

一种新型的多用户检测算法

屈炳云, 焦李成

(西安电子科技大学雷达信号重点实验室, 西安 710071)

摘 要: 本文提出一种新的多用户检测算法, 它将阵列处理方法和多普勒信息相结合, 在空-时域将期望信号滤除, 然后利用扩频码的“隐阵列”特性进行多用户检测. 理论分析和仿真结果表明该方法收敛速度快, 具有很强的抗多址干扰能力.

关键词: 阵列天线; 多普勒信息; 多用检测; 正交投影

中图分类号: TN925.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 11A-0023-03

A Novel Multi-user Detection Algorithm

QU Bing-yun, JIAO Li-cheng

(National Key Lab. of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: In this paper, a novel multi user detection algorithm is proposed. With “shadowed array” property of spread code, the algorithm takes effect after desired signal is filtered based on array antenna and Doppler information in spatiotemporal area. Theoretical analysis and simulation results show that the approach has fast convergence and very strong far near resistance.

Key words: array antenna; Doppler information multi user detection; orthonormal projection

1 引言

与 TDMA、FDMA 相比, CDMA 具有容量大, 抗多径衰落能力强, 频带利用率高, 软容量等优点, 已经受到人们越来越多的重视. 但是, 用户信号在时域和频域都是重叠的, 非正交的扩频序列产生的多址干扰随用户数显著增加, 尤其是在远近效应的影响下, 系统容量明显受限于多址干扰^[1~3].

传统阵列天线通过对阵列信号加权, 在特定方向形成高增益主瓣, 在其他方向形成低增益副瓣, 具有一定的抗干扰能力. 但是, 因为 M 维的权矢量张成的子空间只与 $M-1$ 维子空间正交, 因而只能滤除 $M-1$ 路干扰信号. 因此, 阵列天线难以直接用于抗多址干扰.

多用户检测技术将干扰用户信号和噪声信号区别处理, 能够较好地抑制多址干扰, 提高系统容量. 在本文中, 利用扩频码的“隐阵列”特性, 将阵列处理的波束形成概念推广到多用户检测中. 也就是说, 将每一条扩频序列作为对应用户的期望信号方向矢量, 而扩频序列长度则等于天线数, 同时期望用户的信号方向总是已知的.

在线性约束最小方差准则(LCMV)算法中, 输入相关矩阵中含有期望信号将大大降低系统性能. 本文利用阵列处理和多普勒滤波去除期望信号, 可以极大地提高系统的收敛速度和输出信干比. 理论分析和仿真结果都表明该方法是有效可行的.

2 阵列信号波束形成

2.1 信号模型

阵列接收信号 $X(t)$ 是 K 个用户的叠加

$$X(t) = \sum_{k=0}^{K-1} a(\theta_k) s_k(t) + n(t) \quad (1)$$

式中: $a(\theta_k) = [1, e^{j\frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta_k}, \dots, e^{j(M-1)\frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta_k}]^T$ 是 K 个用户的信号方向矢量, 其中 d 是阵元间距, θ 是波达方向, M 是阵元数, λ 是中心波长, $n(t)$ 表示单位功率密度的白噪声, $s_k(t)$ 是用户信号波形, 可表示为:

$$s_k(t) = A_k \sum_{i=-M}^M b_k(i) c_k(t - iT - \tau_k) \quad (2)$$

其中: A_k , τ_k 和 $b_k(i)$; $i = 0, \pm 1, \dots, \pm M$, $\{c_k(t); 0 \leq t \leq T\}$ 分别表示接收幅度、延迟、码元流和 K 个用户的扩频序列; $2M+1$ 是每个用户码元的数据量; T 是码元区间.

