

doi:10.13756/j.gtxyj.2020.05.017

无线通信技术

SIMO-MUSA 系统下的块稀疏多用户检测算法

陈发堂, 石贝贝, 邓 青

(重庆邮电大学 通信与信息工程学院, 重庆 400065)

摘要:对于上行免调度的多用户共享接入(MUSA)方案,用户具备随机突发接入系统的特性,用户信号具有稀疏性,可利用压缩感知的相关算法进行多用户检测。针对活跃用户数未知的情况,文章提出了基于验证误差的正交匹配追踪(VE-OMP)多用户检测算法。所提算法利用误差在迭代次数等于用户稀疏度时能够达到最小值来估计稀疏度,且验证误差的思想移植性强,可用于块稀疏压缩感知。考虑基站端配备多天线的情况,将发送信号转为块稀疏模型,提出验证误差的块稀疏正交匹配追踪(VE-BOMP)算法进行活跃用户数据检测。仿真结果表明,VE-OMP 算法能够在稀疏度未知的情况下对多用户同时进行活跃性估计和数据检测,VE-BOMP 算法可用于多天线接收系统,其检测性能随天线数的增加而提高。

关键词:多用户共享接入;压缩感知;块稀疏;多用户检测

中图分类号:TN929.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-8788(2020)05-0073-06

Block Sparse Multiuser Detection Algorithm in SIMO-MUSA System

CHEN Fa-tang, SHI Bei-bei, DENG Qing

(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University
of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: For the uplink grant-free Multi-User Shared Access (MUSA) scheme, the user has the characteristics of access system randomly, and the user signal has sparseness, which can use the relevant algorithm of compression perception for multi-user detection. In view of the unknown number of active users, a multi-user detection algorithm based on Validation Error Orthogonal Matching Pursuit (VE-OMP) is proposed. The proposed algorithm can estimate the sparsity by using the error to reach the minimum value when the number of iterations is equal to the user's sparsity. It is also noted that the idea of verifying the error has strong portability, which can be used for block sparse compression sensing. Considering that the base station is equipped with multiple antennas, the transmission signal is transformed into a block sparse model. A Validation Error Block Sparse Orthogonal Matching Pursuit (VE-BOMP) algorithm is also proposed to detect active user data. The simulation results show that the VE-OMP algorithm can jointly detect the activity and data of the users under the condition of unknown sparsity. The VE-BOMP algorithm can also be used in multi antenna receiving system, and its detection performance increases with the increase of the number of antennas.

Key words: MUSA; compressive sensing; block sparsity; multi-user detection

0 引 言

正交多址接入技术的接入用户数和频谱效率等很难满足 5G 海量机器连接场景,非正交多址接入可打破这些局限^[1-2]。多用户共享接入(Multi-User Shared Access, MUSA)是免调度策略,可解决海量机器接入带来的信令风暴^[3],省去了复杂的调度过程,但接收端判断用户是否活跃将是检测数据前的一个难题。文献[4]指出,系统中的活跃用户数远小于潜在总用户数,故用户信号具有稀疏性,可引入压缩感知(Compressive Sensing, CS)理论进行稀疏多用户检测^[5-6];文献[7]提出联合 CS 算法和消息传递算法(Message Passing Algorithm, MPA),通过 CS 算法先获得用户活跃信息,MPA 继而对 CS

算法得到的活跃用户进行数据检测;文献[8]利用时隙间的相关性,运用 CS 算法实现了多时隙情景下的用户活跃性和数据的检测;文献[9]提出交叉验证正交匹配追踪算法,将数据分为训练和验证部分,利用交叉验证终止迭代,但该算法由于需要验证部分的数据而降低了传输效率。而目前与多天线技术结合的文献还较少。

受上述文献的启发,本文提出了验证误差正交匹配追踪(Validation Error Orthogonal Matching Pursuit, VE-OMP)算法,通过验证误差是否达到最小值来确定贪婪算法迭代的次数,较文献[9]的方法更为简便。验证误差的方法移植性强,本文又将其用于块稀疏正交匹配追踪(Block Sparse Orthogonal Matching Pursuit, BOMP)算法,实现了多天

收稿日期:2020-02-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61701063)

