基于稀疏感知有序干扰消除的大规模机器类通信系统多用户检测

申 滨* 吴和彪 赵书锋 崔太平

(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

摘 要：在大规模机器类通信(mMTC)系统中，以用户活跃性为先验信息，接收机可以基于稀疏感知最大后验概率(S-MAP)准则来检测多用户信号。为了降低S-MAP检测的计算复杂度，基于干扰消除的思想，该文提出一种改进的活跃性感知有序正交三角分解(IA-SQRD)算法，以适用于mMTC系统上行链路多用户信号检测。IA-SQRD算法将传统的活跃性感知有序正交三角分解(A-SQRD)算法的最终解作为初始解，并额外增加迭代干扰消除操作，以进一步提高检测性能。此外，利用与改进A-SQRD算法相似的思路，该文对稀疏感知串行干扰消除(SA-SIC)、有序正交三角分解(SQRD)及数据相关的排序和正则化(DDS)算法亦进行了改进设计，分别获得了相应的改进型算法，即ISA-SIC、I-SQRD及I-DDS算法。仿真结果表明：相对于A-SQRD算法，在未显著增加计算复杂度的情况下，在系统误比特率(BER)为2.5×10^{-2}时，该文所提IA-SQRD算法可取得3 dB性能增益；并且，对于不同的活跃概率或扩频序列长度等参数配置下的mMTC系统，IA-SQRD算法相对于其它算法均表现出更优良的多用户检测性能。

关键词：多用户检测；大规模机器类通信；最大后验概率；串行干扰消除

中图分类号：TN929.5 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-5896(2020)12-2960-09

DOI: 10.11999/JEIT190994

Sparsity-aware Ordered Successive Interference Cancellation Based Multi-user Detection for Uplink mMTC

SHEN Bin WU Hebiao ZHAO Shufeng CUI Taiping

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

Abstract: In massive Machine-Type Communication (mMTC) systems, when the user activity is exploited as *a priori* information for the receiver, the Sparsity-aware Maximum A Posteriori probability (S-MAP) criterion can be used to recover the sparse multi-user vectors over the uplink mMTC systems. In order to reduce the computational complexity of S-MAP detection, based on interference cancellation mechanism, an Improved Activity-aware Sorted QR Decomposition (IA-SQRD) algorithm is proposed in this paper. The IA-SQRD algorithm utilizes the final solution of the A-SQRD algorithm as the initial solution and the iterative interference cancellation operation is performed to improve further the detection performance. Following the same philosophy in improving the A-SQRD algorithm, the conventional Sparsity-Aware Successive Interference Cancellation (SA-SIC), Sorted QR Decomposition (SQRD), and Data-Dependent Sorting and regularization (DDS) algorithms are modified to enhance the performance, respectively. Simulation results verify that compared with the A-SQRD algorithm, a 3 dB gain is achieved by the proposed IA-SQRD algorithm when the Bit Error Rate (BER) is 2.5×10^{-2}, without significantly increasing the computational complexity. In addition, given different system configurations in terms of active probability and the length of spread spectrum sequence, the proposed IA-SQRD also exhibits better performance than that of the other algorithms mentioned in this paper.

Key words: Multi-user detection; Massive Machine-Type Communication (mMTC); Maximum A Posteriori (MAP) probability; Successive interference cancellation

收稿日期：2019-12-13；改回日期：2020-06-23；网络出版：2020-07-18

*通信作者： 申滨 shenbin@cqupt.edu.cn

基金项目：国家重大研发计划(2017YFE0118900)，欧盟H2020项目(734798)

Foundation Items: The National Key R&D Program of China (2017YFE0118900), The EU H2020 Project (734798)

1　引言

近年来，大规模机器类通信(massive Machine-Type Communication, mMTC)因其广泛的应用前景备受关注，如智能计量、工厂自动化、监控及健康监测等[1]。mMTC涉及海量的机器类通信设备(或用户)接入，从用户的流量特性和行为特性角度看，mMTC具有许多与以人为中心的通信相比所不同的显著特征，例如，在mMTC系统的上行链路中，设备通常仅在短时间内是零星活跃的，并且一般仅传输具有低数据速率的短数据包[2]。

由于用户设备的海量存在，mMTC系统中同一时间内一般仅存在较低的用户活跃性，非活跃的用户不发送信息，因此，在理论上可将由活跃设备和非活跃设备的信息所组成的符号矢量建模为稀疏信号矢量。压缩感知(Compressive Sensing, CS) 技术可从接收信号中重构多用户发送的稀疏信号[3,4]，然而其缺乏在有限调制集合约束下处理稀疏信号的方法。目前，业界已提出了多种将基于压缩感知的多用户检测(Compressive Sensing-based Multi-User Detection, CS-MUD)问题转换为稀疏感知最大后验概率(Sparsity-aware Maximum A Posteriori probability, S-MAP)检测问题的典型方法。文献[5]提出了S-MAP 检测器，其主要目标是针对稀疏多用户符号向量，在零增广有限调制集合中执行最大后验概率(Maximum A Posteriori probability, MAP)准则的检测。S-MAP算法是目前 mMTC 系统信号检测的最优算法，但是其计算复杂度随着用户数目和基带信号调制阶数的增长而呈指数级上升，在实际的应用中尤其在mMTC系统中难以有效地实现[5]。与经典的球形解码器(Sphere Decoder, SD)[6]类似，文献[7]提出了稀疏感知K-Best检测器用于检测稀疏信号。文献[8,9]在未知活跃用户概率的情况下，提出了贝叶斯推理算法和迭代重加权方法。文献[10]基于MAP准则提出了一种适用于mMTC系统的活跃用户和数据的检测算法。文献[11]基于干扰消除思想提出了活跃感知多反馈串行干扰消除(Activity-Aware Multiple Feedback Successive Interference Cancellation, AA-MF-SIC)算法。与串行干扰消除(Successive Interference Cancellation, SIC)[12]算法相比，这些算法具有良好的性能，但计算复杂度仍然相对较大。