2.2 优化准则

在阵列信号自适应波束形成中, 常用线性约束最小方差准则(LCMV),

$$\begin{cases} \min_w w^H R_x w \\ \text{s. t. } w^H a(\theta_0) = 1 \end{cases} \quad (3)$$

其中: R_x 表示阵列相关矩阵, 一般是通过有限快拍得到的最大似然估计, 即 $R_x = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K X(t_i) X^H(t_i)$. 求解式(3), 可以得

$$W_{LCMV} = \mu R_x^{-1} a(\theta_0) \quad (4)$$

其中: $\mu = 1/a(\theta_0)^H R_x^{-1} a(\theta_0)$ 是常数; $a(\theta_0)$ 是期望用户方向矢量。可以看到, W_{LCMV} 是维纳滤波中预白化匹配滤波。

相关矩阵可以通过递推更新得到, 即 $R_X(n) = \sum_{i=1}^{n-1} \lambda^{n-i} X(i)^H X(i) + X(n)^H X(n)$ 。其中, λ 是遗忘系数, 一般取值在 0.95~0.9995。这样对时间较近的数据赋予更大的权值, 从而加强对非平稳信号的适应性。但是, R_X 求逆的运算量非常大, 难以实时实现, 因而需要寻找一种迭代的方法来更新 R_X^{-1} 。基于矩阵求逆引理, 可得到如下的逆矩阵的递推方法。该方法便于用脉动阵实现, 提高了算法的实时性。

$$R_X^{-1}(n) = \frac{1}{\lambda} \left[R_X^{-1}(n-1) - \frac{R_X^{-1}(n-1) X(n)^H X(n) R_X^{-1}(n-1)}{\lambda + X(n) R_X^{-1}(n-1) X(n)^H} \right] \quad (5)$$

在理想情况下, LCMV 准则可以在保证期望信号方向增益一定的情况下, 使得阵列输出功率最小, 因而可以自适应地在干扰方向置零以抑制干扰。但是, 因为系统误差和有限快拍等因素, 当期望信号包含在相关矩阵 R 中, 预白化处理往往会引起信号对消, 导致 SINR 下降。由于期望用户的扩频码是已知的, 相当于阵列导向矢量精确已知, 所以只讨论有限快拍的影响^[4]。

假设输入数据服从独立同分布的正态分布, 相关矩阵不含期望信号, 可以得到归一化输出 SINR 服从 β 分布, 即

$$\rho \triangleq \text{SINR}_0 / \text{SINR}_{\max} \quad (6)$$

其中, 有限快拍输出 SINR

$$\text{SINR}_0 = \frac{\pi_s |W_{LCMV}^H a(\theta_0)|^2}{W_{LCMV}^H R_{ii} W_{LCMV}} \quad (7)$$

无穷快拍最大输出 SINR

$$\text{SINR}_{\max} = \pi_s a^H(\theta_0) R_{ii}^{-1} a(\theta_0) \quad (8)$$

R_{ii} 是噪声和干扰相关矩阵。 ρ 的密度函数是

$$f(\rho) = \frac{NK!}{(N-2)! (K+1-N)!} (1-\rho)^{N-2} \rho^{K+1-N} \quad (9)$$

均值为

$$E(\rho) = (K+2-N)/(K+1) \quad (10)$$

由上式可以看到, 当 $K = 2N-1$ 时, $E(\rho) = 1/2$, 即当快拍数大于 $2N-3$ 时, 输出 SINR 损失小于 $1/2$ 。当相关矩阵含有期望信号时, 可以得到

$$\eta = \frac{\text{SINR}_0}{\text{SINR}_{\max}} = \frac{\rho}{\text{SINR}_{\max}(1-\rho) + 1} < \rho \quad (11)$$

可以看到, 期望信号存在时的输出 SINR 小于没有期望信号时的情况, 且当输入信噪比越大, 两者之间的差别越大。

假设存在较强单干扰信号时, 可以得到输出 SINR 为^[5,6]

$$\text{SINR}_0 = \frac{\text{SINR}_{\max} \cdot K}{K + (N-1) \cdot \text{SINR}_{\max}} \quad (12)$$

其中, $\text{SINR}_{\max} \approx N \cdot \text{SINR}_i$ 。为使输出 SINR_0 损失小于 $1/2$, 所需快拍数:

$$K \geq N(N-1) \text{SINR}_i \quad (13)$$

由以上分析可知, 在有限快拍情况下, 当相关矩阵包含期望信号, 阵列输出信噪比下降, 收敛速度慢, 当期望信号较大时, 阵

列性能下降得更明显。

3 一种新的多用户检测方法

一般的空时多用户检测算法是通过阵列天线, 将波束尽可能对准期望信号, 同时抑制干扰信号, 从而提高多用户检测前的输入信干比。但是, 阵列天线数总是远远小于用户数, 信干比的提高是有限的, 而输入信干比的提高对 LCMV 算法还存在一定的负面影响。本文利用阵列天线和多普勒信息消除期望信号的影响, 得到较好的结果。