作者简介:陈发堂(1965—),男,重庆人。研究员,硕士,主要研究方向为移动通信物理层算法仿真及软件开发。

通信作者:石贝贝,硕士。E-mail:907412096@qq.com

线场景下的多用户检测。

1 系统模型

考虑典型的 MUSA 上行免调度系统,由于用户信号的稀疏性,可将其视作零星通信系统。本文考虑基站端配备 R 根天线、用户端配备单天线的情况。假设总用户数为 K ,其中活跃用户数为 M ,活跃用户数据流经信道编码和调制后得到第 m 个用户的传输符号 x_m ,这些符号全部取自复星座集 X 。不活跃用户调制后符号设置为 0。将各用户调制后的符号经长度为 N 的复扩展序列进行扩展,然后共同叠加在 N 个正交的正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 子载波上传输。第 n 个子载波上的接收信号可表示为

$$y_n = \sum_{m=1}^M h_{n,m} a_{n,m} x_m + z_n, \quad (1)$$

式中: $h_{n,m}$ 为第 m 个用户在第 n 个子载波上的信道增益; $a_{n,m}$ 为第 m 个用户扩展序列的第 n 个元素; z_n 为经信道产生的被动噪声。由以上标量表达可推广得到 N 个子载波上接收信号的矢量表达:

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{z}, \quad (2)$$

式中: $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_K)^T$, $\mathbf{x}$ 中非零元素的个数为 M ; $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_N)^T$; $\mathbf{A}$ 为 $N \times K$ 维包含扩展序列和信道增益的等效信道矩阵; $\mathbf{z} = (z_1, z_2, \dots, z_N)^T$, $\mathbf{z}$ 为均值为 0、方差为 σ^2 的高斯噪声。

本文考虑重组接收信号模型,每根天线上的接收信号 $\mathbf{y}$ 都可建立一个单测量向量 (Single Measurement Vector, SMV) 模型。把 R 根天线上的 R 个 SMV 模型转变成一个块稀疏的单测量向量 (Block Sparse Single Measurement Vector, BS-SMV) 模型。相应地,发送端符号看成是重复发送 R 次,这样便可将发送端的信号 $\mathbf{x}$ 转变成块稀疏结构 $\mathbf{s}$: $\mathbf{s} = (\underbrace{x_1, x_1, \dots, x_1}_R, \underbrace{x_2, x_2, \dots, x_2}_R, \dots, \underbrace{x_K, x_K, \dots, x_K}_R)^T$, 从 SMV 模型角度来看,块稀疏结构的 $\mathbf{s}$ 将比 $\mathbf{x}$ 更稀疏。相应地需要把接收信号和等效信道矩阵以及噪声分别进行变换,得到: $\mathbf{p} = (y_1^1, y_1^2, \dots, y_1^R, y_2^1, y_2^2, \dots, y_2^R, \dots, y_N^1, y_N^2, \dots, y_N^R)^T$, 式中, y_n^t 为第 t 根天线的接收信号向量 $\mathbf{y}^t$ 第 n 个子载波上的信号,而 $\mathbf{y}^t = (y_1^t, y_2^t, \dots, y_N^t)^T$ 。扩展矩阵 $\mathbf{A}$ 的对应变换 $\mathbf{D}$ 为

$$\mathbf{D} = \mathbf{A} \otimes \mathbf{I}_R =$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}(1,1)\mathbf{I}_R & \mathbf{A}(1,2)\mathbf{I}_R & \cdots & \mathbf{A}(1,K)\mathbf{I}_R \\ \mathbf{A}(2,1)\mathbf{I}_R & \mathbf{A}(2,2)\mathbf{I}_R & \cdots & \mathbf{A}(2,K)\mathbf{I}_R \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{A}(N,1)\mathbf{I}_R & \mathbf{A}(N,2)\mathbf{I}_R & \cdots & \mathbf{A}(N,K)\mathbf{I}_R \end{bmatrix},$$