为了降低S-MAP检测的复杂度，文献[13]研究了稀疏感知串行干扰消除(Sparsity-Aware Successive Interference Cancellation, SA-SIC)技术。SA-SIC是一种简单的、低复杂度的检测方案，通过自然顺序方式恢复发送信号向量。SA-SIC算法与传统的SIC算法之间的区别在于检测过程中插入了稀疏约束，目的是有益于求解S-MAP问题。SA-SIC能够以较低的复杂度检测出上行链路中发送的信号向量，但是其存在误差传播现象，由此出现的误差积累可能恶化串行检测的性能[12,13]。为了减轻误差传播并提高检测性能，在SA-SIC操作前，可对检测顺序进行排序。有序正交三角分解(Sorted QR Decomposition, SQRD)及数据相关排序和正则化(Data-Dependent Sorting and regularization, DDS)算法确保在早期层中先检测具有高信噪增益的用户，减小了误差传递的可能性。其中，DDS算法的原理是将SQRD与稀疏信号的特性相结合，基于接收向量和信道矩阵之间的相关性来缩放正则化参数，可以适当地提高SA-SIC的性能[13]。

对于mMTC系统而言，面对多用户信号向量的稀疏性以及各个设备所具有的不同的活跃概率，仅由信道增益确定的检测顺序可能不是最优的。由于异构化的流量需求，每个机器类通信(Machine-Type Communication, MTC)用户一般具有不同的活跃概率[14]，在此情况下，检测顺序的确定应包含用户的(异构)活跃概率因素。活跃性感知有序正交三角分解 (Activity-aware Sorted QR Decomposition, A-SQRD) 算法[15]与其它检测方法的不同之处即在于检测顺序由信道增益和设备的活跃概率共同确定，通过找到最优检测顺序来减轻误差传播，并提高SA-SIC的性能。另外，文献[15]中用到了量化的最小均方误差(Minimum Mean Square Error, MMSE)算法，然而，对于诸如mMTC的欠定系统而言，MMSE算法的性能较差。值得说明的是，前述文献和本文研究内容的一个重要假设是上行链路上的各个用户均处于严格的同步状态。文献[16,17]中介绍了异步mMTC场景的解决方案，用户信号由于机器节点的分布式工作特性，可能难以保证多用户同步通信。异步情况下的检测问题与同步条件下的检测问题所不同的是，前者需要联合检测各个用户设备活跃性、时延、信道增益及传输符号。采用的是多阶段传输方案，第1阶段，活跃的用户设备发送导频序列到基站，然后基站联合检测设备的活跃性、活跃设备的时延及信道增益；第2阶段，设定一个保护间隔，在保护间隔里活跃的设备不发送数据给基站；第3阶段，活跃设备发送数据给基站，基站根据第1阶段获得的设备活跃性、时延及信道增益解码活跃用户的数据。如此操作的益处是，不同于同步传输，可利用稀疏性及异步的特征来联合检测设备活跃性、时延及信道增益，从而既可以获得信道增益条件，又能避免所有的用户都同

步这一假设。针对异步传输的方案，同样可以以压缩感知及干扰消除方法为基础，结合其他相关算法进行联合处理。

本文提出一种适用于mMTC系统上行链路的、改进型的活跃性感知有序正交三角分解(Improved Activity aware Sorted QR Decomposition, IA-SQRD) 算法。IA-SQRD算法将A-SQRD算法的最终解作为初始解，依靠稀疏感知机制及额外的迭代干扰消除操作，进一步提高mMTC系统多用户检测性能。此外，采用与A-SQRD算法相似的改进方法，本文分别对SA-SIC, SQRD及DDS等一系列典型检测算法进行改进，得到了改进的稀疏感知串行干扰消除(Improved Sparsity-Aware Successive Interference Cancellation, ISA-SIC)算法、改进的有序正交三角分解(Improved Sorted QR Decomposition, I-SQRD)算法以及改进的数据相关的排序和正则化(Improved Data-Dependent Sorting and regularization, I-DDS)算法。需要说明的是，本文所提出的算法可作为mMTC系统上行链路多用户信号检测的有效解决方案之一，且该系统需要具有以下特征[8,15]：(1)所有用户在时间上是同步的，即各个用户均在相同的时隙中改变活跃状态；(2)用户数目很多，每个用户以不同的概率表现活跃性，活跃概率低，且每个用户之间相互独立；(3)利用用户的低活跃性这一特性，可以设计扩频序列的长度小于总用户数。仿真验证表明，本文中设计的4种改进算法均优于其各自对应的传统算法，并且IA-SQRD算法在性能上皆优于其它3种算法。

2 系统模型

考虑mMTC系统上行链路，其中有1个基站和N个用户，基站和用户都配置单天线[8,15]。假设用户在时间上是同步的，即所有用户在相同的时隙中改变活跃状态，并且从零增广有限调制集合中选取调制符号，每个用户的符号使用长度为M的特定序列进行扩频。信道的冲激响应为$\boldsymbol{l}=[l_1,l_2,\cdots,l_N]^{\mathrm{T}}$，扩频序列为$\boldsymbol{s}_n=[s_{1,n},s_{2,n},\cdots,s_{M,n}]^{\mathrm{T}},n=1,2,\cdots,N$，信道矩阵$\boldsymbol{H}=[\boldsymbol{h}_1,\boldsymbol{h}_2,\cdots,\boldsymbol{h}_N]$是融合了扩频信息和用户与基站之间的信道冲激响应的$M\times N$的复高斯矩阵。在该系统设置中，基站的接收信号可以描述为[15]

$$\boldsymbol{y}=\boldsymbol{H}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{w} \tag{1}$$

其中，$\boldsymbol{y}=[y_1,y_2,\cdots,y_M]^{\mathrm{T}}$是接收信号矢量，$\boldsymbol{x}=[x_1,x_2,\cdots,x_N]^{\mathrm{T}}$是所有用户(包括活跃和非活跃用户)的符号向量，$\boldsymbol{w}$是均值为0、方差为$\sigma_w^2$的复高斯噪声向量。当第$n$个用户活跃时，符号$x_n$从等概率有限调制集合$\boldsymbol{A}$中取值，例如正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)星座点集合，否则其值为0，且设定增广调制集合为$\boldsymbol{A}_0=\boldsymbol{A}\cup\{0\}$。当$M<N$时，该系统通常建模为欠定系统。可将S-MAP方法应用到式(1)中并检测向量x。

3 稀疏感知串行干扰消除(SA-SIC)