3.1 检测算法

(a) 空域滤波 阵列信号处理中, 存在许多滤除特定信号的方法, 本文使用简单有效的正交投影技术。假设期望方向矢量 $a(\theta_0)$ 已知, 可以得到投影矩阵 p_M 。输入阵列信号 X 在 $a(\theta_0)$ 张成的闭子空间 M 上的正交投影是

$$Y(t_0) = X(t_0)(I - p_M) = X(t_0)(I - a(\theta_0)(a(\theta_0)^H a(\theta_0))^{-1} a(\theta_0)^H) \quad (14)$$

其中: I 表示单位矩阵。这样, $X(t_0)$ 中含有 $a(\theta_0)$ 的信号将被滤除掉。取各用户方向矢量 $a(\theta_i)$ ($i = 0 \sim K-1$) 在 p_M 上正交投影的任一分量的实部, 得到滤除期望信号的输入 $y(t)$

$$y(t) = \sum_{k=1}^{K-1} A' s_k(t) + d_n(t) \quad (15)$$

(b) 时域滤波 高速运行的移动用户使得信道参数变化很快, 有时可能使得 $a(\theta_0)$ 的指向误差较大, 影响系统性能。但是, 该用户的多普勒特征同时也会比较明显, 且实际系统的时域误差一般小于空域误差。本文利用期望信号的多普勒信息在时域滤除期望信号, 进一步提高系统的输出信干噪比。假定移动用户以径向速度 v 相对基站匀速运行, 基站接收到信号可以表示为

$$X(t) = a(\theta_0) s_0(t) \cos(\omega t + 2\pi f_0 t + \phi) + e(t) + n(t) \quad (16)$$

其中: $f_0 = v/\lambda$ 为多普勒频移; ω 是载频; $e(t)$ 表示 $K-1$ 个干扰用户的叠加。本文应用经典的自适应滤波器组成的陷波器滤除包含 f_0 的期望信号^[7]。与固定陷波器相比, 自适应陷波器可以跟踪变化的多普勒频移, 且容易控制带宽。同时, 使用诸如子波自适应滤波器来进一步提高系统性能, 有可能得到更好的时域滤波收敛速度和陷波性能。

(c) LCMV 准则 利用扩频码的“隐阵列”特性, 通过等价于期望信号方向矢量的期望用户扩频码, 可以得到新的权矢量 W_{LCMV} :

$$W_{LCMV} = \mu R_y^{-1} c_0 \quad (17)$$

其中: R_y 是以扩频序列长度为周期截断而得到的相关矩阵, c_0 是期望用户扩频码。

3.2 抗远-近效应能力

对多用户检测器的普通性能测度是渐近多用户效率 (AME)^[3], 定义为

$$\eta_0 \triangleq \sup_{\sigma \rightarrow 0} \left\{ 0 \leq r \leq 1 \cdot \lim_{\sigma \rightarrow 0} p_0(\sigma) / Q(\sqrt{r} A \sigma) = 0 \right\} \quad (18)$$

其中: $Q(x) \triangleq (1/\sqrt{2\pi}) \int_x^\infty e^{-(x^2/2)} dx$ 。当背景噪声为零时, 可测得误差概率的指数衰减速率。当干扰用户的能量变化时, 相关性能测度 (抗远-近性能) 则是 AME 的下确界

$$\bar{\eta}_0 = \inf_{A_k \geq 0, k \neq 0} \{ \eta_0 \} \quad (19)$$

由式(3),可以得到 $W_{LCMV} s_0 = 1$ 、 $W_{LCMV} s_k = 0$ (干扰用户数 $k = 1 \sim K-1$). 此时检测器的输出端只包含期望信号和噪声信号,可以得到误比特率

$$p_0(\sigma) = Q \left(\frac{A_0 W_{LCMV}^H s_0}{\sigma \sqrt{W_{LCMV}^H W_{LCMV}}} \right) = Q \left(\frac{A_0}{\sigma \sqrt{W_{LCMV}^H W_{LCMV}}} \right) \quad (20)$$