$\mathbf{v} = (z_1^1, z_1^2, \dots, z_1^R, z_2^1, z_2^2, \dots, z_2^R, \dots, z_N^1, z_N^2, \dots, z_N^R)^T$, 式中: $\mathbf{I}_R$ 为 R 阶单位矩阵; $\mathbf{v}$ 为对应的噪声变换。变换后所有天线的接收信号为

$$\mathbf{p} = \mathbf{D}\mathbf{s} + \mathbf{v}. \quad (3)$$

2 基于 CS 的多用户检测

文献[4]中指出,即使系统内存在大量潜在用户,在同一时刻也仅有很小一部分用户会随机突发性地接入系统,活跃用户数不会超过潜在用户总数的 10%。因此,此类系统的多用户检测问题就可以看作稀疏信号的恢复问题,可以运用丰富的 CS 算法对其进行多用户检测。由于不活跃用户传输符号可视为 0,文献[8]中将用户信号的支撑集定义为

$$\Gamma = \{k \mid k \in 1, 2, \dots, K, x_k \neq 0\}, \quad (4)$$

其由用户信号中非零元素的索引构成。

由 CS 相关理论可知,观测矩阵需满足有限等距条件。目前已研究出的多种矩阵均能满足有限等距条件,其中托普利兹矩阵能够以高概率满足有限等距准则 (Restricted Isometry Property, RIP)^[10], 利于信号的精确恢复,故本文选取托普利兹矩阵作为 MUSA 系统的扩频矩阵。

本文先提出 SMV 模型下的 VE-OMP 算法用于单天线下的多用户检测,然后推广至 BS-SMV 模型下的稀疏信号恢复,提出验证误差块正交匹配追踪 (Validation Error Block Orthogonal Matching Pursuit, VE-BOMP) 算法用于多天线下多用户检测。

2.1 VE-OMP 算法

本节的 VE-OMP 算法针对单天线场景提出,即送入算法的接收信号为式(2)。

由 OMP 算法步骤^[11]可知,在未知稀疏度的情况下,迭代无法停止,需要已知稀疏度作为贪婪算法迭代停止的条件。其后提出的稀疏度自适应匹配追踪 (Sparse Adaptive Matching Pursuit, SAMP) 算法,其在无噪系统中时,迭代停止阈值是残差范数,无限接近于零,但在有噪系统中时,由于残差包含噪声影响,无法确定最优迭代停止阈值。为弥补上述缺陷,本文提出验证误差的方法,在稀疏度未知的情况下,通过验证重构信号与接收信号的误差范数,判别误差是否达到最小值从而决定迭代终止条

件。重构信号与接收信号的误差范数为

$$\|e_i\|_2 = \|y - A_{\Gamma_i} Q(\hat{x}_i)\|_2, \quad (5)$$

式中： e_i 、 $\hat{x}_i$ 、 Γ_i 和 A_{Γ_i} 分别为第 i 次迭代得到的误差、估计信号、支撑集和支撑集对应的子扩频矩阵； $Q(\cdot)$ 为硬判决。

图 1 所示为 OMP 算法在稀疏度未知情况下，不同迭代次数下的残差与误差范数的变化曲线，仿真参数设置为总用户个数 $K=20$ ，活跃用户数 $M=4$ ，扩展序列长度 $N=15$ 。

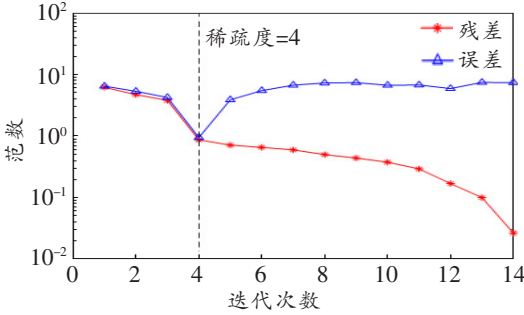


图 1 不同迭代次数下残差和误差范数变化曲线

由图可知，残差范数随迭代次数的增加逐渐下降，在迭代次数=稀疏度时，有一明显下降趋势，之后稳步下降；在迭代次数>稀疏度后，实际上是将噪声误判成了其他用户信号导致残差范数仍在下降，故残差范数会随支撑集个数的增加而持续下降，并不能找到残差范数的一个最优阈值作为迭代停止条件，但残差范数可保证支撑集中选择的原子不重复，它又是不可或缺的。而观察误差范数的变化趋势很容易发现，当迭代次数=稀疏度时误差达到最小值，故可利用这一特点作为迭代停止的条件。基于 OMP 算法利用验证误差作为迭代停止条件，无需预知稀疏度信息，使得算法更具实际运用价值。