3.1 稀疏感知最大后验概率(S-MAP)检测算法

S-MAP检测的主要目标是从零增广有限调制集合$\boldsymbol{A}_0$中执行稀疏多用户向量的最大后验概率检测[5]，即在给定矩阵$\boldsymbol{H}$的情况下，从接收矢量$\boldsymbol{y}$中检测上行链路中传输的矢量$\boldsymbol{x}$，其中，$M<N$。传输信号$\boldsymbol{x}$和接收信号$\boldsymbol{y}$的联合概率分布为

$$\Pr(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})=\Pr(\boldsymbol{x}|\boldsymbol{y})\Pr(\boldsymbol{y})=\Pr(\boldsymbol{y}|\boldsymbol{x})\Pr(\boldsymbol{x}) \tag{2}$$

S-MAP检测器所检测的发送信号矢量$\hat{\boldsymbol{x}}$，可以表示为

$$\begin{aligned}\hat{\boldsymbol{x}}&=\arg\max_{\boldsymbol{x}\in\boldsymbol{A}_0^N}\Pr(\boldsymbol{x}|\boldsymbol{y})\\&=\arg\min_{\boldsymbol{x}\in\boldsymbol{A}_0^N}-\ln\Pr(\boldsymbol{y}|\boldsymbol{x})-\ln\Pr(\boldsymbol{x})\end{aligned} \tag{3}$$

其中，$\boldsymbol{A}_0^N$为对应于N个用户的零增广有限调制集合。

当第n个用户以概率p_n活跃，并且对于所有用户p_n皆较小时($p_n<1/2$)，可将$\boldsymbol{x}$建模为包含许多零符号元素的稀疏向量。针对S-MAP准则，每个用户的活跃概率彼此独立，则$\boldsymbol{x}$的先验概率可表示为

$$\Pr(\boldsymbol{x})=\prod_{n=1}^{N}\Pr(x_n)=\prod_{n=1}^{N}(1-p_n)^{1-|x_n|_0}(p_n/|\boldsymbol{A}|)^{|x_n|_0} \tag{4}$$

其中，$|\boldsymbol{A}|$表示集合$\boldsymbol{A}$中包含的星座点个数，$p_n/|\boldsymbol{A}|$表示集合$\boldsymbol{A}$中每一个星座点对应的符号出现的概率，$1-p_n$表示0星座点对应的符号出现的概率，$|x_n|_0$是符号元素x_n的l_0范数，如果x_n是非零值则等于1，否则其值为零。由式(3)和式(4)，可得

$$\hat{\boldsymbol{x}}=\arg\min_{\boldsymbol{x}\in\boldsymbol{A}_0^N}\|\boldsymbol{y}-\boldsymbol{H}\boldsymbol{x}\|_2^2+\sigma_w^2\sum_{n=1}^{N}\lambda_n|x_n|_0 \tag{5}$$

其中，λ_n是对应的符号元素的正则化参数，表示为$\lambda_n=\ln[(1-p_n)/(p_n/|\boldsymbol{A}|)]$, $\lambda_n>0$。

从算法本质上看，S-MAP检测的目标是在$\boldsymbol{A}_0^N$中找到最小化式(5)中所给出的成本函数的$\boldsymbol{x}$向量，其优化问题实质上是一个正则化最小二乘问题，正则化项包含了N个用户的异构活跃概率。从式(6)可看出λ_n与p_n成反比，因此，正则化项促进了$\boldsymbol{x}$的稀疏性。S-MAP检测具有数学意义上的最优检测性能，但是其求解最优解的复杂度极高，因而在实际中的应用非常受限。

3.2 稀疏感知串行干扰消除(SA-SIC)检测算法

S-MAP检测复杂度极高，为了降低S-MAP检测的复杂度，SA-SIC作为一种简单的、低复杂度的次优检测方案，通过自然顺序的方式恢复发送符号$\hat{x}$[13]。式(5)中的成本函数还包含额外的正则化项$\sigma_w^2\sum_{n=1}^{N}\lambda_n|x_n|_0$，因此，在检测顺序中需要考虑正则化参数$\lambda_n$和噪声方差$\sigma_w^2$。考虑QPSK调制，由于相移键控星座点具有恒模特性($\|\boldsymbol{x}\|_0=\|\boldsymbol{x}\|_2^2=\|\boldsymbol{x}\|_p^p, p\geq 1$)[5]，其中，$\|\boldsymbol{x}\|_p=\left(\sum_{i=1}^{n}|x_i|^p\right)^{1/p}$，式(5)中若用$l_2$范数替换$l_0$范数，可得

$$\begin{aligned}\hat{\boldsymbol{x}}&=\arg\min_{\boldsymbol{x}\in\boldsymbol{A}_0^N}\|\boldsymbol{y}-\boldsymbol{H}\boldsymbol{x}\|_2^2+\sigma_w^2\sum_{n=1}^{N}\lambda_n|x_n|_0\\&=\arg\min_{\boldsymbol{x}\in\boldsymbol{A}_0^N}\|\boldsymbol{y}-\boldsymbol{H}\boldsymbol{x}\|_2^2+\left\|\sigma_w\mathrm{diag}(\sqrt{\boldsymbol{\lambda}})\boldsymbol{x}\right\|_2^2\\&=\arg\min_{\boldsymbol{x}\in\boldsymbol{A}_0^N}\left\|\begin{bmatrix}\boldsymbol{y}\\\boldsymbol{0}_N\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}\boldsymbol{H}\\\sigma_w\mathrm{diag}(\sqrt{\boldsymbol{\lambda}})\end{bmatrix}\boldsymbol{x}\right\|_2^2\\&=\arg\min_{\boldsymbol{x}\in\boldsymbol{A}_0^N}\|\boldsymbol{y}_0-\boldsymbol{H}'\boldsymbol{x}\|_2^2\end{aligned}\tag{6}$$

