

基于符号检测辅助的最小泄漏干扰对齐算法研究^①

贾国庆^{②*} 刘 健^{③*} 黄李冰一^{*} 陆 军^{**} 李明燕^{**}

(^{*} 青海民族大学物理与电子信息工程学院 西宁 810007)

(^{**} 青海建筑职业技术学院信息技术系 西宁 810000)

摘 要 为了减轻蜂窝网络中的小区间干扰,学术界已经在讨论一种消除小区间干扰比较好的算法,即干扰对齐(IA)。干扰对齐作为一种干扰消除技术,能在高信噪比情况下获得很好的系统容量。然而为了实现干扰对齐,发射机和接收机必须联合设计,这通常是很难实现的。另外,在优化不同标准的基础上,大量的迭代收发器设计方法被提出和研究。本文主要对基于最小泄漏干扰(MIN-WLI)的干扰对齐算法进行研究。这里提出了一种符号检测辅助的最小泄漏干扰对齐算法(SDA-MIN-WLI),它是一种基于符号检测的迭代收发器联合设计最小泄漏干扰的算法。系统仿真验证了改进算法要比传统算法具有更好的系统性能。

关键词 干扰对齐(IA),最小泄漏干扰(MIN-WLI),符号检测辅助的最小泄漏干扰(SDA-MIN-WLI)

0 引 言

近年来,随着通信技术的高速发展,小区间的干扰逐步成为限制移动通信系统性能的主要因素,业界对此也提出了一些干扰处理的方法,比如干扰消除和干扰对齐(interference alignment,IA)^[1]。

干扰消除的原理就是在强干扰的情况下,可以先译码干扰信号,从接收信号中把干扰信号消除再获取期望信号,这类方法可以提高期望用户的速率,但是要干扰信号进行解码会影响其他用户的速率,而且多用户检测复杂度高,一般很少使用。目前干扰对齐技术作为一种能有效提高干扰信道容量的方法,获得了广泛的研究^[2,3]。

早期的干扰对齐算法研究,主要集中在研究如何优化传统算法从而提升系统性能,亦或是直接提出一种新的算法。前者改进对系统性能的提升并不大,并且需要大量的数据去验证,但是有之前的算法

做对比,会得到一些比较稳定的仿真结果。而后者改进需要耗费一定的功夫,并且得到的仿真结果往往出人意料。本文所提出的基于符号检测辅助的最小泄漏干扰对齐算法(symbol detection aided minimizing weighted leakage interference, SDA-MIN-WLI)不仅结合了传统算法,并且还有创新点。通过计算机的仿真验证该干扰方法比传统的最小泄漏方法具有更好的系统性能^[4,5]。

1 系统模型

假设一个具有 $2k$ 个节点的对称用户多输入多输出(multiple input multiple output, MIMO)干扰系统,其中 k 个节点为发射机, k 个节点为接收机。在无线干扰信道中,每个发射机都试图只与一个接收机通信。更具体地说,每个带有 N 个天线的发射机通过发送 d 个独立的数据流与相应的带有 M 个天线的接收器通信,则第 i 个接收方接收的数据可以

① 中国科学院无线传感网与通信重点实验室开放基金(2016002)和青海民族大学校理工自然科学重点(2019XJZ09)资助项目。
② 男,1984年生,博士,教授;研究方向:移动通信物理层算法;E-mail: 13709759761@139.com
③ 通信作者,E-mail: 2469146065@qq.com
(收稿日期:2018-11-06)

表示为^[6-7]

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{H}_{i,i} \mathbf{V}_i \mathbf{s}_i + \sum_{j=1, j \neq i}^K \mathbf{H}_{i,j} \mathbf{V}_j \mathbf{s}_j + \mathbf{n}_i \quad (1)$$

