

文章编号:1000-582X(2012)06-129-05

CDMA 移动通信系统中基于分组的 DBF-MUD

曾 浩, 郑 芳, 刘 玲

(重庆大学 通信工程学院, 重庆 400044)

摘 要:为抑制小区内同道干扰,提高系统性能,首先通过波达方向估计把一个小区内的多个用户分成若干组,每组用户一个 DBF 支路,主瓣对准该组的用户,零陷对准其他组的用户。权矢量与各组用户角度的平均值相对应。各支路 DBF 输出分别进行 MUD,消除组内各用户间的干扰。性能分析和仿真结果证明该方法简化了 DBF 权值求解,克服了用户空间非正交性,有效降低了系统的误码率。

关键词:干扰抑制;波束形成;多用户检测;移动通信系统;分组

中图分类号:TN911.7

文献标志码:A

Group-based DBF-MUD in CDMA mobile communication system

ZENG Hao, ZHENG Fang, LIU Ling

(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: For the CDMA wireless cellular communication system, a new methodology is proposed to combine digital beamforming (DBF) with multi-user detection (MUD) technology which harnesses the co-channel interference mitigation and obtains better performance. The proposed approach assigns all the users within a cell into separated groups according to their direction of arrival (DOA). Then, only one DBF branch is employed for a singular group so that the main lobe is steered to the desired users in the group and nulls are directed to the mobile stations in other group. Furthermore, inter-group interference is degraded by MUD following the DBF. The new strategy simplifies the weight vector calculation and solves the unorthogonal channel problem. Additionally, it decreases the bit error rate. The analysis and simulation illustrate the fruits of the new mechanism.

Key words: interference suppression; beamforming; multi-user detection; mobile communication system; group

在 CDMA 无线通信系统中,利用扩频码的正交性,完成多址接入。但当小区内用户数目较大时,存在“远近效应”^[1],仅使用多用户检测(MUD)技术检测用户难度很大。数字波束合成(DBF)技术利用不同信号空间正交性,从空域角度进行同道干扰抑制^[2-4],在工程实现中,可以将 DBF 与 MUD 技术结合起来,从空域和码域联合处理,完成多用户接入。

文献[5-7]中提出基于分组的方法 DBF-G-MUD,该方法首先对每个用户进行 DBF,然后把 DBF 输出按照权值相关性进行分组。虽然该方法减少了组外同道用户干扰,但也存在明显不足。一是由于每个用户采用一个 DBF 支路,在用户数量较大时,消耗大量资源,分组方式实现也过于复杂。二是由于 DBF 与 MUD 采用简单串联方式,无法克服 DBF 自身的

收稿日期:2011-12-01

基金项目:重庆市自然科学基金资助项目(2011BB2046)

作者简介:曾浩(1977-),男,重庆大学副教授,博士,主要从事无线通信和阵列信号处理方向研究,(Tel)13608308542;
(E-mail)haoz@cqu.edu.cn。

缺点。当多个用户处于相邻位置时,用户信道的正交性是无法保证的,从而导致 2 个后果:一是由于阵列天线本身的分辨率限制,无法在主瓣范围内对干扰信号形成有效零陷,从而影响了 DBF 性能;二是由于 DOA 估计误差的存在,相邻用户很容易造成“自零陷”效应,使得 DBF 完全失效。为解决上述问题,可以采用先分组后进行 DBF 的 G-DBF-MUD 方法,每组用户使用一个 DBF 支路,各支路 DBF 输出再通过 MUD,估计出组内各个用户的信号。另外,在分组策略上,新算法采用基于超分辨的 DOA 信息而不是方向矢量信息,更为简单和准确。

1 系统模型

考虑一个小区内有 I 个用户的 CDMA 系统上行链路。在用户端给小区内的每个用户分配一个唯一的 PN 码标识序列。基站接收端使用 M 阵元的均匀线阵,阵元间距为载波半波长。不考虑邻区干扰,且一个码片周期 T 内用户 DOA 不发生变化,基站天线阵列接收信号为

$$x(t) = \sum_{i=1}^I p_i c_i(t) s_i a_i + n(t), \quad (1)$$

其中: p_i 是第 i 个用户信号的强度,由发射功率和信道特性决定; $c_i(t)$ 是第 i 个用户的 PN 码标识序列; s_i 是第 i 个用户的信息比特符号; $n(t)$ 是阵列高斯热噪声矢量; 用户 i 的 DOA 为 θ_i , 对应的方向矢量 a_i 为

$$a_i = \begin{bmatrix} e^{-j\pi(\frac{M-1}{2})\cos\theta_i} \\ \vdots \\ e^{-j\pi(\frac{M-1}{2}-M)\cos\theta_i} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

