



多小区大规模阵列天线系统盲解码算法

严斌彬¹, 沈雷^{1,2}, 姜显扬¹, 韩煜²

(1. 杭州电子科技大学通信工程学院, 浙江 杭州 310018;

2. 中国电子科技集团公司第36研究所通信系统信息控制技术

国家级重点实验室, 浙江 嘉兴 314001)

摘要:针对多小区大规模阵列天线系统中干扰小区的导频复用造成的导频污染和解码性能下降问题,提出了基于ICA(独立分量分析)盲解码算法。所提盲解码算法,利用ICA法对接收多小区用户信号进行分离解码,不需要发射导频序列,避免了导频污染,提高了解码性能。所提盲解码算法在解码过程中同时估计各个用户波达方向,利用波达方向信息克服ICA方法分离顺序的不确定性,识别期望用户的信号。理论分析和仿真结果表明,所提盲解码方法比广泛应用的MMSE解码算法和最近提出的基于特征值的盲解码方法具有更好的性能。

关键词:多小区;大规模阵列天线;盲解码;独立分量分析

中图分类号:TN91

文献标识码:A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016199

Blind decoding method for a multi-cell massive antenna array system

YAN Binbin¹, SHEN Lei^{1,2}, JIANG Xianyang¹, HAN Yu²

1. School of Communications Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China

2. State Key Lab of Information Control Technology in Communication System of No.36 Research Institute, China Electronic Technology Corporation, Jiaxing 314001, China

Abstract: In order to overcome the pilot contamination and reduction of decoding performance resulted by neighbouring cell pilot sequences reuse in multi-cell massive array MIMO system, a blind decoding method based on ICA was proposed. The proposed blind decoding method used ICA to separate the received signals of multi-cell users without using pilot sequences. Thus, pilot contamination was avoided and decoding performance would be optimized. Every user's angle-of-arrival(AOA) was estimated for recognizing the desired user signals and overcoming the uncertainty of signals separated by ICA. The analytical performance and numerical results show that the proposed method has a better performance compared to MMSE decoding and blind decoding method based on singular value decomposition (SVD).

Key words: multi-cell, massive antenna array, blind decoding, independent component analysis

收稿日期:2016-06-16;修回日期:2016-07-12

通信作者:沈雷, shenlei@hdu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.61401133);中国博士后科学基金资助项目(No.2014M562302);浙江省自然科学基金资助项目(No.LY14F01018)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(No.61401133), China Postdoctoral Science Foundation(No.2014M562302), The Natural Science Foundation of Zhejiang Province of China(No.LY14F01018)

1 引言

大规模天线系统作为下一代移动通信的关键技术引起了很大的关注,其主要特点是,系统的基站装备了数量巨大的天线,终端使用单根天线,多个终端可以同时同频跟基站进行通信^[1,2]。大量文献研究表明,如果信道信息已知,采用简单的线性解码,比如广泛应用的 MMSE 解码或者 ZF(zero forcing,迫零)解码,大规模天线系统可以提供很高的传输效率和能量效率。如果信道信息未知,大规模天线系统的性能快速下降^[3]。在上行信道中,信道信息都是通过导频训练序列进行估计的。也就是终端发射预编码的训练序列,基站接收到信号时对信道信息进行估计。为了保证估计的精度,导频训练序列一般被设计成正交序列。实际通信中,基站需要同时同频服务多个用户,这种正交性需要消耗更多的导频序列。特别是,在多小区大规模天线系统中,如果采用正交导频序列,大量的用户数量会要求用户端发射更长的导频序列,从而降低传输效率。为了降低用户终端发射的导频序列长度,在多小区大规模天线系统中,干扰小区一般采用导频复用,也就是干扰小区发射与期望小区相同的导频序列,但是这会严重降低信道信息估计的精度,从而影响大规模天线系统的性能。这个现象叫做导频污染^[4,5]。