$\mathbf{y}_i \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 是第 i 个节点接收到的信号, $\mathbb{C}^{M \times 1}$ 表示 $M \times 1$ 维的矩阵。 $\mathbf{H}_{i,j} \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 表示从第 j 个发射机发射到第 i 个接收机的信道, $\mathbb{C}^{M \times N}$ 表示 $M \times N$ 维的矩阵。第 j 个发射机发射到第 i 个接收机的信道矩阵可以模拟为一个零均值和单位方差的独立同分布的高斯随机变量, 即 $\text{vec}(\mathbf{H}_{i,j}) \sim \mathcal{N}_{\mathbb{C}}(\mathbf{0}, \mathbf{I})$ 。

$\mathbf{V}_j \in \mathbb{C}^{N \times d}$ 是在第 j 个发射机上的传输预编码矩阵, $\mathbb{C}^{N \times d}$ 表示 $N \times d$ 维的矩阵。 $\mathbf{s}_j \in \mathbb{C}^{d \times 1}$ 是通过第 j 个发射机上的发射信号, $\mathbb{C}^{d \times 1}$ 表示 $d \times 1$ 维的矩阵。 $\mathbf{n}_i \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 为均值为零和方差为 σ^2 的循环对称的加性高斯白噪声, 即 $\mathbf{n}_i \sim \mathcal{N}_{\mathbb{C}}(\mathbf{0}, \sigma^2 \mathbf{I})$ 。在不失一般性的情况下, 假设一种渐进最优的情况, 即所有用户的所有数据流都有统一的功率分配。

本文定义 $\gamma = P/\sigma^2$ 为名义上的信噪比。考虑在接收机 i 中有一个滤波矩阵, $\mathbf{U}_i$ 的信号 $\tilde{\mathbf{s}}_i$ 就可以表示为

$$\tilde{\mathbf{s}}_i = \mathbf{U}_i^H \mathbf{y}_i = \underbrace{\mathbf{U}_i^H \mathbf{H}_{i,i} \mathbf{V}_i \mathbf{s}_i}_{\text{期望信号}} + \underbrace{\mathbf{U}_i^H \sum_{j=1, j \neq i}^K \mathbf{H}_{i,j} \mathbf{V}_j \mathbf{s}_j}_{\text{干扰信号}} + \underbrace{\mathbf{U}_i^H \mathbf{n}_i}_{\text{噪声}} \quad (2)$$

故完美的干扰对齐条件为

$$\text{rank}(\mathbf{U}_i^H \mathbf{H}_{i,i} \mathbf{V}_i) = d \quad \forall i \quad (3)$$

$$\mathbf{U}_i^H \mathbf{H}_{i,j} \mathbf{V}_j = \mathbf{0} \quad \forall j \neq i \quad (4)$$

式(3)保证期望信号能被解调处理, 式(4)保证干扰信号能被完全消除^[8-10]。由于在前人的研究过程中, 系统建模已经完成, 所以本文所做的主要工作是在改进算法部分。下面将介绍传统的基于最小泄漏干扰 (minimizing weighted leakage interference, MIN-WLI) 算法和改进算法 SDA-MIN-WLI, 并对两种算法进行分析。

2 MIN-WLI 算法描述

2.1 传统算法 MIN-WLI

根据式(2)可以得出干扰信号 I_i 为

$$I_i = \mathbf{U}_i^H \sum_{j=1, j \neq i}^K \mathbf{H}_{i,j} \mathbf{V}_j \mathbf{s}_j \quad I_i \in \mathbb{C}^{M \times 1} \quad (5)$$