DBF 的过程就是寻找一个最优权矢量,通过加权求和,抑制干扰信号。对于第 i 个用户,通过最小功率准则

$$\operatorname{argmin}_{w_i} w_i^H x \text{ subject to } w_i^H a_i = 1. \quad (3)$$

上述表达式中, DBF 对应的最优权矢量为^[8]

$$w_i = \mu \mathbf{R}^{-1} a_i, \quad (4)$$

其中

$$\mu = \frac{1}{a_i^H \mathbf{R}^{-1} a_i}. \quad (5)$$

由于接收信号协方差矩阵 \mathbf{R} 可以通过 K 个有限快拍进行估计,即

$$\mathbf{R} = \frac{1}{\sqrt{K}} \mathbf{X} \mathbf{X}^H, \quad (6)$$

数据矩阵 \mathbf{X} 为

$$\mathbf{X} = [x(1) \quad \cdots \quad x(K)]^T. \quad (7)$$

由此可见,只要确定了用户 i 的 DOA 值 θ_i , 就可以通过式(2)、(5)和(6)计算出式(4)。

不考虑 DBF 和分组,一个码片周期 T 内 MUD 的输入信号是用户扩频信号和噪声信号的叠加

$$y = \sum_{i=1}^I p_i c_i(t) s_i + n(t). \quad (8)$$

最优多用户联合检测是追求最小的估计误差^[9], 得到各用户信息比特 s_i 的估计值 \hat{s}_i , 即

$$\operatorname{argmax}_{\hat{s}} P \{s = \hat{s} \mid y(t), 0 < t < T\}, \quad (9)$$

其中 $s = [s_1 \quad \cdots \quad s_I]$ 为信息数据矢量, \hat{s} 为其估计值。实现上述最优多用户检测实现复杂,而且需要估计用户信道信息。

2 基于分组的 G-DBF-MUD 算法

把 DBF 同 MUD 相结合的方式传统上有两种,一种就是直接串联,一种是先 DBF,然后分组,再进行 MUD。对于空间相邻较近的多个用户,采用该方法形成多个权矢量,并不能达到抑制干扰的效果。新算法采用先分组,后 DBF 和 MUD 的方式,可以克服传统方法缺点,其系统结构,如图 1 所示。

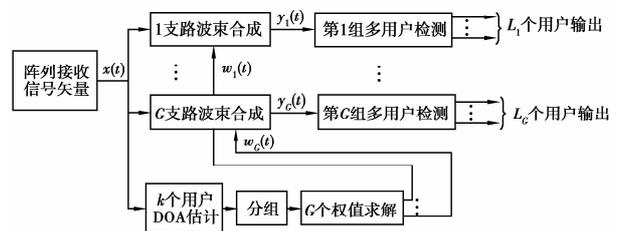


图 1 G-DBF-MUD 算法结构

2.1 分组方法

系统首先对接收信号信息 DOA 估计,得到 I 个用户的角度信息 $\theta_i (i=1, \dots, I)$ 。由于分辨空间相邻的多个用户,需要进行超分辨估计,基于子空间的 MUSIC 算法^[10]及其改进算法^[11],可以达到要求。基本 MUSIC 算法的空间谱表达式为

$$P(\theta) = \frac{a^H(\theta) a(\theta)}{a^H(\theta) \mathbf{F} \mathbf{F}^H a(\theta)}, \quad (10)$$

其中的 \mathbf{F} 为信号子空间,可以通过对协方差矩阵 \mathbf{R} 进行特征分解得到。当同一个人射信号具有多个强多径时,这些多径是相干信号,在进行 DOA 估计中,需要对估计出的协方差矩阵 \mathbf{R} 采用平滑算法进行去相干预处理^[12],

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{\mathbf{R}^f + \mathbf{R}^b}{2}, \quad (11)$$

其中, \mathbf{R}^f 和 \mathbf{R}^b 分别为前向和后向平滑矩阵。

根据估计得到的角度信息,把空间位于同一主瓣宽度内的多个信号分为一组。由于均匀线阵方向图半功率主瓣宽度为^[13]

$$\Delta\theta = 2\sin^{-1}(0.891 \frac{1}{M}), \quad (12)$$

分组实现步骤为

第 1 步,把 I 个角度按大小排序, $180^\circ > \theta_1 > \dots > \theta_I > 0^\circ$;

第 2 步,根据式(11)计算阵列天线方向图半功率主瓣宽度;

第 3 步,把角度位于 $[\theta_1 \quad \theta_1 + \Delta\theta)$ 区间的用户分为第 1 组,总共包含 L_1 个用户;