为了提高多小区大规模天线系统的性能,各种方法已被提出降低导频污染^[6-12]。参考文献[6]通过改变不同用户中导频序列在数据帧中的位置,从而降低信道估计时来自干扰小区用户的同频干扰,提高信道估计精度。但是这种方法需要严格的时隙控制,这一点在多小区系统中尤其困难。参考文献[7]提出了大规模阵列天线基于多小区协作的降低导频干扰方法,利用多小区交互估计得到的信道信息,给具有不同空间特性的用户分配相同的导频序列来降低导频干扰。以上解码方法,都需要终端发射训练序列来估计信道信息,由于导频污染,信道估计不准,解码性能下降。参考文献[8-10]提出了基于 SVD(singular value decomposition,奇异值分解)盲解码方法,把接收信号看做用户信息在不同子空间的投影,利用接收信号的样本协方差来估计信道信息,避免了终端发射导频序列。基于 SVD 盲解码方法严重依赖于大规模天线的信道渐进正交性和严格的功率控制。如果天线规模不是很大,信道的正交性无法满足,或者非期望用户的功率接近期望用户,基于 SVD 的盲解码方法性能下降。参考文献[11,12]提出了多小区大规模独立天线中基

于独立分量分析(independent component analysis,ICA)盲解码方法,这种方法利用独立分量分析法对接收到的投影在不同空间的信号进行分离解码,不需要终端发射导频序列,也不需要严格的功率控制和信道正交性,具有良好的解码性能。但是,参考文献[11]只是针对大规模独立天线多个小区系统中,每个小区只有一个用户的情况进行了研究,参考文献[12]是一个半盲 ICA 解码算法,依旧需要导频序列来克服盲源分离顺序的不确定性,区分所有分离用户。如果系统内用户(本小区和干扰小区所有用户)数目增大,导频序列数目也将增大,盲源分离后期望用户识别准确度下降,ICA 盲解码性能下降。

参考文献[7]提出的 5G 中大规模阵列天线模型,相比于大规模独立天线模型,虽然降低了空间自由度的分集增益。但是参考文献[7]证明,在阵列天线个数趋向无穷时,信道同样趋于正交。同时,在阵列天线个数有限、波达方向估计准确时,大规模阵列天线带来的相干空间增益对克服导频干扰和提高解码性能具有很大帮助。本文提出了多小区大规模阵列天线 MIMO (multiple input multiple output,多输入多输出)系统中的基于 ICA 盲解码算法。所提出的盲解码算法在不需要导频训练序列的前提下,利用 ICA 算法对所接收到的信号进行分离解码和信道估计。相对于大规模独立天线,在大规模阵列天线环境下,估计得到的信道信息中包含波达方向,利用波达方向信息对各个用户进行识别,不需要导频序列来区分小区内的各个用户,克服了现有 ICA 盲解码算法需要导频序列来区分所有分离用户的缺点。所提基于 ICA 盲解码算法利用了大规模阵列天线的相干空间增益,提高了解码性能。

这种基于 ICA 的盲解码算法比广泛应用的基于 MMSE 的解码算法^[13]和最新提出基于 SVD 的盲解码算法^[8-10]具有更好的性能。理论分析和仿真结果表明了本文所提算法的有效性。

2 系统模型

在一个具有 L 个小区的大规模天线系统中,每个小区中的基站具有 k 根阵列天线。每个小区中的用户个数为 p ,发射终端只有一根天线。这里假设在每个小区中,所有用户到基站的上行信道服从瑞利衰落。不失一般性,在此假设第一个小区为期望小区,则这个小区中具有大规模阵列天线的基站在 N 次的采样时刻接收到的基带观测矩阵可以表示为^[7]:



$$Y = \sqrt{\rho} HS + N_0 \quad (1)$$

其中, Y 是 $K \times N$ 维的矩阵, 表示基站 K 根天线接收到的 N 个采样信号, ρ 表示信噪比。 $S = [s_{1,1} \cdots s_{1,P} \cdots s_{L,1} \cdots s_{L,P}]^T$ 是 $LP \times N$ 维的信号传输矩阵, 这里 $s_{L,P}$ 表示第 l 个小区的第 p 个用户到第一个小区基站传输的信号, 假设信号是 BPSK 调制, $s_{l,p} \in \{\pm 1\}$ 。 N_0 是 K 根天线采样 N 个信号得到 $K \times N$ 维的高斯噪声矩阵, 矩阵中的每一个元素服从复标准高斯正态分布。