其中，$\boldsymbol{y}_0\in C^{M+N}$是零增广接收向量，$\boldsymbol{H}'\in C^{(M+N)\times N}$是增广系统的等效信道矩阵，$\boldsymbol{\lambda}=[\lambda_1,\lambda_2,\cdots,\lambda_N]^{\mathrm{T}}$是$N$个用户的正则化参数向量，$\mathrm{diag}(\sqrt{\boldsymbol{\lambda}})$是将向量$\sqrt{\boldsymbol{\lambda}}$转化为对角矩阵的对角化算子。本文将矩阵的正交三角分解与Schmidt正交化综合运用[13,15]，对式(6)中矩阵$\boldsymbol{H}'$作QR分解，即$\boldsymbol{H}'=\boldsymbol{Q}\boldsymbol{R}$，其中$\boldsymbol{Q}$是$(M+N)\times N$酉矩阵，$\boldsymbol{R}$是$N\times N$上三角矩阵，则式(6)转化为

$$\begin{aligned}\hat{\boldsymbol{x}}&=\arg\min_{\boldsymbol{x}\in\boldsymbol{A}_0^N}\|\boldsymbol{y}_0-\boldsymbol{H}'\boldsymbol{x}\|_2^2\\&=\arg\min_{\boldsymbol{x}\in\boldsymbol{A}_0^N}\|\boldsymbol{y}_0-(\boldsymbol{Q}\boldsymbol{R})\boldsymbol{x}\|_2^2\\&=\arg\min_{\boldsymbol{x}\in\boldsymbol{A}_0^N}\left\|\boldsymbol{Q}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{y}_0-\boldsymbol{Q}^{\mathrm{H}}(\boldsymbol{Q}\boldsymbol{R})\boldsymbol{x}\right\|_2^2\\&=\arg\min_{\boldsymbol{x}\in\boldsymbol{A}_0^N}\|\tilde{\boldsymbol{y}}-\boldsymbol{R}\boldsymbol{x}\|_2^2\\&=\arg\min_{\boldsymbol{x}\in\boldsymbol{A}_0^N}\sum_{n=1}^{N}\left[\left|\tilde{y}_n-\sum_{l=n}^{N}R_{nl}x_l\right|^2\right]\end{aligned}\tag{7}$$

其中，$\tilde{\boldsymbol{y}}=\boldsymbol{Q}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{y}_0$，由于要求对所有$n$求和的结果取最小值，因此每个求和函数可以分别最小化得到

$$\begin{aligned}\hat{x}_n&=\arg\min_{x_n\in\boldsymbol{A}_0}\sum_{n=1}^{N}\left[\left|\tilde{y}_n-\sum_{l=n}^{N}R_{nl}x_l\right|^2\right]\\&=\arg\min_{x_n\in\boldsymbol{A}_0}\sum_{n=1}^{N}\left[\left|\tilde{y}_n-R_{nn}x_n-\sum_{l=n+1}^{N}R_{nl}\hat{x}_l\right|^2\right]\end{aligned}\tag{8}$$

将$x_n\in\boldsymbol{A}_0$上的符号成本函数$\boldsymbol{d}_{x_n}=\left|\tilde{y}_n-R_{nn}x_n-\sum_{l=n+1}^{N}R_{nl}\hat{x}_l\right|^2$最小化，即可得到最优解$\hat{x}_n$，且最小化取决于已判决的符号$\hat{x}_l(l>n)$，因此，检测过程从最高层开始顺序减小到最低层，其中$n=N,\cdots,2,1$。SA-SIC检测算法的主要缺点是检测性能严重地受早期检测层的误差传播影响，选择适当的检测顺序对于减轻误差传播至关重要。

4 稀疏感知有序干扰消除

4.1 改进型活跃性感知有序正交三角分解(IA-SQRD)检测算法

基于干扰消除思想，本节提出一种适用于mMTC系统上行链路的、改进的活跃性感知有序正交三角分解(Improved Activity-aware Sorted QR Decomposition, IA-SQRD)算法。针对式(6)，IA-SQRD算法首先找到增广信道矩阵$\boldsymbol{H}'$的列的最优置换和相应的QR分解，以便在早期层中先检测具有高信噪增益的用户。矩阵$\boldsymbol{H}'$的QR分解为$\boldsymbol{H}'\boldsymbol{P}=\boldsymbol{Q}\boldsymbol{R}$，其中$\boldsymbol{P}$是二进制置换矩阵。为了找到最优置换，可采用改进的Gram-Schmidt算法[18]并将其扩展，以便在每个正交化步骤之前重新对$\boldsymbol{H}'$的列排序。

IA-SQRD算法的详细步骤如下：首先，设置$\boldsymbol{Q}=\boldsymbol{H}'$, $\boldsymbol{R}=\boldsymbol{0}_{N\times N}$；其次，第$n$次迭代中可以确定$\boldsymbol{q}_j(j=n+1,\cdots,N-1,N)$的最小$l_2$范数的列索引；然后，分别将$\boldsymbol{Q}$, $\boldsymbol{R}$和$\boldsymbol{P}$中的第n列与对应于最小范数的列交换；在交换列后，将R_{nn}设置为$\|\boldsymbol{q}_n\|$并将$\boldsymbol{q}_n$归一化。以该方式对$\boldsymbol{R}$的对角元素排序可得$R_{ii}<R_{nn}(i<n)$，因此，在早期层中检测的用户信噪增益更高。在对列排序后执行列的正交化，使得$\boldsymbol{q}_{n+1},\cdots,\boldsymbol{q}_{N-1},\boldsymbol{q}_N$相对于$\boldsymbol{q}_n$正交(即, $\boldsymbol{q}_j\perp\boldsymbol{q}_n$)，其中$R_{nj}=\boldsymbol{q}_n^{\mathrm{H}}\boldsymbol{q}_j$, $\boldsymbol{q}_j=\boldsymbol{q}_j-R_{nj}\boldsymbol{q}_n$。在找到$\boldsymbol{H}'$的列的最优置换和相应的QR分解$\boldsymbol{H}'\boldsymbol{P}=\boldsymbol{Q}\boldsymbol{R}$后，式(6)转化为

$$\begin{aligned}\hat{\boldsymbol{x}}&=\arg\min_{\boldsymbol{x}\in\boldsymbol{A}_0^N}\left\|\boldsymbol{y}_0-\boldsymbol{Q}\boldsymbol{R}\boldsymbol{P}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{x}\right\|_2^2\\&=\arg\min_{\boldsymbol{x}\in\boldsymbol{A}_0^N}\left\|\tilde{\boldsymbol{y}}_0-\boldsymbol{R}\boldsymbol{P}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{x}\right\|_2^2\end{aligned}\tag{9}$$

其中，$\tilde{\boldsymbol{y}}_0=\boldsymbol{Q}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{y}_0$。与式(7)和式(8)类似，可将式(9)分解为$N$个符号成本函数的总和，则最优解$\hat{x}_n$可表示为

$$\hat{x}_n=Q_{\boldsymbol{A}_0}(x_n')\tag{10}$$

其中，$x_n'=\left(\tilde{y}_{0,n}-\sum_{l=n+1}^{N}R_{nl}\hat{x}_l\right)/R_{nn}$，$Q_{\boldsymbol{A}_0}(\cdot)$是量化函数，其作用是将输入映射到$\boldsymbol{A}_0$中与该输入距离最近的星座点。最后，$\hat{\boldsymbol{x}}$通过右乘$\boldsymbol{P}^{\mathrm{H}}$(去排序)后得到最终解。