下面给出 VE-OMP 算法的具体步骤：

输入：接收信号 y ，等效信道矩阵 A 。

输出：用户信号估计值 $\hat{x}$ 。

(1) 初始化。 $i=0$ ，残差 $r_0=y$ ，误差 $e_0=y$ ，原子索引集合 $\Gamma_0=\emptyset$ 。

(2) 将等效信道矩阵的每列与残差进行内积运算，找出结果最大原子对应的索引，即 $u = \arg \max_k |\langle a_k, r_i \rangle|, k=1, 2, \dots, K$ ，更新 $i=i+1$ 。

(3) 扩展原子索引集合 $\Gamma_{\text{new}} = \Gamma_{i-1} \cup u$ 。

(4) 求用户信号 x 当前的最小二乘 (Least Squares, LS) 近似解， $\hat{x}_{\text{new}} = (A_{\Gamma_{\text{new}}}^T A_{\Gamma_{\text{new}}})^{-1} A_{\Gamma_{\text{new}}}^T y$ 。

(5) 计算残差和误差。 $r_{\text{new}} = y - A_{\Gamma_{\text{new}}} \hat{x}_{\text{new}}$ ，

$$e_{\text{new}} = y - A_{\Gamma_{\text{new}}} Q(\hat{x}_{\text{new}})。$$

(6) 验证误差范数。若 $\|e_{\text{new}}\|_2 > \|e_{i-1}\|_2$ ，则停止迭代转到第(8)步，否则转到第(7)步。

(7) 更新原子索引集合、用户信号、残差和误差，即 $\Gamma_i = \Gamma_{\text{new}}$ ， $\hat{x}_i = \hat{x}_{\text{new}}$ ， $r_i = r_{\text{new}}$ ， $e_i = e_{\text{new}}$ 。返回第(2)步。

(8) 输出用户信号 $\hat{x}$ 。

原子索引集合 Γ_i 为选择原子的索引集合，当迭代停止后，它就等于用户信号的支撑集；步骤(2)中 a_k 为等效信道矩阵 A 的第 k 列；公式 $u = \arg \max_k |\langle a_k, r_i \rangle|$ 中，符号 $\langle \cdot \rangle$ 为内积运算， $\arg \max$ 为 $|\langle a_k, r_i \rangle|$ 取得最大值时对应的 k 值；步骤(4)中 $A_{\Gamma_{\text{new}}}$ 为取等效信道矩阵 A 中列索引为 Γ_{new} 的子矩阵。

为了确保稀疏信号恢复的性能，停止准则的设计是至关重要的。目前一些将稀疏度自适应的匹配追踪算法运用于非正交多址系统的文献，均是利用经验或多次实验选出一个合适的迭代停止阈值。例如文献[12]中，接收端在信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 为 2、4、6 和 8 dB 时，通过多次测试选择了对应的合理阈值为 0.51、0.48、0.38 和 0.28。实际通信系统中接收端的 SNR 会有较大变动，具体选择阈值并不实际，相比于这类基于门限判决的迭代停止方法，本文所提基于误差验证的方法灵活性更好，无需根据不同的 SNR 而设置对应的迭代停止阈值，更适用于实际的通信系统。

此外，表 1 所示为对 OMP、VE-OMP 及 SAMP 算法的复杂度分析，表中 K 为总用户数， N 为扩展序列长度， M 为活跃用户数， m 为第 m 次迭代， $m=1, 2, \dots, M$ 。这 3 个算法复杂度占比最大的是步骤(2)，该步涉及的内积运算相当于计算 $A^T r_i$ ，涉及 KN 次复数乘法。所提 VE-OMP 算法相比于 OMP 算法在步骤(5)增加了误差计算，误差计算的复杂度与残差相同为 $O(mN)$ 。SAMP 算法先进行支撑集估计后再进行支撑集修剪，该算法涉及两次 LS 估计，且在支撑集估计后，支撑集中所含原子个数 $> m$ ，再经支撑集修剪后才等于 m ，表中两次 LS 估计涉及复杂度约为 $O(2(m^3 + mN))$ 。由于活跃用户数一般不会超过总用户数的 10%，故 $K \gg M$ ，所以步骤(2)支撑集估计才是各个算法复杂度的核心。故所提 VE-OMP 算法步骤(5)增加的验证误差操作并不会影响整体算法的运行效率，相比于 OMP 算法复杂度略微增加同时低于 SAMP 算法，但却实现了稳定的稀疏度自适应估计。