H 表示从 LP 个用户到第一个小区基站的信道矩阵, H 是一个 $K \times LP$ 维的矩阵, 第 l 个小区第 p 个用户的信道向量 $H_{l,p}$ 可以表示为^[7]:

$$H_{l,p} = \sqrt{\beta_{l,p}} a(\theta_{l,p}) h_{l,p} \quad (2)$$

其中, $\beta_{l,p}$ 表示第 l 个小区的第 p 个用户到期望小区基站的大尺度衰落因子, 这里假设 $\beta_{1,1} = 1, \beta_{l,p} \leq 1, l \neq 1, p \neq 1, p = 1, \dots, P, l = 1, \dots, L$ 。 $h_{l,p}$ 表示第 l 个小区的第 p 个用户到阵列天线的小尺度衰落因子, $h_{l,p} \sim CN(0, 1), l = 1, \dots, L, p = 1, \dots, P$ 之间统计独立, 服从复数标准正态高斯分布。这里假设信道是慢衰落信道, 也就是在一个观测数据块 (N), 信道衰落保持不变, 不同的观测数据内, 信道衰落改变。

$$a(\theta_{l,p}) = \begin{bmatrix} 1 & e^{-j2\pi \frac{d}{\lambda} \cos(\theta_{l,p})} & \dots & e^{-j2\pi \frac{d(K-1)}{\lambda} \cos(\theta_{l,p})} \end{bmatrix}^T$$

表示第 l 个小区第 p 个用户到期望小区基站的波达方向向量, $\theta_{l,p}$ 表示 l 个小区第 p 个用户到期望小区基站的波达方向。阵列天线由 K 个阵元组成, 每根天线之间的距离是 d , 波长是 λ 。

3 大规模阵列天线基于 ICA 的盲解码

为了对接收信号进行解调, 需要知道信道矩阵 H 的信息。在 MIMO 系统中, 一般采用发射多小区复用的导频序列的方法对信道进行估计。这种方法会引起导频污染, 信道解码算法性能下降。这里采用基于 ICA 的盲解码算法, 不需要导频序列辅助, 就可以对期望用户的信号进行解码。

由于式(1)中的混合矩阵是复数形式, 这里采用基于实数的快速定点 ICA^[14]方法对大规模天线接收到的信号进行分离, 式(1)中的接收信号 Y 可以表示如下:

$$Y' = [\text{Re}(Y)^T, \text{Im}(Y)^T]^T \quad (3)$$

3.1 白化过程

根据观测矩阵 Y' 来估计其协方差矩阵 $R_{Y'Y'}$, 即 $R_{Y'Y'} = E\{Y'(Y')^T\}$, 将 $R_{Y'Y'}$ 特征值分解为: $R_{Y'Y'} = UDU^T$, 其中 U 为正

交矩阵, $D = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_K\}$ 。 $U = [U_S U_N]$, $U_S = [u_1, u_2, \dots, u_{LP}]$, $U_N = [u_{LP+1}, u_{LP+2}, \dots, u_K]$ 。 $D = \begin{bmatrix} D_S & 0 \\ 0 & D_N \end{bmatrix}$, $D_S = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{LP}\}$, $D_N = \text{diag}\{\lambda_{LP+1}, \lambda_{LP+2}, \dots, \lambda_K\}$ 。这里 U_S 为信号子空间, U_N 为噪声子空间, D 是特征值。由特征值分解的原理可知, 高斯噪声的存在只对特征值产生影响, 而对特征向量没有影响。对接收信号在信号子空间进行投影, 得到:

$$X = D_S^{-1/2} U_S^T Y' = D_S^{-1/2} U_S^T (\sqrt{\alpha} H' S + N_0) = A S + D_S^{-1/2} U_S^T N_0 \quad (4)$$

$H' = [\text{Re}(H)^T, \text{Im}(H)^T]^T$, 白化矩阵 $A = \sqrt{\alpha} D_S^{-1/2} U_S^T H'$ 是一个正交矩阵, 且是满秩的。通过以上过程可知, 方程(1)的维数从 K 维降到了上述方程的 LP 维。实际工作中通常

用样本协方差来代替理论协方差, 即有 $R_{Y'Y'} \approx \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Y'_n (Y'_n)^H$ 。