IA-SQRD算法将A-SQRD算法的最终解作为初始解，并额外增加了迭代干扰消除操作，以进一步提高检测性能。具体地，令$\boldsymbol{s}=\hat{\boldsymbol{x}}$，其中$\boldsymbol{s}=[s_1,s_2,\cdots,s_N]^{\mathrm{T}}$为$N$个用户的发送信号矢量，式(1)可表示为

$$\boldsymbol{y}=\boldsymbol{h}_1s_1+\boldsymbol{h}_2s_2+\cdots+\boldsymbol{h}_Ns_N+\boldsymbol{w} \tag{11}$$

其中，$\boldsymbol{h}_n,n=1,2,\cdots,N$是原信道矩阵$\boldsymbol{H}$的列向量。获得上一次迭代估计符号之后，可在接收信号矢量$\boldsymbol{y}$上展开干扰消除操作[19–21]。针对第n个用户发送的符号，首先消除来自其他用户的干扰，得到的接收信号矢量变为

$$\hat{\boldsymbol{y}}_n^{(t)}=\boldsymbol{y}-\sum_{j\neq n}\boldsymbol{h}_j\hat{s}_j^{(t-1)} \tag{12}$$

其中，t是迭代次数，$t\geq 1$。假设来自其他用户的干扰被完全消除掉，则第n个用户的符号估计在下一次迭代中可表示为

$$\begin{aligned}\hat{s}_n^{(t)}&=\frac{\boldsymbol{h}_n^{\mathrm{H}}}{\|\boldsymbol{h}_n\|^2}\hat{\boldsymbol{y}}_n^{(t)}=\frac{1}{\|\boldsymbol{h}_n\|^2}\left(\boldsymbol{h}_n^{\mathrm{H}}\boldsymbol{y}-\boldsymbol{h}_n^{\mathrm{H}}\sum_{j=1,j\neq n}^{N}\boldsymbol{h}_j\hat{s}_j^{(t-1)}\right)\\&=\frac{1}{\|\boldsymbol{h}_n\|^2}\left(\boldsymbol{h}_n^{\mathrm{H}}\boldsymbol{y}-\boldsymbol{h}_n^{\mathrm{H}}\sum_{j=1}^{N}\boldsymbol{h}_j\hat{s}_j^{(t-1)}\right)+\frac{\boldsymbol{h}_n^{\mathrm{H}}\boldsymbol{h}_n}{\|\boldsymbol{h}_n\|^2}\hat{s}_n^{(t-1)}\end{aligned} \tag{13}$$

式(13)有迭代关系

$$\hat{s}_n^{(t)}=\hat{s}_n^{(t-1)}+\frac{b_n-\sum_{j=1}^{N}G_{nj}\hat{s}_j^{(t-1)}}{G_{nn}} \tag{14}$$

其中，格拉姆矩阵$\boldsymbol{G}=\boldsymbol{H}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{H}$，匹配滤波信号$\boldsymbol{b}=\boldsymbol{H}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{y}$，然后通过量化运算符$Q_{\boldsymbol{A}_0}(\cdot)$将每个用户的符号映射到$\boldsymbol{A}_0$中的距离最近点，即

$$\bar{s}_n^{(t)}=Q_{\boldsymbol{A}_0}(\hat{s}_n^{(t)}) \tag{15}$$

从而获得最终的符号判决。针对式(14)，当设置信号检测的初值在定义域内任取时，随着符号的更新，迭代产生的残差投影到矩阵$\boldsymbol{H}$列所跨越的子空间中并与矩阵$\boldsymbol{H}$的列正交，即残差的l_2范数在每次符号更新后减小[19]，因此，对于各个用户符号的迭代检测的全局收敛性得到保证。IA-SQRD检测算法的具体描述见表1中算法1。

利用与A-SQRD算法相似的改进方法，对SA-SIC, SQRD, DDS算法进行改进，得到相应的改进算法ISA-SIC, I-SQRD, I-DDS，原理均是将原算法的最终解作为初始解，并额外增加了迭代干扰消除操作，以进一步提高检测性能。

4.2 算法复杂度分析

以复数浮点运算作为评估度量，分析算法的计算复杂度。在文献[15]中比较了A-SQRD和SQRD算法的计算复杂度，并表示为

$$O_{\mathrm{A-SQRD}}=2N^3+(2M+2)N^2+(M-1)N \tag{16}$$

$$O_{\mathrm{SQRD}}=(2M+1)N^2+(M-1)N \tag{17}$$

本文提出的IA-SQRD, I-SQRD算法相对于原算法，增加了格拉姆矩阵$\boldsymbol{G}$和匹配滤波信号$\boldsymbol{b}$计算部分的复杂度，分别是MN^2, MN，以及执行t次迭代对$\hat{\boldsymbol{s}}$的估计所需增加的复杂度$t(4N^2+2N)$。因此，IA-SQRD和I-SQRD的算法复杂度可表示为

$$O_{\mathrm{IA-SQRD}}=2N^3+(3M+2+4t)N^2+(2M-1+2t)N \tag{18}$$

$$O_{\mathrm{I-SQRD}}=(3M+1+4t)N^2+(2M-1+2t)N \tag{19}$$

由式(16)—式(19)可见，IA-SQRD相对于A-SQRD算法及I-SQRD相对于SQRD算法都只是增加了与迭代次数t相关的平方阶数的复杂度，考虑到t的取

表 1 改进型活跃性感知有序正交三角分解(IA-SQRD)检测算法

输入：$\boldsymbol{y}$, $\boldsymbol{H}$, $\boldsymbol{A}_0$, σ_w^2,$\{p_n\}_{n=1}^N$

输出：$\bar{\boldsymbol{s}}^{T_{\mathrm{iter}}}$($T_{\mathrm{iter}}$为迭代次数)

(1) $\lambda_n=\ln[(1-p_n)/(p_n/|\boldsymbol{A}|)]$

(2) $\boldsymbol{y}_0=[\boldsymbol{y};\boldsymbol{0}_N]$, $\boldsymbol{Q}=[\boldsymbol{H};\sigma_w\mathrm{diag}\left(\sqrt{\boldsymbol{\lambda}}\right)]$, $\boldsymbol{R}=\boldsymbol{0}_{N\times N}$, $\boldsymbol{P}=\boldsymbol{I}_N$