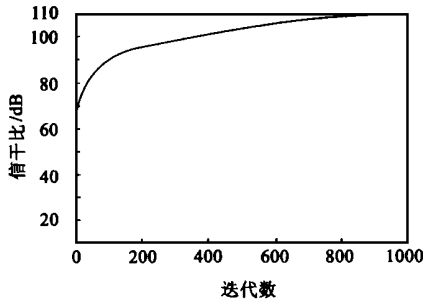


图1 $a(\theta_0)$ 指向正确时的
迭代数-信干噪比曲线

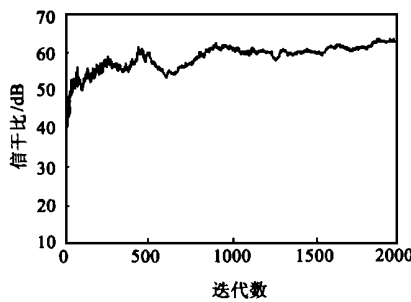


图2 $a(\theta_0)$ 指向有4度误差的
迭代数-信干噪比曲线

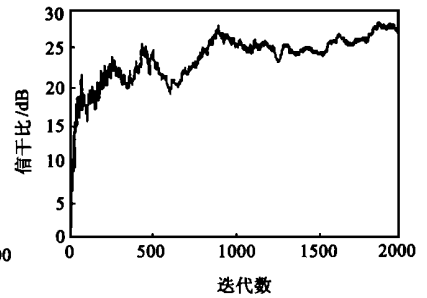


图3 未使用空域滤波的迭
代数-信干噪比曲线

3.3 仿真实例

实例1 假定同步 CDMA 系统,基带传输,码片速率采样,扩频码为 gold 序列,扩频增益 $N = 31$,阵列数 $M = 3$,期望用户幅值 A_0 ,波达方向 $\theta_0 = 60^\circ$,6个干扰用户,与期望用户的幅值比分别是: $A_i/A_0 = 10$ ($i = 1, 2$), $A_i/A_0 = 5$ ($i = 3, \dots, 6$),波达方向分别为 $\pm 30^\circ, \pm 80^\circ, \pm 10^\circ$. 性能度量是信干噪比,定义为 $\text{SINR} \triangleq 10 \log_{10} \frac{w^T R_s w}{w^T R_n w}$,其中 R_s 表示期望信号相关矩阵, R_n 表示干扰和噪声信号相关矩阵.

图1、2、3给出了迭代数-信干比曲线图.

实际系统的 $a(\theta_0)$ 指向总是存在一定误差,这样相关矩阵总是含有期望信号.由图2可知,系统性能有所下降,但在一定指向误差范围内,期望信号的影响较小,仍然可以得到较高的信干噪比.由图3可知,在没有使用空域滤波情况下,相关矩阵含有较强期望信号,系统性能进一步下降.

实例2 假设两用户接收波形分别是 $A_1 \cos(2\pi f_1 t)$ 和 $A_2 \cos(2\pi f_2 t)$,其中干扰信号多普勒频移 $f_1 = 100\text{Hz}$,期望信号多普勒频移 $f_2 = 110\text{Hz}$, $A_1 = A_2 = 2$,参考输入幅度 $C = 2/3$,步

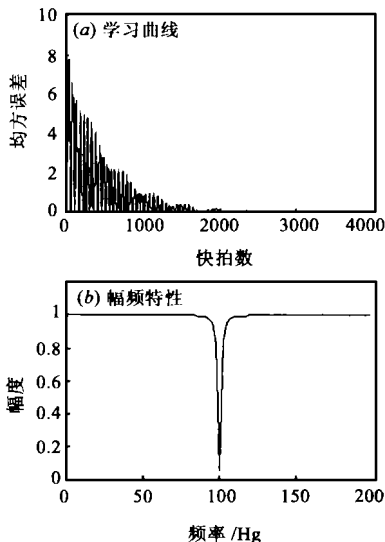


图4 自适应滤波器的幅频
特性曲线和学习曲线

这样, $\eta_0 = \bar{\eta}_0 = 1 / \sqrt{W_{LCMV}^H W_{LCMV}} \neq 0$. 可以得出结论:本文的多用户检测器具有抗远-近效应能力.