表 1 算法复杂度分析

算法	单次迭代涉及复数乘法的次数	总迭代涉及复数乘法的次数
OMP	$KN + m^3 + mN$	$MKN + \left[\frac{M(M+1)}{2} \right]^2 + \frac{M(M+1)}{2}N$
VE-OMP	$KN + m^3 + 2mN$	$MKN + \left[\frac{M(M+1)}{2} \right]^2 + M(M+1)N$
SAMP	$KN + 2m^3 + 2mN$	$MKN + \frac{[M(M+1)]^2}{2} + M(M+1)N$

2.2 VE-BOMP 算法

上一小节是在单天线场景下实现的,但实际会面对基站配备多根天线的更复杂通信场景,该场景是大规模机器类通信的常见情况,发送短数据包的机器通常配备单根天线,同时基站为了提高检测性能而配备多根天线,即单输入多输出(Single Input Multiple Output, SIMO)模型。本节将验证误差的方法用于块稀疏 CS 算法,借此验证验证误差的方法移植性强。

本节的 VE-BOMP 算法针对多天线提出,即送入算法的接收信号为式(3)。

VE-BOMP 算法的具体步骤如下:

输入:接收信号 $\mathbf{p}$, 扩展矩阵 $\mathbf{D}$ 。

输出:用户信号估计值 $\hat{\mathbf{x}}$ 。

(1) 初始化。 $i=0$, 残差 $\mathbf{r}_0=\mathbf{p}$, 误差 $\mathbf{e}_0=\mathbf{p}$, 原子索引集合 $\Gamma_0=\emptyset$ 。

(2) 将扩展矩阵 $\mathbf{D}$ 的每个子块与残差范数进行内积运算, 找出结果最大原子对应的子块索引, 即 $\Lambda=\max_k(|\langle \mathbf{D}[k], \mathbf{r}_i \rangle|), k=1, 2, \dots, K$, 更新 $i=i+1$ 。

(3) 计算候选原子索引集合 $\Gamma_{\text{new}}=\Gamma_{i-1} \cup \Lambda$ 。

(4) 求当前迭代的恢复信号 $\hat{\mathbf{s}}$ 的 LS 近似解, $\hat{\mathbf{s}}[\Gamma_{\text{new}}]=\left(\mathbf{D}[\Gamma_{\text{new}}]\right)^{\dagger} \mathbf{p}, \hat{\mathbf{s}}[\{1, 2, \dots, K\} \backslash \Gamma_{\text{new}}]=0$ 。

(5) 计算残差, $\mathbf{r}_{\text{new}}=\mathbf{p}-\mathbf{D}\hat{\mathbf{s}}$ 。

(6) 计算误差, $\mathbf{e}_{\text{new}}=\mathbf{p}-\mathbf{D} \cdot \mathbf{Q}(\hat{\mathbf{s}})$ 。

(7) 验证误差范数。若 $\|\mathbf{e}_{\text{new}}\|_2>\|\mathbf{e}_{i-1}\|_2$, 则停止迭代转到第(9)步, 否则转到第(8)步。

(8) 更新原子索引集合、残差范数和误差范数, 即 $\Gamma_i=\Gamma_{\text{new}}, \mathbf{r}_i=\mathbf{r}_{\text{new}}, \mathbf{e}_i=\mathbf{e}_{\text{new}}$ 。