第 4 步,把角度位于 $[\theta_{A+1} \quad \theta_{A+1} + \Delta\theta)$ 区间的用户分为第 $g+1$ 组,总共包含 L_{g+1} 个用户,其中, $A=L_1+\dots+L_g, g=1,2,\dots$;

第 5 步,重复执行第 4 步,直到把所有 I 个用户分组完成,此时一共分为 G 个组,每组用户数分别为 $L_g, g=1,2,\dots,G$,并且 $I=L_1+\dots+L_G$ 。

2.2 权矢量的计算方法

对于上述步骤产生的 G 个组,形成 G 个并行的 DBF 支路,每个支路产生一个权矢量。由于此时需要把阵列方向图主瓣覆盖同一个组的所有信号,方向图主瓣要对准该组用户的几何中心。第 g 组的中心角度 θ_{ga} 采用简单的算术平均

$$\theta_{ga} = \frac{1}{L_g} \sum_i \theta_i, \quad (13)$$

其中 θ_i 表示位于第 g 组的 L_g 个角度。同样根据最新功率准则求解最优权矢量,则第 g 组对应权矢量表达式为

$$\mathbf{w}_g = \frac{\mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}_g}{\mathbf{a}_g^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}_g}, \quad (14)$$

其中, \mathbf{a}_g 为该组中心角度对应方向矢量,而协方差矩阵也是通过式(6)估计得到。利用权矢量进行加权求和,完成各个支路 DBF,其输出

$$y_g = \mathbf{w}_g^H \mathbf{x}, g = 1, 2, \dots, G. \quad (15)$$

分组方法虽然克服了主瓣内信号 DOA 估计误差的问题,但主瓣外信号 DOA 估计误差还是需要进行处理,从而增加其稳健性。对角负载通过人为增加噪声功率,抑制旁瓣高度,增加零陷宽度,实现相对凸集优化等其他简单方法。采用对角负载,修正协方差矩阵^[14]

$$\mathbf{R}_L = \mathbf{R} + \lambda \mathbf{I}, \quad (16)$$

其中: \mathbf{I} 为单位矩阵; λ 为负载因子,其值为

$$\lambda = \text{std}(\text{diag}(\mathbf{R})), \quad (17)$$

其中: diag 表示矩阵的对角元素; std 表示标准差。

2.3 MUD 实现方法

对于每个支路,分别进行 MUD。此时 MUD 的输入信号 y_g 中,仅包含 L_g 个用户扩频信号,其他用户信号由于 DBF 的作用,可以视为功率较小的噪声忽略掉。因而, MUD 实现方法可以选择复杂度较小的线性解相关算法^[15],而且无需用户信道信息。

对于第 g 个支路, y_g 首先进行匹配滤波,即 MUD 产生 L_g 个用户的本地 PN 码,分别同 y_g 进行相关运算,即

$$z_g = \mathbf{QPSA}^T \mathbf{w}_g^H + \tilde{\mathbf{n}}, \quad (18)$$

其中,噪声项 $\tilde{\mathbf{n}}$ 包含了热噪声和组外用户干扰, \mathbf{Q} 是组内用户 PN 码相关矩阵, $[\mathbf{Q}]_{ij}$ 为其第 i 行 j 列个元素, \mathbf{A} 为组内用户方向矢量构成的矩阵, \mathbf{P} 为组内用户信号功率构成的对角矩阵, \mathbf{S} 为组内用户信息数据构成的对角矩阵

$$[\mathbf{Q}]_{ij} = \int_0^T c_i^g(t) c_j^g(t) dt, \quad (19)$$

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}_1^g \quad \dots \quad \mathbf{a}_{L_g}^g], \quad (20)$$

$$\mathbf{P} = \text{diag}(p_1^g \quad \dots \quad p_{L_g}^g), \quad (21)$$

$$\mathbf{S} = \text{diag}(s_1^g \quad \dots \quad s_{L_g}^g). \quad (22)$$

最后采用解相关的符号判决方法完成联合 MUD

$$\hat{\mathbf{s}}_g = \text{sign}(\mathbf{Q}^{-1} \mathbf{z}_g). \quad (23)$$

相对于串行干扰相消或者并行干扰相消的非线性 MUD,解相关算法实现更简单,而由于组内用户数量不多,检测效果同非线性方法相当。

3 性能分析

在传统 DBF-G-MUD 方法中,每个用户一个 DBF 支路加权求和,就需要 I 个 DBF 模块。在用户数量 I 较大时,需要消耗大量资源。而上述基于分组的 G-DBF-MUD 方法,一组用户一个 DBF 支路,只需要 G 支路,系统大大简化。具体从运算量分析,新算法只需计算 G 个权矢量,完成 G 次加权求和。则乘法运算量减少

$$(I - G)(2M^2 + 6M), \quad (24)$$

加法运算量为

$$2(I - G)(M^2 - 1). \quad (25)$$

新算法的另一个优势在于克服了“自零陷”效应。因为每个组用户位于同一个主瓣范围内,无需对组内干扰形成零陷,即使 DOA 估计产生误差,只要主瓣仍能够覆盖真实信号,就不会出现自零陷。