(3) **for** $n=1,2,\cdots,N$ **do**

(4) $n_{\min}=\arg\min_{j=n,n+1,\cdots,N}\|\boldsymbol{q}_j\|^2$

(5) 交换$\boldsymbol{Q}$, $\boldsymbol{R}$和$\boldsymbol{P}$中的n和$n_{\min}$列

(6) $R_{nn}=\|\boldsymbol{q}_n\|$,$\boldsymbol{q}_n=\boldsymbol{q}_n/R_{nn}$

(7) **for** $j=n+1,\cdots,N-1,N$ **do**

(8) $R_{nj}=\boldsymbol{q}_n^{\mathrm{H}}\boldsymbol{q}_j$, $\boldsymbol{q}_j=\boldsymbol{q}_j-R_{nj}\boldsymbol{q}_n$

(9) **end for**

(10) **end for**

(11) $\tilde{\boldsymbol{y}}_0=\boldsymbol{Q}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{y}_0$

(12) **for** $n=N,N-1,\cdots,1$ **do**

(13) $x'_n=\left(\tilde{y}_{0,n}-\sum_{l=n+1}^{N}R_{nl}\hat{x}_l\right)/R_{nn}$

(14) $\hat{x}_n=Q_{\boldsymbol{A}_0}(x_{n'})$

(15) **end for**

(16) $\hat{\boldsymbol{x}}=\hat{\boldsymbol{x}}\boldsymbol{P}^{\mathrm{H}}$

(17) $\boldsymbol{s}=\hat{\boldsymbol{x}}$

(18) $\boldsymbol{G}=\boldsymbol{H}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{H}$, $\boldsymbol{b}=\boldsymbol{H}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{y}$

(19) **for** $t=1:T_{\mathrm{iter}}$

(20) **for** $n=1:N$

(21) $\hat{s}_n^{(t)}=\hat{s}_n^{(t-1)}+\dfrac{b_n-\sum_{j=1}^{N}G_{nj}\hat{s}_j^{(t-1)}}{G_{nn}}$

(22) $\bar{s}_n^{(t)}=Q_{\boldsymbol{A}_0}(\hat{s}_n^{(t)})$

(23) **end for**

(24) **end for**

值一般不大，$t=1$或2，因此这部分额外的计算开销相对于所获得的性能增益而言是值得的。以本文提出的改进算法IA-SQRD和I-SQRD且$t=1$时为例，表2中列出了相关检测算法所需的数值运算量。

从表2中可看出，扩频序列长度M和用户数N分别取几组不同的数值时，原算法与改进后算法的复杂度都处于相同的数量级，且增加的数值相对很小；且扩频序列长度$M=64$和用户数$N=128$时，IA-SQRD算法的复杂度相对于A-SQRD算法的复杂度增长17%，而I-SQRD算法的复杂度相对于SQRD算法的复杂度增长53%。

5　仿真及分析

针对欠定模型下的mMTC系统上行链路，其中单位范数随机序列用于扩频，用户和基站之间的传输信道假设为平坦瑞利衰落信道，信道矩阵各元素为相互独立、概率特性服从零均值、单位方差的复高斯随机变量，用户数据符号通过QPSK进行调制，以误比特率(Bit Error Rate, BER)作为检测性能指标，利用Matlab工具进行蒙特卡洛仿真。

为了与文献中的算法结果提供公平的比较，本文的仿真参数设置与文献[15]中相同。针对欠定的mMTC系统，考虑了两种不同的仿真场景：(1) 扩频序列长度为$M=64$，用户数为$N=128$; (2) 扩频序列长度为$M=128$，用户数为$N=256$。针对活跃概率$\{p_n\}_{n=1}^N$的不同取值，考虑了两种不同的区间：(1)[0.1 0.3]; (2) [0.2 0.4]。通过仿真实验，将SA-SIC, SQRD, DDS, A-SQRD, ISA-SIC, I-SQRD, I-DDS, IA-SQRD及MMSE检测算法进行对比分析。

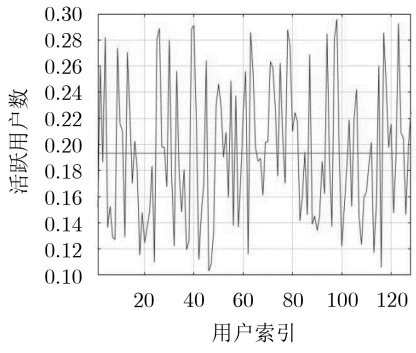
图1给出的是扩频序列长度为$M=64$，用户数为$N=128$，活跃概率$\{p_n\}_{n=1}^N$在区间[0.1 0.3]随机均匀分布时的某一单次实现情况。图1(a)给出的是各个用户分别对应的活跃概率，所有用户的平均活跃概率为0.22；图1(b)是不同实验编号下的总的活跃用户数目的变化情况，活跃用户数的变化范围近似$[128\times 0.1128\times 0.3]$，平均活跃用户数为22。

图2和图3分别给出了活跃概率$\{p_n\}_{n=1}^N$从区间[0.1 0.3]和[0.2 0.4]随机均匀取值情况下的各种检测算法性能。图2对应扩频序列长度为$M=64$，用户数为$N=128$；图3对应扩频序列长度为$M=128$，用户数为$N=256$。以SA-SIC算法的检测性能为基准，对比ISA-SIC, SQRD, I-SQRD, DDS, I-DDS, A-SQRD, IA-SQRD及MMSE检测算法。从图2和图3可看出，活跃概率取值于两种不同的区间时，本文提出的IA-SQRD算法始终是性能最优的，且在相似原理下提出的I-SQRD等改进算法，其性能相对于原算法亦有较大的提高。A-SQRD算法考虑了活跃概率和信道增益来获得最优的检测顺序，其性能相对于SQRD, DDS, SA-SIC较好。DDS和SQRD算法基于信道增益对检测顺序进行排序，其性能相对于SA-SIC有小幅度的提升。由于系统欠定，MMSE算法的性能较差。

