和 } \mathbf{n} = [n_1, \dots, n_K]^T.$$

以上给出就是常用的多用户检测系统模型.

3 新的线性多用户检测器

根据上文可知, 干扰是多用户检测面临的主要问题; 同时, 贯穿检测始终的噪声也是需要克服的. 因此综合来看, 寻找优秀检测器 Υ 的过程, 就是寻找可以对干扰和噪声能够同时很好抑制, 即期望用户的输出信噪比最大的过程.

不失一般性, 假设用户一为期望用户, 它的扩频码为 $\mathbf{p}_1(t)$. 我们知道, 如果信道是白噪声背景的, 那么匹配滤波检测可以得到最佳的信噪比输出. 因此, 如果优秀检测 Υ 器中期望用户的检测向量 $\mathbf{g}_1(t)$ 与期望用户的扩频码 $\mathbf{p}_1(t)$ 相同, 或者在某种约束下相近, 那么期望用户就可以获得较好的信噪比输出. 同样, 对其他用户检测时, 优秀检测器 Υ 应该有同样的要求, 即: 所有用户的检测向量 $\{\mathbf{g}_k(t), k=1, 2, \dots, K\}$ 与用户本身的扩频码 $\{\mathbf{p}_k(t), k=1, 2, \dots, K\}$ 相同, 或者在某种约束下相近; 那么所有用户都会获得较好的信噪比输出.

不过, 如果系统中存在干扰, 那么匹配滤波检测器就不再是最佳的检测输出了, 因此, 我们希望优秀检测器 Υ 在顾及信噪比的同时, 还要对信干比有足够的重视. 那么, 这就意味着优秀检测器的 Υ 检测向量 $\mathbf{g}_1(t)$ 在与期望用户的扩频码 $\mathbf{p}_1(t)$ 相近的同时, 与干扰用户的扩频码 $\{\mathbf{p}_k(t), k=2, \dots, K\}$ 应该尽可能正交; 考虑到上文所有用户的检测向量 $\{\mathbf{g}_k(t), k=1, 2, \dots, K\}$ 与本身的扩频码 $\{\mathbf{p}_k(t), k=1, 2, \dots, K\}$ 在某种约束下相近的要求, 那么, 期望用户的检测向量 $\mathbf{g}_1(t)$ 与干扰用户的扩频码 $\{\mathbf{p}_k(t), k=2, \dots, K\}$ 尽可能正交, 可以近似等价: 期望用户的检测向量 $\{\mathbf{g}_k(t), k=2, \dots, k\}$ 与其它干扰用户的检测向量尽可能正交; 这样, 可以使得期望用户有好的信干比输出.

综合以上要求, 且对约束具体化, 同时借鉴量子信号处理中正交检测^[4]的思想, 那么期待的优秀检测器 Υ 可以整理为以下数学表述:

给定一组扩频码 $\{\mathbf{p}_k(t), k=1, 2, \dots, K\}$, 要求在此扩频码向量组的基础上, 寻找一组检测向量 $\{\mathbf{g}_k(t), k$

$= 1, 2, \dots, k\}$, 使得检测向量满足彼此正交, 即 $\langle \mathbf{g}_i, \mathbf{g}_j \rangle = c^2 \delta_{ij}$, 其中 c 为常数; 同时, 令检测向量与扩频码的差值平方输出最小, 即

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^K \langle \mathbf{p}_i(t) - \mathbf{g}_i(t), \mathbf{p}_i(t) - \mathbf{g}_i(t) \rangle$$

最小; 再进一步, 针对不同用户引入不同的影响因子 $\{f_k, k=1, 2, \dots, K\}$, 满足 $f_1 + f_2 + \dots + f_K = 1$. 那么, 综合所有要求, 待求向量组 $\{\mathbf{g}_k(t), k=1, 2, \dots, K\}$ 应使下式取得最小值:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^K f_i \langle \mathbf{p}_i(t) - \mathbf{g}_i(t), \mathbf{p}_i(t) - \mathbf{g}_i(t) \rangle \quad (3)$$

同时, 满足约束:

$$\langle \mathbf{g}_i(t), \mathbf{g}_j(t) \rangle = c^2 \delta_{ij} \quad (4)$$

其中, c 为大于零的常数.