则第 i 个接收端上干扰信号的功率为

$$\begin{aligned} \text{Tr}[I_i I_i^H] &= \text{Tr}[(\mathbf{U}_i^H \sum_{j=1, j \neq i}^K \mathbf{H}_{i,j} \mathbf{V}_j \mathbf{s}_j)(\mathbf{U}_i^H \sum_{l=1, l \neq i}^K \mathbf{H}_{i,l} \mathbf{V}_l \mathbf{s}_l)^H] \\ &= \text{Tr}[(\mathbf{U}_i^H \sum_{j=1, j \neq i}^K \mathbf{H}_{i,j} \mathbf{V}_j \mathbf{s}_j)(\sum_{l=1, l \neq i}^K \mathbf{s}_l^H \mathbf{V}_l^H \mathbf{H}_{i,l}^H \mathbf{U}_i)] \\ &= \text{Tr}[\mathbf{U}_i^H (\sum_{j=1, j \neq i}^K \sum_{l=1, l \neq i}^K \mathbf{H}_{i,j} \mathbf{V}_j \mathbf{s}_j \mathbf{s}_l^H \mathbf{V}_l^H \mathbf{H}_{i,l}^H) \mathbf{U}_i] \\ &= \text{Tr}[\mathbf{U}_i^H \mathbf{Q}_i \mathbf{U}_i] \end{aligned} \quad (6)$$

式中,

$$\mathbf{Q}_i = (\sum_{j=1, j \neq i}^K (\sum_{l=1, l \neq i}^K \mathbf{H}_{i,j} \mathbf{V}_j \mathbf{s}_j \mathbf{s}_l^H \mathbf{V}_l^H \mathbf{H}_{i,l}^H)) \quad (7)$$

其中 $\text{Tr}[\mathbf{A}]$ 是在求矩阵 $\mathbf{A}$ 的迹。

如果矩阵 $\mathbf{U}_i$ 是根据矩阵 $\mathbf{Q}_i$ 的最小特征值对应的特征向量构成的, 那么干扰信号的能量 $\text{Tr}[\mathbf{U}_i^H \mathbf{Q}_i \mathbf{U}_i]$ 就会非常小, 甚至趋于零, 这就是最小化干扰泄露能量的干扰对齐思路^[11]。具体地说, 就是通过求矩阵 $\mathbf{Q}_i$ 的最小的 d 个特征值对应的特征向量来求解最优的 $\mathbf{U}_i$, 即 $\mathbf{U}_i = \text{EIG}_d\{\mathbf{Q}_i\}$, 其中 $\text{EIG}_d\{\mathbf{A}\}$ 为求矩阵 $\mathbf{A}$ 的特征值对应的特征向量。

在反向链路中根据信道的互异性有 $\overleftarrow{\mathbf{H}}_{i,j} = (\mathbf{H}_{i,j})^H$, 设置反向链路的迫零矩阵为正向链路的预编码矩阵 $\overleftarrow{\mathbf{U}}_i = \mathbf{V}_i$, 设置反向链路的预编码矩阵等于正向链路的迫零矩阵 $\overleftarrow{\mathbf{V}}_i = \mathbf{U}_i$, 则通过同样的算法得到 $\mathbf{V}_i$ 。

传统算法中, 考虑到矩阵 $\mathbf{Q}_i$ 存在的符号码流 $\mathbf{s}$ 不能跟滤波器矩阵的求解有关联, 因此考虑通过对 $\mathbf{Q}_i$ 关于码流 $\mathbf{s}$ 求均值而消除码流影响, 即:

$$\mathbf{E}_s[\mathbf{Q}_i] = \mathbf{E}_s[\sum_{j=1, j \neq i}^K (\sum_{l=1, l \neq i}^K \mathbf{H}_{i,j} \mathbf{V}_j \mathbf{s}_j \mathbf{s}_l^H \mathbf{V}_l^H \mathbf{H}_{i,l}^H)] \quad (8)$$

通常情况下, 符号流 $\mathbf{s}_j$ 满足以下条件:

$$\mathbf{E}(\mathbf{s}_j \mathbf{s}_j^H) = \mathbf{P} \mathbf{I}, \quad \mathbf{E}(\mathbf{s}_i \mathbf{s}_j^H) = \mathbf{0}, \quad i \neq j \quad (9)$$

$$\text{因此, } \mathbf{E}[\mathbf{Q}_i] = \mathbf{P} \sum_{j=1, j \neq i}^K \mathbf{H}_{i,j} \mathbf{V}_j \mathbf{V}_j^H \mathbf{H}_{i,j}^H \quad (10)$$