从波束形成的角度来看,在理想情况下,由 LCMV 准则得到的 M 维权向量可以对 $M-1$ 路线性无关的干扰置零,这样干扰用户功率的强弱不影响接收机性能.也就是说,在天线数大于用户数的情况下,由 LCMV 准则得到的多用户检测器具有抗远-近效应能力.

长 $\eta = 0.001$, 采样频率 $f_s = 100f_1$.

从图4可以看到,自适应滤波器可以很好地滤除相当接近的干扰频率.

4 结论

本文提出了一种新型多用户检测技术,首先利用阵列处理方法消除了期望信号的影响,对于高速运动的移动用户,其方向矢量 $a(\theta_0)$ 的指向误差可能会较大.我们则利用其更为明显的多普勒特征进行空-时滤波,然后基于扩频码的“隐阵列”特性,本文将阵列处理波束形成的概念和方法推广到多用户检测中,得到了很高的输出信干噪比.理论分析和仿真试验都证明了该方法的正确性和有效性.

作者简介:



屈炳云 1975年生,现为西安电子科技大学硕士生,主要研究方向为智能信号处理等.

参考文献:

- [1] R. B. Ertel, et al. Overview of spatial channel models for antenna array communication system [J]. IEEE Personal Communications, February 1998, 5(1): 10-22.
- [2] R. A. Monzingo, T. W. Miller. Introduction to Adaptive Array [M]. John Wiley and Sons Inc., 1980.

(下转第31页)

个量(上面只给出了在已知 x 和 y 或 x 和 n 这两种情况下的解),这样就可以求得该区间内的平均分组发送率.

参考文献:

- [1] T. V. Lakshman and U. Madhow. The performance of TCP/IP for networks with high bandwidth delay products and random loss [J]. IEEE/ACM Trans. Networking, June, 1997, 5(3): 336– 350.
- [2] T. R. Henderson, E. Sahouria, S. McCanne and R. H. Katz. On improving the fairness of TCP congestion avoidance [A]. Proc. IEEE Globecom'98 [C], Sydney, Australia, November 1998.
- [3] J. Kulk. A stochastic model for TCP with random burst losses [WZ]. <http://minias.lcs.mit.edu/~jokulik/projects.html>, May 1999.
- [4] A. Legout and E. W. Biersack. Beyond TCP-Friendliness: A New Paradigm for End-to-end Congestion Control [WZ]. http://www.eurecom.fr/research/research_report_report_1999.html, Eurecom Technical Report, November 1999.
- [5] H. Balakrishnan, H. S. Rahul and S. Seshan. An integrated congestion management architecture for internet hosts [A]. Proc. ACM SIGCOMM'99, Cambridge [C], MA, September 1999.

作者简介:



朱 京 1977 年出生, 2000 年毕业于清华大学电子工程系, 获学士学位, 并直接攻读硕士学位, 主要研究方向: 无线数据网络中的差错恢复技术及流量控制技术, Internet 上的 QoS 保证.



牛志升 1985 年毕业于北方交通大学通信与控制系, 1989 年和 1992 年先后获得日本丰桥技术科学大学的硕士和博士学位. 1992~ 1994 年就职于日本富士通研究所, 1994 年回清华大学任教至今, 现为清华大学微波与数字通信国家重点实验室教授, 主要研究方向有: 通话务理论和排队论, ATM 网络流量控制技术, 无线 ATM 网络技术的研究. 现为 IEEE 高级会员, 电子学会高级会员, 中国运筹学会会员.

(上接第 25 页)

- [3] S. Verdú. "Multiuser Detection" Cambridge, UK: Cambridge Univ Press, 1998.
- [4] 张林让. 自适应阵列处理稳健方法研究 [D]. 西安电子科技大学博士论文, 1998.
- [5] L. Chang and C. C. Yeh. Performance of DMI and eigenspace based beamformers [J]. IEEE Trans. Antennas Propagat., 1992, 40(11): 1336

– 1347.

- [6] D. D. Feldman and L. J. Griffiths. A projection approach for robust adaptive beamforming [J]. IEEE Trans. Signal Processing, 1994, 42(4): 867 – 876.
- [7] 吴兆熊, 黄振兴, 黄顺吉. 数字信号处理(下册) [M]. 67– 71, 北京: 国防工业出版社, 1985.