虽然通过 DBF,组外干扰信号得到了有效抑制,但由于同一个组内包含多个信号,输入到 MUD 模块的信号不能得到最大 SINR。假设在半圆小区范

围内, I 个用户均匀分布, 则任意一组具有 L 个用户的概率为

$$P_L = \left(\frac{\Delta\theta}{180}\right)^{L-1}. \quad (26)$$

假设每个信号达到阵列功率均为 p , 而噪声功率 σ^2 , 对于该组内的一个用户, 其平均 SINR 为

$$\text{SINR}_{\text{avg}} = \sum_{L=1}^I \frac{p}{(L-1)p + \sigma^2} P_L. \quad (27)$$

新算法利用 DBF 使用户的发射功率降低, 相应降低了多址干扰。并且分组后通过 DBF 抑制了组外的干扰信号, 各组 MUD 仅受组内干扰用户的影响, 干扰信号的能量降低, 从而降低了“远近效应”对系统的影响。

4 仿真分析

仿真假设基站采用 12 个阵元均匀线阵, 阵元间距为载波半波长, 小区内有 8 个用户, 各用户的 SNR 均为 20 dB, 不考虑多径信号, 信号到达基站的角度分别为 56° 、 61° 、 64° 、 116° 、 121° 、 124° 、 88° 、 92° , 各用户通过 64 位 Walsh 序列扩频。

首先采用 MUSIC 算法对阵列接收信号进行 DOA 估计, 快拍数 $K=100$, 得到 $I=8$ 个角度信息, 空间谱如图 2 所示。然后, 根据式 (12) 可得主瓣宽度为 $\Delta\theta=8.5^\circ$, 按照介绍的分组方法, 得到的分组情况如表 1 所示, 即用户总共分为 $G=3$ 。

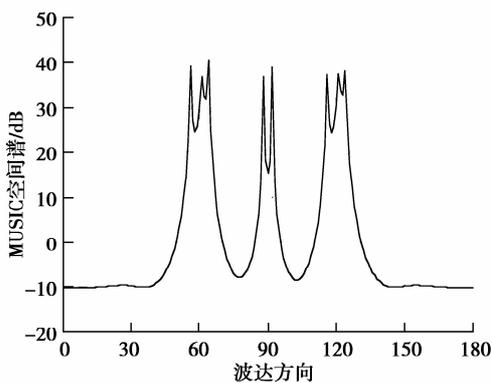


图 2 MUSIC 算法空间谱图

表 1 估计角度及分组

角度编号	1	2	3	4	5	6	7	8
分组	1	1	1	2	2	2	3	3
DOA($^\circ$)	56	61	64	116	121	124	88	92

完成用户分组后, 通过式 (13) (14) 计算出 3 个

支路的最优权矢量, 并完成 DBF。表 2 是新算法与传统 DBF-G-MUD 在权矢量求解时的计算量分析。

表 2 权矢量的计算量比较

算法	乘法运输量/次	加法运算量/次
DBF-G-MUD	2 880	2 288
G-DBF-MUD	1 080	858

图 3 为 3 组用户对应的阵列方向图, 其中, “·” 表示用户的方向位置。每路 DBF 的主瓣对准该组用户, 而零陷对准其他两组。由于对角负载的作用, 干扰零陷被展宽, 从而有效提高波束合成器的稳健性。

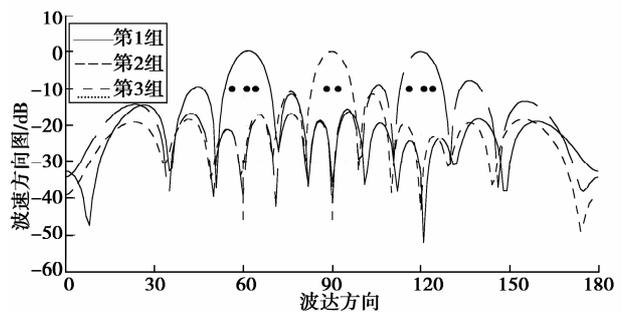


图 3 各组用户的波束方向图

各个 DBF 支路输出信号分别进行研究的解相关 MUD, 并估计出基带发送信号 s_i 。图 4 为相关算法在不同信噪比下的误码率曲线图。可以看出, DBF-G-MUD 误码率性能曲线与 G-DBF-MUD 非常接近, 且误码率远小于仅使用 MUD 检测时的误码率, 由此可见, 采用的方法 G-DBF-MUD 与已有 DBF-G-MUD 相比, 在误码率性能上损失很小, 但实现难度却大大降低。