具体算法如表 1 所示。

2.2 改进算法 SDA-MIN-WLI

在传统算法中对干扰信号功率关于 $\mathbf{s}_j$ 求了平均值, 消除了码流 $\mathbf{s}$ 为求解 $\mathbf{U}_i$ 、 $\mathbf{V}_i$ 的影响, 但是在码流的发送、判决等一系列过程中, 仍存在较大误差。且求均值是概率平均, 实际上求均值可能会导致干扰

成本存在。所以就要不断地改进传统算法。

表 1 MIN-WLI 算法

1:初始化随机单式矩阵 V_i
2: $Q_i = (H_{i,j} V_j V_j^H H_{i,j}^H), j = 1, j \neq i$
3:返回步骤 2 并重复 K 次,即:
$Q_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^K (H_{i,j} V_j V_j^H H_{i,j}^H) \quad U_i = EIG_d\{Q_i\}$
4: $\hat{Q}_i = (H_{i,j}^H U_j U_j^H H_{i,j}), j = 1, j \neq i$
5:返回步骤 4 并重复 K 次,即:
$\hat{Q}_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^K (H_{i,j}^H U_j U_j^H H_{i,j}) \quad V_i = EIG_d\{\hat{Q}_i\}$
6:返回步骤 2 并重复 α 次

在改进算法中,步骤 1、2 依然是传统算法,如果步骤 1、2 和步骤 5 直接进行迭代运算,干扰对齐(IA)的性能会因大量符号检测错误而显著降低,尤其是在信噪比较大时,这也就是传统算法的弊端。但是如果先基于步骤 2、3 做迭代运算后,再让步骤 6、7 与步骤 5 做迭代运算,干扰对齐的性能就会显著提高。

此算法即为改进算法——基于符号检测辅助的最小泄漏干扰对齐算法(SDA-MIN-WLI),具体算法如表 2 所示。

表 2 SDA-MIN-WLI 算法

1:初始化随机单式矩阵 V_i
2: $Q_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^K (H_{i,j} V_j V_j^H H_{i,j}^H) \quad U_i = EIG_d\{Q_i\}$
3: $\hat{Q}_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^K (H_{i,j}^H U_j U_j^H H_{i,j}) \quad V_i = EIG_d\{\hat{Q}_i\}$
4:返回步骤 2 并重复 α 次
5: $\tilde{s}_i = U_i^H y_i$
6: $Q_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^K \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq i}}^K H_{i,j} V_j \tilde{s}_j \tilde{s}_l^H V_l^H H_{i,l}^H \quad U_i = EIG_d\{Q_i\}$
7: $\hat{Q}_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^K \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq i}}^K H_{i,j}^H U_j \tilde{s}_j \tilde{s}_l^H U_l^H H_{i,l} \quad V_i = EIG_d\{\hat{Q}_i\}$
8: $\tilde{s}_i = U_i^H y_i$
9:返回步骤 6 并重复 β 次

3 仿真结果

在计算机仿真的过程中,都是设置了一些通用参数(见表 3),因为只有通用参数下才能对比出传统算法和改进算法的性能差异。信道遍历次数取值 10 000,这是因为遍历次数越高,越具有普遍性。遍历次数较少的话会出现随机性,仿真结果也不具有说服力。

将发送天线数和接收天线数均设置为 4 个,而并没有设置为其他数值,比如说 6 个或者是 8 个。这是因为本文的配置是 3 个用户,每个用户 2 个码流,总共 6 个码流,在信道满秩的情况下,6×6 的天线配置是完全可以发送独立的 6 个码流的,而 8×8 更是如此。

在调制方式的设置上本文选取了通信系统中典型的调制方式,而在信道类型的选取上也是考虑到其他信道带来的衰落等一系列因素,综合对比之后选取了通信系统的经典信道类型高斯信道,这样可以使仿真结果更加清晰明确。