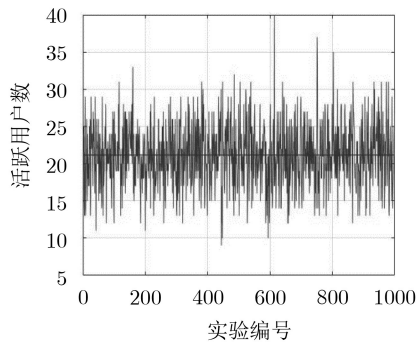
图4给出了mMTC系统上行链路信号检测的BER性能随着用户活跃概率变化的情况，其中，扩频序列长度为$M=64$，用户数为$N=128$，平均信噪比SNR设定为20 dB。以SA-SIC算法的检测性能为基准，对比SQRD, DDS, A-SQRD, IA-SQRD及MMSE检测算法。如预期的情况一样，随着用户活跃概率的提高，所有检测算法的性能均逐渐变差，

表 2　计算复杂度比较(复数浮点运算次数)

M	N	SQRD	A-SQRD	I-SQRD	IA-SQRD
16	32	3.4×10^4	1.0×10^5	5.5×10^4	1.2×10^5
32	64	2.7×10^5	7.9×10^5	4.2×10^5	9.4×10^5
64	128	2.1×10^6	6.3×10^6	3.2×10^6	7.4×10^6



(a) 各个用户分别对应的活跃概率



(b) 不同实验编号下的总的活跃用户数目的变化情况

图 1 在[0.1 0.3]区间中随机均匀分布的用户活跃概率

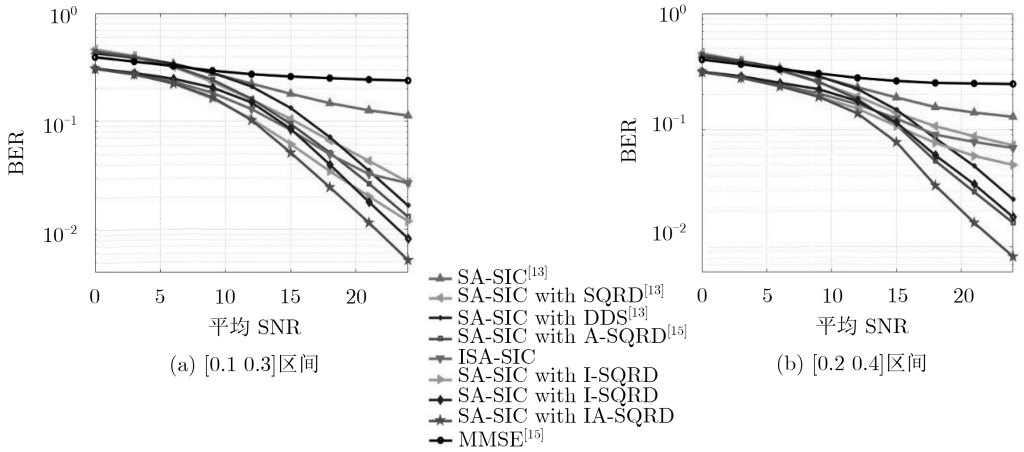


图 2 BER性能对比，64×128配置

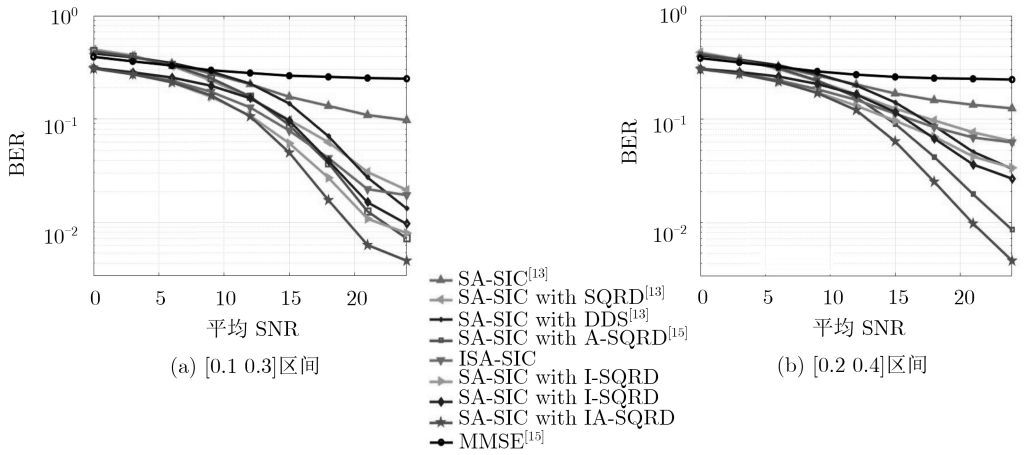


图 3 BER性能对比，128×256配置

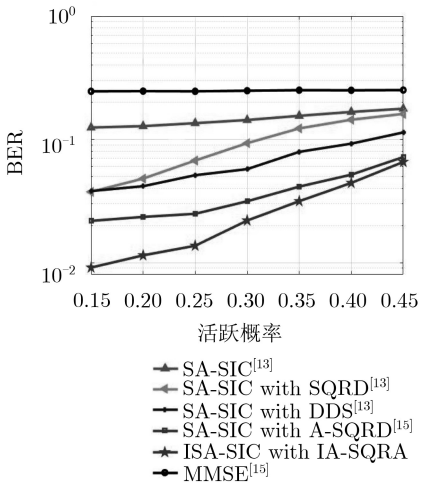


图 4 不同用户活跃概率对应的BER性能

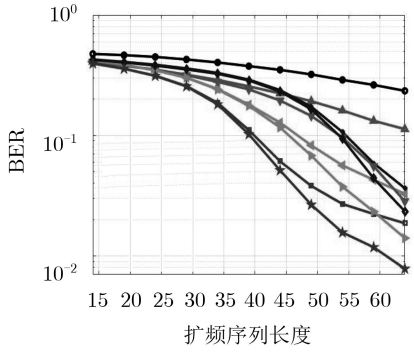


图 5 不同扩频序列长度对应的BER性能

而本文所提IA-SQRD算法始终保持其性能优于其它几种算法。

图5给出了mMTC系统上行链路信号检测的BER性能随扩频序列长度变化的情况，其中，用户数为$N = 128$，活跃用户数为22，平均信噪比设定为20 dB。容易看出，随着扩频序列长度的增加，所有算法的性能逐渐变好。与图4中的结果类似，本文所提IA-SQRD算法性能始终优于其它几种算法，且本文所提ISA-SIC, I-SQRD, I-DDS等改进算法性能相对于原算法有较大的提高。