(9) 取上一级迭代计算的用户信号 $\hat{\mathbf{s}}$ 。

(10) $\hat{\mathbf{s}}$ 中每 R 个元素取平均归成一个元素得到 $\hat{\mathbf{x}}$ 。

上述步骤(2)中, $\mathbf{D}[k]$ 为 $\mathbf{D}$ 的第 k 个子块, $\mathbf{D}$ 按列划分, 每 R 列为一子块,

$$\mathbf{D}=\mathbf{A} \otimes \mathbf{I}_R=\left[\begin{array}{ccc} \mathbf{A}(1,1) \mathbf{I}_R & \mathbf{A}(1,2) \mathbf{I}_R & \cdots & \mathbf{A}(1,K) \mathbf{I}_R \\ \mathbf{A}(2,1) \mathbf{I}_R & \mathbf{A}(2,2) \mathbf{I}_R & \cdots & \mathbf{A}(2,K) \mathbf{I}_R \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \underbrace{\mathbf{A}(N,1) \mathbf{I}_R}_{\mathbf{D}[1]} & \underbrace{\mathbf{A}(N,2) \mathbf{I}_R}_{\mathbf{D}[2]} & \cdots & \underbrace{\mathbf{A}(N,K) \mathbf{I}_R}_{\mathbf{D}[K]} \end{array}\right]。$$

需要说明的是, 步骤(3)支撑集中包含的是步骤(2)中扩展矩阵子块的序号, 其虽不是一般定义的支撑集, 但为了统一其共性, 这里不加区分地也称其为支撑集。

本文所提 VE-BOMP 算法成功地将多天线问题转化为块稀疏信号的恢复问题, 并将验证误差的思想有效地移植到块稀疏恢复算法的迭代停止判断, 实现了多天线场景下块稀疏自适应的多用户检测。

3 仿真结果及分析

3.1 仿真条件

仿真信道为理想信道, 系统内潜在用户总数为 $K=40$, 扩展序列长度 $N=25$, 即过载率为 160%, 扩频矩阵选用托普利兹矩阵。采用正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)调制方式, 由于不活跃用户发送符号设定为 0, 故复星座集

$$\mathbf{X}=\left\{0, \frac{1}{\sqrt{2}}(1+i), \frac{1}{\sqrt{2}}(1-i), \frac{1}{\sqrt{2}}(-1+i), \frac{1}{\sqrt{2}}(-1-i)\right\}。$$

本文所述算法均联合检测用户行为和数据, 故用误符号率(Symbol-Error-Rate, SER)进行性能分析, 用户行为错误和数据错误均能由 SER 体现。

3.2 仿真结果分析

图 2 所示为活跃用户数 $M=4$ 时, 采用 OMP、SAMP 和 VE-OMP 算法进行仿真的结果, 其中 OMP 算法给定稀疏度, VE-OMP 算法稀疏度未知。图中, SAMP-1 为统一将迭代停止阈值设置为噪声方差的情况, SAMP-2 为根据 SNR 具体选择迭代停止阈值的情况。由图可知, 所提 VE-OMP 算法与 OMP 算法性能相当, 优于 SAMP-1 的性能, 虽然比 SAMP-2 的性能稍差, 但其能有效避免根据不同 SNR 设置不同阈值的缺陷。一方面, OMP 算法只能在活跃用户个数已知的情况下使用, 这一条件在实际使用中十分受限, VE-OMP 算法可实现稀疏度自适应, 相比之下更具优势, 实用性更高; 另一方面,

SAMP 算法的性能很大程度上取决于迭代停止阈值的选定,更优的阈值会带来更好的性能,VE-OMP 算法相比于 SAMP 算法结束判断更加简便,虽然性能略差于 SAMP 算法,但 VE-OMP 算法无需在实际中具体选择迭代停止阈值,灵活性更高。

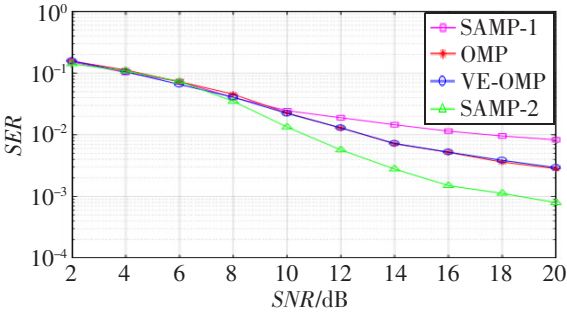


图 2 不同算法的 SER 性能曲线

图 3 所示为接收端的天线数 $R=1, 2$ 和 4 时,在单天线场景下采用 VE-OMP 算法和在多天线场景下采用 VE-BOMP 算法仿真系统的 SER 性能曲线。由图可知,两天线相比于单天线性能就已经可以得到很大的提升,随着天线数的增加, SER 性能越来越好,这是由于将发送符号重复重组为块稀疏结构,使用块稀疏 CS 算法更好地利用了信号的稀疏性。