表 3 仿真参数设置

参数类型	参数设置
信道遍历次数	10 000
用户数	3
每用户码流数	2
每用户发送天线数	4
每用户接受天线数	4
调制方式	QPSK
信道类型	高斯信道

图 1 是 2 种方法的仿真对比图。传统算法和改进算法的比特率在低信噪比下差别不大,但改进算法的比特率随着信噪比的增加而减小,其比特错误率(bit error rate,BER)低于传统算法。当信噪比等于 20 dB 时,传统算法算法的误码率在 10⁻¹左右,而改进算法的误码率在 10⁻³左右。这就表明改进算法在高信噪比(signal noise ratio,SNR)下比传统算法具有更低的 BER。

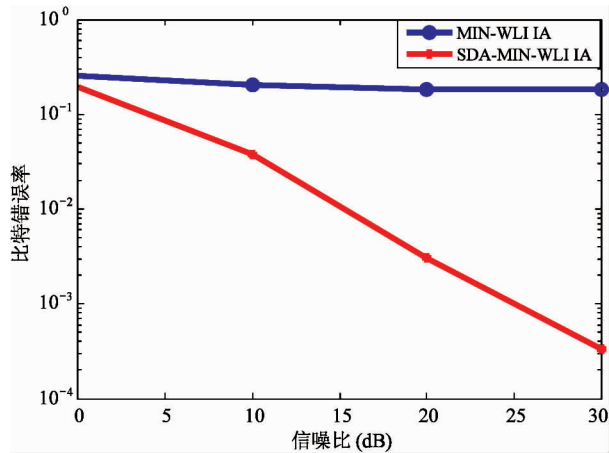


图 1 BER 的仿真对比

图 2 中,横轴是迭代次数,纵轴是均方误差 (mean square error, MSE)。随着迭代次数的增加,改进算法具有比传统算法更好的 MSE,当迭代次数超过 20 次时,改进算法开始收敛。当迭代次数为 25 时,改进算法已经具有非常低的 MSE。

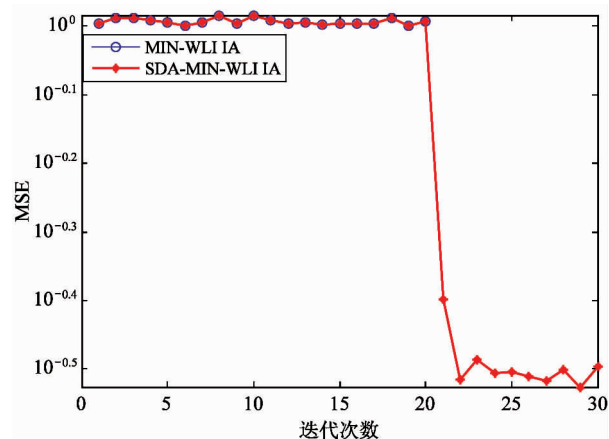


图 2 MSE 的仿真对比

图 3 中,横轴是均方误差 (MSE),纵轴是概率密度函数(probability density function, PDF)。从图 3 中可以看出,改进算法的曲线接近左侧,这意味着其概率密度集中,出现错误的概率越小,而传统算法的曲线向右移动,这意味着其概率密度没有集中,出现错误概率较大。从图 3 中,可以知道改进算法比传统算法具有更好的性能。

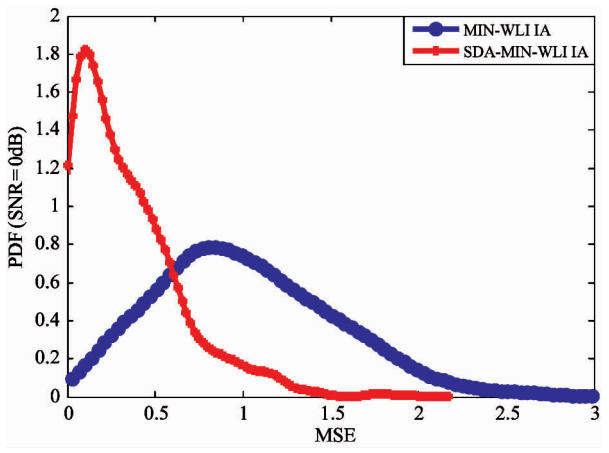


图 3 MSE-PDF 的对比

4 结 论

本文从移动通信中的干扰出发,利用传统的干扰对齐算法,结合符号检测技术,设计出了一种基于符号检测辅助的最小泄漏干扰对齐算法。通过计算机仿真实验结果可以看出,设计的新算法要比传统算法在 BER、MSE 以及 MSE-PDF 这 3 个参数方面具有更好的性能。改进算法在没增加系统复杂度的前提下,有效地改善了系统性能。