6 结论

基于干扰消除思想，本文提出将IA-SQRD算法引入上行mMTC系统多用户信号检测，从而增强mMTC系统数据接收的性能。IA-SQRD算法将A-SQRD算法的最终解作为初始解，并额外增加了

迭代干扰消除操作，在未显著增加原算法的计算复杂度下，可进一步提高检测性能。采用与A-SQRD算法相似的改进方法，分别对SA-SIC, SQRD及DDS算法进行改进，得到了相应的ISA-SIC, I-SQRD及I-DDS算法。仿真验证结果表明IA-SQRD算法皆优于本文提及的其它几种算法的性能；相对于A-SQRD算法，在未显著增加计算复杂度的情况下，且BER为时2.5×10^{-2}，IA-SQRD算法可取得3 dB的性能增益。由于在实现复杂度与性能之间取得的良好折中，该算法可以作为mMTC系统上行链路信号检测的有效方案之一。

参 考 文 献

[1] DAWY Z, SAAD W, GHOSH A, *et al*. Toward massive machine type cellular communications[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2017, 24(1): 120–128. doi: 10.1109/MWC.2016.1500284WC.

[2] GHAVIMI F and CHEN H H. M2M communications in 3GPP LTE/LTE-A networks: Architectures, service requirements, challenges, and applications[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17(2): 525–549. doi: 10.1109/COMST.2014.2361626.

[3] SHIM B and SONG B. Multiuser detection via compressive sensing[J]. *IEEE Communications Letters*, 2012, 16(7): 972–974. doi: 10.1109/LCOMM.2012.050112.111980.

[4] CHOI J W, SHIM B, DING Yacong, *et al*. Compressed sensing for wireless communications: useful tips and tricks[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(3): 1527–1550. doi: 10.1109/COMST.2017.2664421.

[5] ZHU Hao and GIANNAKIS G B. Exploiting sparse user activity in multiuser detection[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2011, 59(2): 454–465. doi: 10.1109/TCOMM.2011.121410.090570.

[6] BARIK S and VIKALO H. Sparsity-aware sphere decoding: algorithms and complexity analysis[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(9): 2212–2225. doi: 10.1109/TSP.2014.2307836.

[7] KNOOP B, MONSEES F, BOCKELMANN C, *et al*. Compressed sensing K-best detection for sparse multi-user communications[C]. The 22nd European Signal Processing Conference, Lisbon, Portugal, 2014: 1726–1730.

[8] ZHANG Xiaoxu, LIANG Yingchang, and FANG Jun. Novel Bayesian inference algorithms for multiuser detection in M2M communications[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(9): 7833–7848. doi: 10.1109/TVT.2017.2692776.

[9] ZHANG Xiaoxu, LABEAU F, LIANG Yingchang, *et al*. Compressive sensing-based multiuser detection via iterative reweighed approach in M2M communications[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2018, 7(5): 764–767. doi: 10.1109/LWC.2018.2820704.

[10] JEONG B K, SHIM B, and LEE K B. MAP-based active user and data detection for massive machine-type communications[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(9): 8481–8494. doi: 10.1109/TVT.2018.2849621.

[11] DI RENNA R B and DE LAMARE R C. Activity-aware multiple feedback SIC for massive machine-type communications[C]. The 12th International ITG Conference on Systems, Communications and Coding, Rostock, Germany, 2019: 233–238.

[12] 丁子哲, 张贤达. 基于串行干扰消除的V-BLAST检测[J]. 电子学报, 2007, 35(S1): 19–24.
DING Zizhe and ZHANG Xianda. V-BLAST detection based on successive interference cancellation[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(S1): 19–24.

[13] KNOOP B, MONSEES F, BOCKELMANN C, *et al*. Sparsity-aware successive interference cancellation with practical constraints[C]. The 17th International ITG Workshop on Smart Antennas, Stuttgart, Germany, 2013: 1–8.

[14] LIU Yi, YUEN C, CAO Xianghui, *et al*. Design of a scalable hybrid MAC protocol for heterogeneous M2M networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2014, 1(1): 99–111. doi: 10.1109/JIOT.2014.2310425.

[15] AHN J, SHIM B, and LEE K B. Sparsity-aware ordered successive interference cancellation for massive machine-type communications[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2018, 7(1): 134–137. doi: 10.1109/LWC.2017.2760831.

[16] YANG Zhaohui, CHEN Ming, PAN Yijin, *et al*. Asynchronous detection for machine-to-machine systems with code division multiple access[C]. The 9th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing, Nanjing, China, 2017.

[17] YANG Zhaohui, CHEN Ming, WANG Yinlu, *et al*. Compressive sensing based multiuser detection for asynchronous machine-to-machine systems[C]. The 9th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing, Nanjing, China, 2017.

[18] BJÖRCK Å. Numerics of gram-schmidt orthogonalization[J]. *Linear Algebra and Its Applications*, 1994, 197/198: 297–316. doi: 10.1016/0024-3795(94)90493-6.

[19] MANDLOI M and BHATIA V. Low-complexity near-optimal iterative sequential detection for uplink massive MIMO systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(3): 568–571. doi: 10.1109/LCOMM.2016.2637366.

[20] 申滨, 吴和彪, 崔太平, 等. 基于最优索引广义正交匹配追踪的非正交多址系统多用户检测[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(3): 621–628. doi: 10.11999/JEIT190270.
SHEN Bin, WU Hebiao, CUI Taiping, *et al*. An optimal number of indices aided gOMP algorithm for multi-user detection in NOMA system[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(3): 621–628. doi: 10.11999/JEIT190270.

[21] 申滨, 赵书锋, 金纯. 基于迭代并行干扰消除的低复杂度大规模MIMO信号检测算法[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(12): 2970–2978. doi: 10.11999/JEIT180111.
SHEN Bin, ZHAO Shufeng, and JIN Chun. Low complexity iterative parallel interference cancellation detection algorithms for massive MIMO systems[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(12): 2970–2978. doi: 10.11999/JEIT180111.

申 滨：男，1978年生，教授，研究方向为认知无线电、大规模MIMO等.

吴和彪：男，1994年生，硕士生，研究方向为大规模机器类系统多用户检测.

赵书锋：男，1991年生，硕士生，研究方向为大规模MIMO系统信号检测.

崔太平：男，1981年生，讲师，研究方向为认知无线电、车联网.

责任编辑：余 蓉