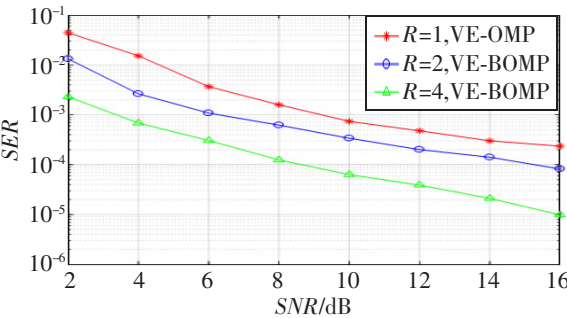


图 3 不同接收天线数下 SER 性能曲线

图 4 所示为 $SNR=10$ dB 时,不同过载率和接收天线个数时的 SER 性能曲线图。由图可知,随着

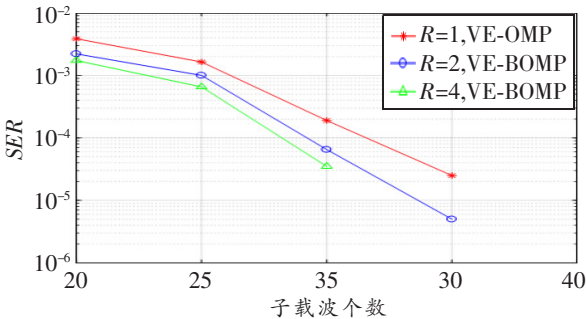


图 4 不同过载率、不同接收天线个数时的 SER 性能曲线

子载波个数的增大,过载率减小,各种情况下 SER 均降低。当固定子载波个数时, SER 将随天线数的增加而降低。

4 结束语

本文提出了基于 OMP 算法、利用验证误差作为 OMP 算法迭代停止条件的 VE-OMP 算法。该算法不需要提供用户稀疏度信息,可对用户进行行为和数据的联合检测,能够达到与 OMP 算法相当的性能,相比于必须已知用户稀疏度的 OMP 算法实用性更强。且相比于需要在实际中具体选定迭代停止阈值的 SAMP 算法,验证误差结束迭代的方法更加方便灵活,故 VE-OMP 算法更适用于上行免调度的 MUSA 系统。并且验证误差的方法移植性高,可适用于块稀疏 CS 算法,本文创新性地将发送信号向量重复后变换成块稀疏结构,将变换后的信号送入 VE-BOMP 算法,解决了多天线系统下的稀疏多用户检测,误码率随天线数的增加而降低,该算法能够提供更好的检测可靠性,可适应 5G 海量连接的场景。

参考文献:

- [1] Zhang Y, Guo Q, Wang Z, et al. Block Sparse Bayesian Learning based Joint User Activity Detection and Channel Estimation for Grant-Free NOMA Systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(10):9631–9640.
- [2] Dai L, Wang B, Yuan Y, et al. Non-orthogonal Multiple Access for 5G: Solutions, Challenges, Opportunities, and Future Research Trends[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(9):74–81.
- [3] Li T, Yan C, Li W, et al. On Uplink Non-orthogonal Multiple Access for 5G: Opportunities and Challenges [J]. China Communications, 2017, 14(12):142–152.
- [4] Wang B, Dai L, Mir T, et al. Joint User Activity and Data Detection based on Structured Compressive Sensing for NOMA[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(7):1473–1476.
- [5] He K, Li Y, Yin C. Sparse Multi-user Detection for Non-orthogonal Multiple Access in 5G Systems[C]// 2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). Valencia, Spain: IEEE, 2016: 7794930.
- [6] Schepker H F, Dekorsy A. Sparse Multi-user Detection for CDMA Transmission Using Greedy Algo-

rithms[C]// 2011 8th International Symposium on Wireless Communication Systems. Aachen, Germany: IEEE, 2011:291—295.