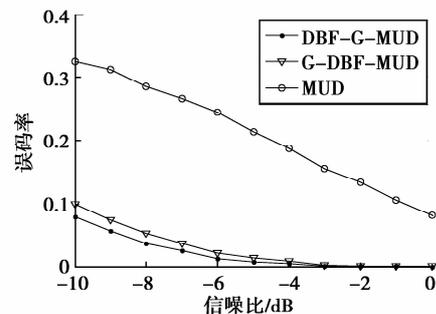


图 4 不同信噪比条件下不同算法的误码率

5 结 语

基于分组的DBF结合解相关多用户检测的算法G-DBF-MUD,相对传统DBF-G-MUD方法实现复杂度大大降低,而误码率性能仅是略微下降。同时,新算法能有效克服了CDMA系统的“远近效应”,以及用户空间非正交性产生的DBF固有缺陷。

参考文献:

- [1] ANGELOSANTE D, GIANNAKIS G B, SIDIROPOULOS N D. Estimating multiple frequency-hopping signal parameters via sparse linear regression [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(10): 5044-5056.
- [2] ZARIFI K, GHRAYEB A, AFFES S. Distributed beamforming for wireless sensor networks with improved graph connectivity and energy efficiency [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(3): 1904-1921.
- [3] SULEESATHIRA R, JINDAPUN J. Combined adaptive antenna array and RAKE receiver [C]// *Proceedings of the 2006 IEEE Tenth International Symposium on Consumer Electronics*, June 29-July 1, 2006. St. Petersburg, Russia: IEEE, 2006: 1-5.
- [4] MUNDARATH J, KOTECHA J. Optimal receive array beamforming for non-collaborative MIMO space division multiple access [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2010, 58(1): 218-227.
- [5] PELLETIER B, CHAMPAGNE B. Group-based space-time multiuser detection with user sharing [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communication*, 2007, 6(6): 2034-2039.
- [6] PELLETIER B, CHAMPAGNE B. Multistage MMSE PIC space-time receiver with non-mutually exclusive grouping [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(4): 2070-2080.
- [7] LI J Q, LETAIEF K B, CAO Z G. A group oriented multiuser detection with beamforming for multicarrier CDMA systems [C]// *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference*, Nov. 25-29, 2001, San Antonio, TX, USA: IEEE, 2001, 2: 733-737.
- [8] MAR J, KUO C C, WU S R. Implementation of the robust null extension for the SDR DBF of two-dimensional array antenna [C]// *Proceedings of the 2010 International Conference on Electronic Devices, Systems and Applications (ICEDSA)*, April 11-14, 2010. Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, 2010: 26-30.
- [9] VARDHAN K V, MOHAMMED S K, CHOCKALINGAM A, et al. A low-complexity detector for large MIMO systems and multicarrier CDMA systems [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008, 26(3): 473-485.
- [10] SCHMIDT R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1986, 34(3): 276-280.
- [11] RAMESHWAR K. Performance of different types of array structures based on multiple signal classification (MUSIC) algorithm [C]// *Proceedings of the 2009 Fifth International Conference on MEMS, NANO, and Smart Systems (ICMENS)*, Dec. 28-30, 2009. Dubai, United Arab Emirates: IEEE, 2009: 159-161.
- [12] JALALI M, MOGHADDASI M N, HABIBZADEH A. Comparing accuracy for ML, MUSIC, ROOT-MUSIC and spatially smoothed algorithms for 2 users [C]// *Proceedings of the 2009 Mediterranean Microwave Symposium (MMS)*, Nov. 15-17, 2009, Tangiers. The Kingdom of Morocco: IEEE, 2009: 1-5.
- [13] VAN TREES H L. Optimum array processing: part IV of detection, estimation, and modulation theory [M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 2002: 46-48.
- [14] LIU W L, DING S X. An efficient method to determine the diagonal loading factor using the constant modulus feature [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(12): 6102-6106.
- [15] PHAM T T, NGUYEN H H. Decorrelate-and-forward relaying scheme for multiuser wireless code division multiple access networks [J]. *IET Communications*, 2010, 4(4): 443-451.

(编辑 侯湘)