3.2 基于 ICA 的盲用户信息分离和解码

在式(4)中, 当信噪比较大时, $D_S^{-1/2} U_S^T N_0$ 会变得很小, 忽略此项后得到 $X = AS$ 。由于 S 中的每个分量都是均匀地取自某个固定的星座, 与正态分布不一致, 因而可以采用快速定点 ICA 算法分离各个用户, 从而得到用户数据 S 。具体地说, 就是对接收到的信号进行降维白化后, 可以采用快速定点 ICA 算法进行分离来得到用户数据信息, 也就是搜索一个正交矩阵 $W = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_{LP}]$, 使式(5)成立:

$$Z = W^T X = \hat{S} \quad (5)$$

其中, $Z = [z_1 \ z_2 \ \dots \ z_{LP}]^T$ 为经过 ICA 算法后, 对用户数据信息 S 的估计。其中, 当不存在噪声时, $Z = S$ 。此时, 式(5)的搜索过程如下。首先, 选择分离向量初始值, 然后采用式(6)进行迭代:

$$w_i(k+1) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (Xg(w_i(k)^T X)) - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (g'(w_i(k)^T X)) \cdot w_i(k) \quad (6)$$

其中, X 是白化处理后的信号, 非线性函数 $g(a) = a^3$ 。对式(6)进行迭代处理直到收敛, 则得到 w_1 , 即第一个分离向量。如果有多个分离向量, 则需要对以上步骤重复进行即可。为了避免重复得到同一个分离向量, 在计算第 p 个分离向量时, 对式(6)每迭代一次, 就采用如下紧缩算法正交化一次:

$$w_p = w_p - \sum_{j=1}^{p-1} (w_p^T w_j) w_j, w_p = w_p / \|w_p\| \quad (7)$$

其中, $w_1, w_2, \dots, w_{p-1}$ 是已经得到的前 $p-1$ 个分离向量。重复执行式(7), 直到搜索算法收敛, 可以得到 w_p , 即

第 p 个分离向量。算法运行直到 $p=LP$,整个搜索算法结束。

可以看到基于独立分量分析盲解码在不需要导频序列辅助的前提下,就可以将多小区系统中所有用户信号分离开来。并且由式(6)可知,可以通过增大观测样本值 N 来降低高斯噪声的影响。

由式(4)和式(5)可以得到,当搜索过程结束时, $W^T A = I$,即式(8)成立:

$$\sqrt{\alpha} W^T D_S^{-1/2} U_S^H H' = I \quad (8)$$

式(8)中 D_S 、 U_S 可以通过主分量分析算法得到,而 W 可以通过ICA算法搜索得到。由于信号子空间的能量远大于噪声子空间的能量,由观测矩阵 Y 的协方差矩阵 R_{YY^T} 近似可以得到:

$$\alpha H' (H')^T = U_S D_S U_S^T \quad (9)$$

联合式(8)可以得到各个小区用户的信道估计为:

$$(\hat{H}_l')^T = \alpha^{-1/2} w_l^T D_S^{1/2} U_S^T, l=1, \dots, LP \quad (10)$$

其中, w_l 是正交矩阵 W 的第 l 个列向量。

在高斯噪声情况下,通过ICA算法后可以得到用户数据信息。把式(4)、式(8)代入式(5)可以得到各小区用户信息估计为:

$$\hat{s}_l = s_l + w_l^T D_S^{-1/2} U_S^T N_0, l=1, \dots, LP \quad (11)$$

通过对式(11)进行判决,可以得到各个用户的信息 s_{li} 。从上面的分析可以知道,本文提出的基于ICA的多小区大规模阵列天线盲解码方法,在不需要导频训练序列的前提下,就可对接收到的信号进行分离来得到期望用户的数据信息。这种基于ICA的盲解码方法在对信号的处理过程中不会引入导频污染,提高了解码性能。同时由于不需要导频序列,提高了传输效率。

4 基于用户波达方向角估计的用户识别

由于独立分量分析算法分离顺序的不确定性,无法区分各个分离出来的信息属于哪个用户。本文所提的盲数据解码算法对信道和用户信息同时进行了估计,由于大规模阵列天线信道中包含了用户波达方向向量,可以通过信道信息估计用户的波达方向。通过用户的波达方向角区分各小区的不同用户,克服盲源分离方法分离的不确定性问题,识别目标用户。