[7] Wang B, Dai L, Yuan Y, et al. Compressive Sensing based Multi-user Detection for Uplink Grant-Free Non-orthogonal Multiple Access[C]// Vehicular Technology Conference. Boston, MA, USA: IEEE, 2015: 7390876.

[8] Wang B, Dai L, Yuan Z, et al. Dynamic Compressive Sensing-based Multi-user Detection for Uplink Grant-Free NOMA [J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(11):2320—2323.

[9] 张男,龚磊,翟旭平. M2M 通信系统下基于压缩感知的多用户检测技术[J]. 电子测量技术, 2018(15):72—77.

[10] Fan F. Toeplitz-Structured Measurement Matrix Construction for Chaotic Compressive Sensing[C]// Fifth International Conference on Intelligent Control & Information Processing. Dalian, China: IEEE, 2015: 7010279.

[11] Do T T, Gan L, Nguyen N, et al. Sparsity Adaptive Matching Pursuit Algorithm for Practical Compressed Sensing[C]// 2008 42nd Asilomar Conference on Signals, Systems & Computers. Pacific Grove, CA, USA: IEEE, 2008:581—587.

[12] Du Y, Dong B, Zhu W, et al. Joint Channel Estimation and Multiuser Detection for Uplink Grant-Free NOMA[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2018, 7(4):682—685.

~~~~~

(上接第 53 页)

[3] Xu F, Wu K. Guided-Wave and Leakage Characteristics of Substrate Integrated Waveguide [J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2005, 5(1):66—73.

[4] Hong W, Liu B, Wang Y, et al. Half Mode Substrate Integrated Waveguide: A New Guided Wave Structure for Microwave and Millimeter Wave Application[C]// Joint 31st International Conference on Infrared Millimeter Waves and 14th International Conference in Terahertz Electron. Shanghai, China: IEEE, 2006:18—22.

[5] Xu J, Hong W, Tang H. Half-Mode Substrate Integrated Waveguide Leaky-Wave Antenna for Millimeter-Wave Applications [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2008, 7:85—88.

[6] Liu J, Jackson D R, Long Y. Substrate Integrated Waveguide (SIW) Leaky-Wave Antenna with Transverse Slots [J]. IEEE Trans Antennas Propag, 2012, 60(1):20—29.

[7] Javanbakht N, Majedi M S, Attari A R. Periodic Leaky-Wave Antenna with Transverse Slots based on Substrate Integrated Waveguide[C]//24th Iranian Conference on Electrical Engineering. Shiraz, IRAN: IEEE, 2016:608—612.

[8] Karmokar D K, Guo Y J, Qin P Y. Forward and Backward Beam-Scanning Tri-Band Leaky-Wave Antenna [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16(1):1891—1894.

[9] Sarkar A, Adhikary M, Sharma A. Composite Right/Left-Handed based Compact and High Gain Leaky-Wave Antenna Using Complementary Spiral Resonator on HMSIW for Ku Band Applications [J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2018, 12 (8) 1310—1315.

[10] Dong Y D, Itoh T. Composite Right/Left-Handed Substrate Integrated Waveguide and Half Mode Substrate Integrated Waveguide Leaky-Wave Structures [J]. IEEE Trans Antennas Propag, 2011, 59(3):767—775.

[11] Lyu Y L, Liu X X, Wang P Y, et al. Leaky-Wave Antennas based on Non-Cutoff Substrate Integrated Waveguide Supporting Beam Scanning from Backward to Forward [J]. IEEE Trans Antennas Propag, 2016, 64(6):2155—2164.

[12] Liu L, Gu X, Zhu L, et al. A Novel Half Mode Substrate Integrated Waveguide Leaky-Wave Antenna with Continuous Forward-to-Backward Beam Scanning Functionality[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2018, 28(9):e21559.

[13] Ranjan R, Ghosh J. Half Mode Substrate Integrated Waveguide based Leaky Wave Antenna for Frequency Beam Scanning[C]// InCAP 2018. Hyderabad, India: IEEE, 2018:1—3.