求解式(3), 得到:

$$\mathbf{G} = c^* \mathbf{P} \mathbf{F} \left((\mathbf{F} \mathbf{P}^* \mathbf{P} \mathbf{F})^{1/2} \right)^{\dagger} \quad (5)$$

其中 $(\cdot)^{\dagger}$ 表示 (\cdot) 的 Moore-Penrose 广义逆矩阵, \mathbf{F} 是由常数 f_i 组成的对角阵 $\mathbf{F} = \text{diag}(f_1, f_2, \dots, f_K)$.

式(5)给出的检测器是满足优秀检测器 Υ 要求的一种检测器, 本文称之为 WOMF 检测器.

由式得到, WOMF 检测器的性能随着影响因子的变化而变化. 例如: 如果 K 个用户的影响因子全部相等, 那么式中每一个用户对 ε 的贡献都是相同的. 不失一般性, 假设用户一为期望用户, 如果它的影响因子 f_1 接近于 1, 同时, 其它用户的影响因子 $\{f_k, k=2, \dots, K\}$ 相等, 那么在最小化式的求解过程中, 用户一对应的检测向量 $\mathbf{g}_1(t)$ 相对于其它用户对应的检测向量 $\{\mathbf{g}_k(t), k=2, \dots, K\}$ 会更接近其扩频码 $\mathbf{p}_1(t)$; 也就是新检测器与匹配滤波检测器很接近, 因此, 期望用户分支可以得到好的信噪比. 同样的道理, 如果用户一的影响因子 f_1 接近于 0, 其它用户的影响因子 $\{f_k, k=2, \dots, K\}$ 相等, 那么, 其它用户的检测向量 $\{\mathbf{g}_k(t), k=2, \dots, K\}$ 相对于用户一的检测向量 $\mathbf{g}_1(t)$ 会更接近其扩频码 $\{\mathbf{p}_k(t), k=2, \dots, K\}$; 同时, 因为约束式, 所以用户一对应的检测向量 $\mathbf{g}_1(t)$ 就与其它用户的扩频码 $\{\mathbf{p}_k(t), k=2, \dots, K\}$ 接近正交; 即能够得到好的信干比.

总之, 新的多用户检测器通过灵活的配置影响因子, 努力的平衡干扰和噪声对信号的影响, 从而尽可能的实现某工作环境下的最佳信干噪比输出. 且当期望用户的影响因子接近于 1 时, 新检测器与匹配滤波检测器无限接近; 当期望用户的影响因子接近于 0 时, 新检测器与解相关检测器类似.

4 仿真结果

现在对本文中所提出的新的多用户检测器性能进行验证并给出仿真结果.

仿真 1 假设在加性高斯白噪声信道下, 系统中存在两个用户, 发射功率相同; 期望用户的影响因子为 f_1 , 干扰用户的影响因子 $f_2 = 1 - f_1$; 图 1 给出的是两用户扩频码的互相关值 ρ 在 0.5 上下 (0.4~0.6) 时一次仿真得到的四种检测器的误码率曲线; 四种检测器分别为: 匹配滤波检测器、解相关检测器、线性 MMSE 检测器和本文提出的加权正交匹配检测器. 图 2 给出的是两用户扩频码间的互相关值 ρ 在 0.7 上下 (0.6~0.8) 时一次仿真得到的误码率曲线, 即两用户扩频码间存在很大相关性时的情况. 如图 1、图 2:

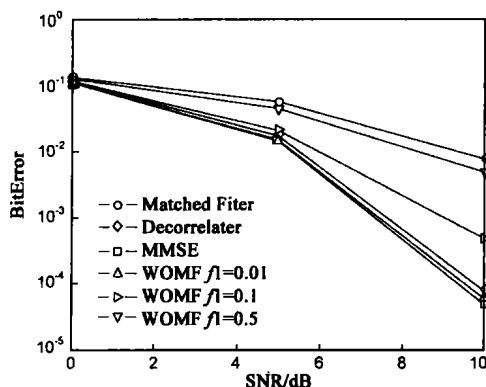


图 1 2 用户扩频码互相关值较大时的误码率

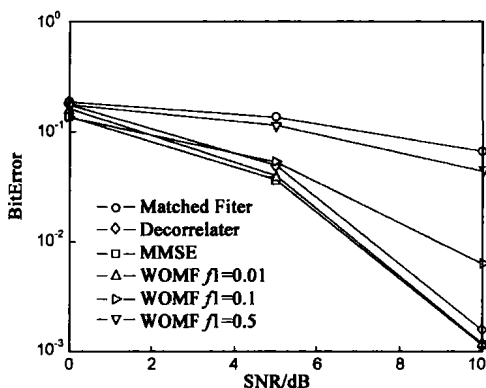


图 2 2 用户扩频码互相关值很大时的误码率

根据图 1 和图 2 可知: 期望用户影响因子为 0.1 的 WOMF 检测器的误码率曲线, 无论用户扩频码间互相关值的大小, 性能与线性 MMSE 检测器的输出性能非常接近; 还可以看到, 随着期望用户的影响因子变大, WOMF 检测器输出的误码率性能经历了从解相关检测器向匹配滤波检测器的误码率性能渐进的过程, 这说明随着影响因子的变化, WOMF 检测器可以得到与解相关检测器和匹配滤波检测器相同的性能, 这符合上文的分析.

图 2 中期望用户影响因子等于 0.1 时的性能要好于解相关检测器的性能, 这是因为在低信噪比、两个用户间扩频码的互相关值又很大的工作情况下, WOMF 检测器在争取信噪比输出较大的同时, 也努力实现信干

比较大的输出, 所以性能会稍好于只关注信干比的解相关检测器. 不过由于 WOMF 检测器对检测向量之间的约束为彼此正交, 失去了检测向量间彼此关系的灵活性, 因此会差于线性 MMSE 检测器的性能.

同时, 我们可以发现期望用户影响因子等于 0.1 和 0.5 时的两条性能曲线在 2dB 附近有交叉, 这说明了低信噪比时, 期望信号影响因子为 0.5 的情况能够得到更大的信噪比, 从而克服以噪声为主的干扰.

仿真 2 假设在加性高斯白噪声信道下, 系统中存在 5 个用户, 发射功率相同; 期望信号分配到的影响因子为 f_1 , 干扰信号的影响因子 $f_i = [(1 - f_1)/4]$; 图 3 给出的是 5 个用户扩频码之间互相关值 ρ 在 0.5 上下 (0.4~0.6) 时一次仿真得到的四种检测器的误码率曲线; 图 4 给出的是 5 个用户间扩频码的互相关值 ρ 在 0.7 上下 (0.6~0.8) 时一次仿真得到的误码率曲线. 如图 3、图 4:

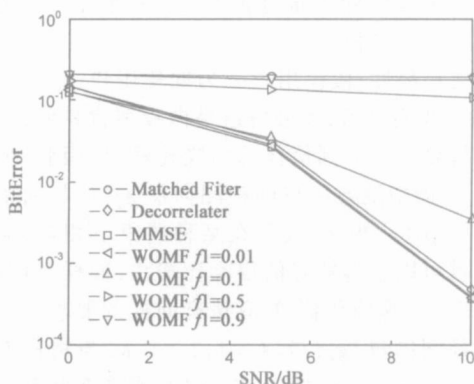


图 3 5 用户扩频码互相关值较大时的误码率

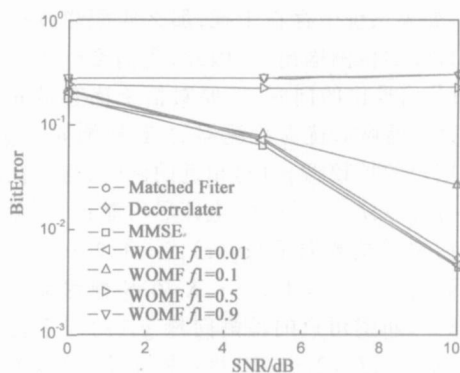


图 4 5 用户扩频码互相关值很大时的误码率

仿真 2 相对于仿真 1 来说, 只是系统用户增多, 其它的环境参数不变, 由仿真 1 可知: 2 个系统用户时期望信号的影响因子为 0.1 时, 相对于解相关检测器, WOMF 检测器的性能很稳定, 并且稍好; 可是在 5 个系统用户的情况下, 如图 3 所示, 同样的影响因子为 0.1 的 WOMF 检测器性能下降明显. 再次降低期望用户影响因子至 0.01, 这意味着更小的信噪比, 更大的信干

比,发现 WOMF 检测器的性能再次接近解相关检测器。由此可知:在系统用户很多的情况下,WOMF 检测器对干扰用户的抑制需要更小的影响因子,才能得到更低的误码率输出;这与此环境下干扰用户对期望用户的影响占主要地位的客观情况一致。

图4与图2的结果类似,期望用户影响因子等于0.01和0.1时的两条性能曲线在3dB附近有交叉,这是在噪声大小不同的情况下信干比与信噪比折衷的体现。

5 结论

本文提出了一种新的多用户检测器:WOMF 检测器。新检测器通过灵活调整影响因子,实现对噪声或干扰的抑制达到最大,或者对噪声和干扰两者总的抑制效果最好,进而得到好的输出性能。但是因为 WOMF 检测器对检测向量之间的约束为彼此正交,也失去了检测向量间彼此关系的灵活性,因此与线性 MMSE 检测器相比略差。但不需要对噪声功率提前预估是 WOMF 检测器相对于线性 MMSE 检测器的优势。当然,本文只考虑了所有信号等功率的情况,因此干扰信号的影响因子的分配是平均分配的。对功率不相同的多用户系统以及非平均分配影响因子方面的内容,需要进一步的研究。

参考文献:

- [1] Verdu S. Multiuser Detection[M]. London: Cambridge University Press, 1981.
- [2] Yonina C Eldar, Alan V Oppenheim. Quantum signal processing [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2002, 19(6):12-32.
- [3] 张贤达, 保铮, 通信信号处理[M]. 长沙: 国防工业出版社, 2000.

Zhang Xianda, Bao Zheng, Communication Signal Processing [M]. Changsha: National Defence Industry Press, 2000. (in Chinese)

- [4] Yonina C Eldar, Alan V Oppenheim. Orthogonal matched filter detection [C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Salt Lake City, 2001, 5: 2837-2840.

作者简介:



史双宁 男, 1980年9月出生于河北省滦平县, 2001年毕业于西安电子科技大学通信工程学院, 获学士学位; 其后在北京大学电子学系卫星与无线通信实验室攻读博士研究生至今。主要从事量子信号处理、多用户检测和波束成形技术方向的研究。Email: shsnsh@pku.edu.cn



尚 勇 男, 1970年12月出生于陕西省西安市, 2000年于西安电子科技大学获得工学博士学位; 现为北京大学信息科学技术学院副教授, 研究方向和兴趣: 通信信号处理和雷达信号处理。



梁庆林 男, 1941年2月生于河北省青龙县, 北京大学电子学系教授、博导, 中国电子学会高级会员, 主要从事扩展频谱技术和数字通信技术等方面的研究工作。