由式(2)和式(10)可知,通过盲源分离可以估计得到第 l 个小区第 p 个用户的信道信息为 $\hat{H}_{l,p}^T = \sqrt{\beta_{l,p}} a(\theta_{l,p}) h_{l,p} + \Delta a(\theta_{l,p})$,其中, $\Delta a(\theta_{l,p})$ 表示波达方向估计误差向量。估计

得到信道中包含了接收信号的波达方向向量,通过在 $[0, 2\pi]$ 搜索来波方向估计波达方向角,可以表述为^[15]:

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_{l,p} &= \arg \max_{\theta \in \{0, 2\pi\}} (|\hat{H}_{l,p}^H a(\theta)|^2) \\ &= \arg \max \left\{ \left| \sqrt{\beta_{l,p}} h_{l,p} \sum_{k=0}^{K-1} e^{j2\pi \frac{D}{\lambda} (\cos(\theta_{l,p}) - \cos\theta)} + \Delta a(\theta_{l,p})^H a(\theta) \right|^2 \right\} \\ l &= 1, \dots, L, \quad p = 1, \dots, P \end{aligned} \quad (12)$$

由式(12)可以知道,利用扫描波达向量 $a(\theta)$ 与 $\hat{H}_{l,p}^T$, $l=1, \dots, L, p=1, \dots, P$ 逐一进行内积运算,分别得到不同用户的扫描空间谱。然后在每个用户扫描空间谱中找到波峰对应的角度值 $\hat{\theta}_{l,p}$,得到所有用户波达方向角度。利用估计得到波达方向角度来克服ICA分离顺序的不确定性,区分不同用户。

5 仿真结果

为了验证所提算法的性能,这里对大规模阵列天线基于ICA的盲解码算法进行了性能仿真。同时为了比较,对目前广泛使用的基于MMSE解码^[13]和最近提出的基于SVD的盲解码算法^[8-10]性能也在相同环境下做了仿真。在信道未知时,信道估计采用MMSE估计算法^[13],信道估计中的导频序列本小区用户采用正交序列,而相邻小区用户导频复用。每个小区基站的阵列天线长度 $K=128$,观测数据块长度 $N=400$,用户波达方向在一个观测数据块之内保持不变,但是不同观测数据块之间波达方向可变,变化角度为 $\Delta\theta \in [-0.0005^\circ, 0.0005^\circ]$ (根据5G工作环境假设信息速率为1 Mbit/s,微小区半径为 $r=2$ km,则对应的物体运行速率为 $v=150$ km/h,相当于汽车在高速公路上运行,此时物体运动速率与变化角度相匹配^[16])。MMSE解码方法中,信道估计采用MMSE估计。当一个小区中用户数为3时,期望小区用户导频序列为 $[1, 0, 0; 0, 1, 0; 0, 0, 1]$,干扰小区采用导频复用。

图1给出了不同波达方向间隔下基于盲源分离算法的期望用户识别概率仿真。仿真环境中小区个数 L 为3,每个小区有3个用户,波达方向角度间隔分别为 1° 、 1.2° 、 1.5° 和 2° 时。本小区用户大尺度衰落因子为1,干扰小区用户大尺度衰落因子为0.5。由图1可知,在相同信噪比时,随着波达角度间隔的增大,期望用户识别概率增加,波达角度间隔增大到 2° 以上时,识别概率不再增加,这是由于波达角度间隔达到一定值以后,信号投影空间已经张得足够开,白化过程和ICA分离性能不再



有提高;在同一波达角度间隔下,随着信噪比提高,期望用户识别概率增加,但是信噪比大于 5 dB 后,识别概率趋近于 0.994 0 左右,这是由于在盲源分离后估计得到的波达方向向量存在误差,而这误差并不随着信噪比的提高而趋向于 0。