尽管本文在一些方面得到了比较好的仿真结果,但是仍有不足之处,我们会在后续的研究中不断完善算法,从而得到更加理想的仿真和实际应用效果。

参考文献

[1] 贾国庆,潘赢,陈善继,等. 基于符号检测的 MMSE 干扰对齐算法[J]. 高技术通讯,2018,28(7):608-613

[2] 贾国庆,纪小红,房卫东,等. 基于最大化信干噪比的广播信道干扰消除算法[J]. 高技术通讯,2016,26(10-11):841-848

[3] 杨洁,宋荣方,董恒. 基于干扰信道的干扰对齐算法综述[J]. 南京邮电大学学报,2012,32(4):2-7

[4] Gomadam K, Cadambe V R, Jafar S A. A distributed numerical approach to interference alignment and applications to wireless interference networks[J]. IEEE Transaction on Information Theory,2011,57(6):3309-3322

[5] Aquilina P, Ratnarajah T. Performance analysis of IA techniques in the MIMO IBC with imperfect CSI [J].

- IEEE Transaction on Communications*, 2015, 63(4): 1259-1268
- [6] Morteza Razavi S. Unitary beamformer designs for MIMO interference broadcast channels [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, 64(8): 2090-2100
- [7] Ail Maddah-Ail M, Motahari A S, Khandani A K. Communication over MIMO X channels: interference alignment, decomposition, and performance analysis [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2008, 54(8): 3457-3470
- [8] Sung H, Hwan S, Lee K J. Linear precoder designs for K-user interference channels [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(1): 291-300
- [9] Grop L H, Tse D N C, Yates R D. Interference alignment for line-of-sight channels [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2011, 57(9): 5820-5832
- [10] Morteza Razavi S, Ratnarajah T. Adaptive LS-and MMSE-based beamformer design for multiuser MIMO interference channels [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(1): 132-143
- [11] Li C T, Ozgur A. Channel diversity needed for vector space interference alignment [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2016, 62(4): 1942-1956

Research on minimizing weighted leakage interference algorithm based on symbol detection aided

Jia Guoqing^{*}, Liu Jian^{*}, Huang Libingyi^{*}, Lu Jun^{**}, Li Mingyan^{**}

(^{*} College of Physics and Electronic Information, Qinghai University for Nationalities, Xining 810007)

(^{**} Department of Information Technology, Qinghai Institute of Architecture and Technology, Xining 810000)

Abstract

In order to alleviate inter-cell interference in cellular networks, an academic algorithm interference alignment (IA) has been adopted to eliminate interference between cells. Interference alignment is an interference cancellation technique that achieves good system capacity at high signal-to-noise ratios. However, in order to achieve interference alignment, the transmitter and receiver must be jointly designed, which is often difficult to achieve. In addition, a large number of iterative transceiver design methods have been proposed and studied on the basis of optimizing different standards. The interference alignment algorithm based on minimizing weighted leakage interference (MIN-WLI) is mainly studied. Here, a symbol detection aided minimizing weighted leakage interference alignment algorithm (SDA-MIN-WLI) is proposed, which is a symbol detection algorithm based on the joint design of iterative transceivers with minimum leakage interference. The simulation results show that the improved algorithm has better system performance than the traditional algorithm.

Key words: interference alignment (IA), minimizing weighted leakage interference (MIN-WLI), symbol detection aided minimizing weighted leakage interference alignment algorithm (SDA-MIN-WLI)