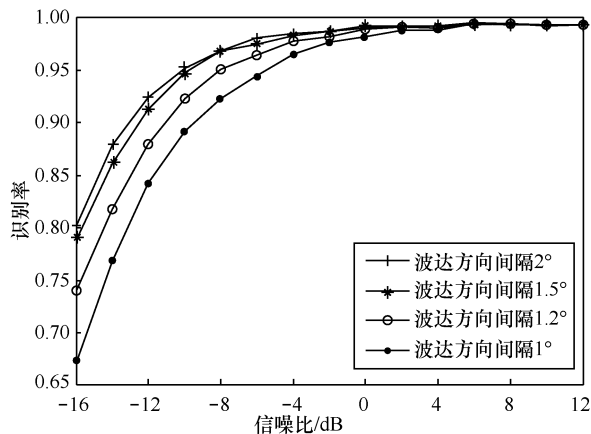


图 1 不同波达角度间隔下 ICA 盲解码算法期望用户识别概率

图 2 给出了基于估计波达方向的 ICA 解码算法与 MMSE 解码算法性能比较,分别对波达方向角间隔 θ 为 1°、1.2° 和 1.5° 3 个小区,每个小区 3 个用户的情况进行仿真。本小区用户大尺度衰落因子为 1,干扰小区用户大尺度衰落因子为 0.5。由图 2 可知,本文提出的盲解码方法性能明显优于传统 MMSE 解码方法^[17]。这是由于传统的 MMSE 解码方法需要进行信道估计。但是由于导频复用导致的导频污染的存在,使得信道估计准确度不高,从而降低了 MMSE 解码性能。本文提出的基于 ICA 的盲解码方法不需要训练序列,避免了导频污染,提高了解码性能。

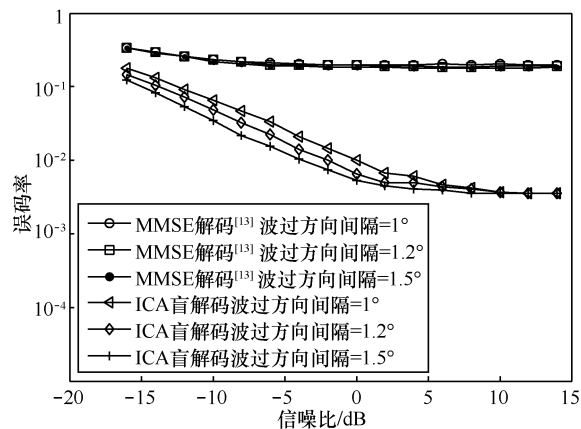


图 2 不同波达方向间隔下盲源分离解码方法与 MMSE 解码方法性能比较

图 3 给出了相同波达方向间隔时,每个小区内用户数 P 为 3,小区数 L 为 2,基于 ICA 盲解码方法与基于 SVD 盲解码方法在不同干扰功率条件下的性能比较。仿真中本小区用户大规模尺度衰落都为 1。可以看到基于 ICA 的盲解码方法比最近提出的基于 SVD 盲解码方法具有更好的性能。这是由于基于 SVD 的盲解码方法严重依赖于信道的正交性和严格的用户功率控制。如果非期望用户的功率与期望用户功率相近,SVD 盲解码方法无法区分期望用户和非期望用户,解码性能快速下降。本文提出的基于 ICA 的盲解码利用大规模阵列天线信道中包含的波达方向区分不同的用户,即使非期望用户的功率与期望用户的功率接近,基于 ICA 的盲解码方法依旧具有良好的性能。

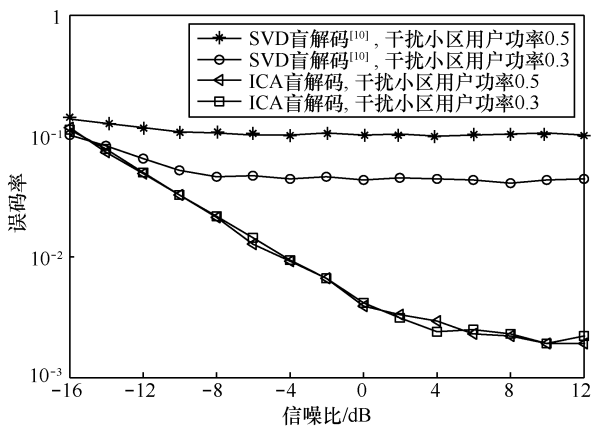


图 3 干扰小区功率对 ICA 盲解码方法与 SVD 盲解码方法性能的影响

6 结束语

本文提出了多小区大规模阵列天线基于 ICA 盲解码方法,所提盲解码方法利用独立分量分析法对接收到的多小区用户信号进行分离解码,不需要导频序列,降低了导频污染,提高了解码性能。理论分析和仿真结果表明,由于克服了导频污染,所提基于 ICA 盲解码方法比广泛应用的基于导频序列辅助的 MMSE 解码具有更好的性能。同时,基于 ICA 的盲解码方法比最近提出的基于 SVD 盲解码方法具有更好的性能。

参考文献:

- [1] MA J J, LI P. Data-aided channel estimation in large antenna systems[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(12): 3111-3124.

- [2] WANG H Q, PAN P, SHEN L, et al. On the pair-wise error probability of a multi-cell MIMO uplink system with pilot contamination [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(10): 5797-5811.
- [3] LU L, LI G Y, SWINDLEHURST A L, et al. An overview of massive MIMO: benefits and challenges [J]. IEEE Journal on Selected Topics Signal Process, 2014, 8(5): 742-758.
- [4] 顾浙骐, 张忠培. 大规模 MIMO 时分双工系统的基站天线互易校准算法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(2): 405-410.
GU Z Q, ZHANG Z P. Reciprocity calibration for base station antenna in massive MIMO time division duplex systems[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(2): 405-410.
- [5] 李小武, 唐锟. 大规模 MIMO 与小型蜂窝基站的异构网络研究[J]. 信号处理, 2016, 32(2): 237-243.
LI X W, TANG K. Research on heterogeneous networks based on massive MIMO and small cells [J]. Journal of Signal Processing, 2016, 32(2): 237-243.
- [6] APPAIAH K, ASHIKHMIN A, MARZETTA T L. Pilot contamination reduction in multi-user TDD systems[C]//IEEE ICC, May 23-27, 2010, Cape Town, South Africa. New Jersey: IEEE Press, 2010: 1-5.
- [7] YIN H F, GESBERT D, FILIPPOU M, et al. A coordinated approach to channel estimation in large-scale multiple-antenna systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(2): 264-273.
- [8] NGO H Q, LARSSON E G. Evid-based estimation in multicell multiuser MIMO systems with very large antenna arrays [C]//IEEE ICASSP, March 25-30, 2012, Kyoto, Japan. New Jersey: IEEE Press, 2012: 3249-3252.
- [9] MULLER R R, VEHKAPER M, COTTATELLUCCI L. Blind pilot decontamination[C]//2013 17th International ITG Workshop on Smart Antennas (WSA), March 13-14, 2013, Stuttgart, Germany. New Jersey: IEEE Press, 2013: 1-6.
- [10] MULLER R R, VEHKAPER M, COTTATELLUCCI L. Blind pilot decontamination[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2014, 8(5): 773-786.
- [11] SHEN L, YAO Y D. Blind decoding based on independent component analysis for a massive MIMO uplink system in micro-cell Rician/Rayleigh fading channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015: 1.
- [12] LIU Y Y, WANG H Q, SHEN L, et al. Decoding method based on complex ICA for a multicell massive MIMO uplink system[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2016, 23(5): 648-652.
- [13] BIGUESH M, GERSHMAN A B. Training-based MIMO channel estimation: a study of estimator tradeoffs and optimal training signals [J]. IEEE Transactions on Signal Process, 2006, 54(3): 884-883.
- [14] AAPPO H. Fast and robust fixed-point algorithms for independent component analysis [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1999, 10(3): 626-634.
- [15] GE X H, YANG B, YE J L, et al. Spatial spectrum and energy efficiency of random cellular networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(3): 1019-1030.
- [16] GE X H, TU S, MAO G Q, et al. 5G ultra-dense cellular networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2016, 23(1): 72-79.
- [17] LOESCH B, YANG B. On the relation between ICA and MMSE based source separation [C]//ICASSP, May 22-27, 2011, Prague, Czech Republic. New Jersey: IEEE Press, 2011: 3720-3723.

[作者简介]



严斌彬 (1991-), 男, 杭州电子科技大学硕士生, 主要研究方向为大规模天线系统。



沈雷 (1979-), 男, 博士, 杭州电子科技大学副教授, 主要研究方向为大规模天线系统、信号盲分离、信号检测、认知无线电频谱检测、通信信号盲分离、通信抗干扰和高动态 GPS 接收机。

姜显扬 (1971-), 男, 博士, 杭州电子科技大学讲师, 主要研究方向为信号处理。

韩煜 (1978-), 男, 中国电子科技集团公司第 36 研究所通信系统信息控制技术国家级重点实验室副研究员, 主要研究方向为自适应信号处理、通信与语音信号处理。