

稀疏码分多址系统一种改进的检测算法

武汉*^① 郝保明^① 邵凯^②

^①(宿州学院机械与电子工程学院 宿州 234000)

^②(重庆邮电大学移动通信重点实验室 重庆 400065)

摘要: 稀疏码分多址(SCMA)系统中基于球形译码算法(SD)由于具有优良的性能受到越来越多的关注,然而现有基于SD的算法只能用于某些特定星座结构的检测,导致其应用受限。该文提出一种适用于任意星座且性能达到最大似然(ML)算法性能的改进球形译码(ISD)算法。该算法将用户星座图拆分,并将用户星座图转换为多层树结构,利用对树结构的搜索完成译码操作,并且对树的搜索是从高层向低层进行的。因此,可以将SCMA检测转换成最小化树结构部分度量问题;同时,所提出的改进算法对星座图的结构无任何限制,所以该算法适用于任意类型的星座图。此外,由于SCMA的稀疏性,每一层的部分度量均与分配给每个资源元素的用户无关,从而进一步降低了计算复杂度。

关键词: 稀疏码分多址; 球形译码; 星座图; 最大似然; 信道矩阵

中图分类号: TN911

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)08-2165-06

DOI: 10.11999/JEIT200532

An Improved Detection Algorithm for Sparse Code Multiple Access System

WU Han^① HAO Baoming^① SHAO Kai^②

^①(College of Mechanical and Electronic Engineering, Suzhou University, Suzhou 234000, China)

^②(Chongqing Key Laboratory of Mobile Communication Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Sphere Decoding (SD) based detection algorithms for Sparse Code Multiple Access (SCMA) system receive more and more attention due to excellent performance. However, the existing SD-based detection algorithms can only be applied to some certain constellation structures for SCMA system, which limit their application. An Improved SD (ISD) detection scheme is proposed in this paper, which achieves ML (Maximum Likelihood) performance for any constellation. The improved algorithm splits user constellations and converts them into a multi-layer tree structure, which also uses the research of the tree carried out from the high-layer to the low-layer to achieve the decoding operation. Therefore, the SCMA detection can be converted into minimizing the metrics of the tree structure. In the meanwhile, the improved algorithm does not have any restrictions on the structure of the constellation, so it is suitable for any structure of constellation. In addition, due to the sparse characteristics of SCMA structure, the partial metric at each layer is independent of users assigned to each Resource Element (RE), which further reduces the computational complexity.

Key words: Sparse Code Multiple Access (SCMA); Sphere Decoding (SD); Constellation; Maximum Likelihood (ML); Channel matrix

1 引言

从第1代移动通信到第4代移动通信系统都伴随

着多址接入(Multiple Access, MA)技术的革新,但它们都属于正交的多址接入(Orthogonal Multiple Access, OMA)技术,无法满足第5代移动通信(the Fifth Generation of mobile communication, 5G)海量连接、低时延、高频谱效率等需求^[1-4]。因此,非正交多址接入(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)技术成为了研究的重点。稀疏码分多址(Sparse Code Multiple Access, SCMA)作为一种码域的非正交多址接入技术,为解决日益增长的无线

收稿日期: 2020-06-30; 改回日期: 2020-12-13; 网络出版: 2020-12-30

*通信作者: 武汉 wuhan05023@163.com

基金项目: 安徽省科技重大专项(18030901023), 宿州学院重点科研项目(2016yzd02)

Foundation Items: Anhui Science and Technology Major Project (18030901023), The Key Scientific Research Project of Suzhou University (2016yzd02)

业务需求和紧缺的频谱资源之间的矛盾开拓了新思路^[5]。

首先,在发送端,SCMA采用多维码本的方式对用户输入数据进行调制与扩频,并且,每个用户都有各自的码本。此外,这些码本是由多个维度相同的码字构成,用户输入数据经过码本后映射为相应的码字,不同用户的码字在相同的时频资源上非正交叠加发送。在接收端,采用消息传递算法(Message Passing Algorithm, MPA)进行译码。由于SCMA采用非正交发送方式,并且非正交的码字数可以数倍于占用的资源块数,因此具备一定的过载能力,从而满足5G高频谱、海量连接的要求。

由于SCMA采用MPA算法,导致译码复杂度较高,且复杂度随用户数以及码本大小的增加呈指数增长。一般来说,减小译码复杂度可以从两个方面考虑,简化每次译码迭代过程中计算量以及减少迭代次数加快收敛速度。球形译码(Sphere Decoding, SD)作为一种低复杂度译码算法受到越来越多的关注,它将搜索空间限制在以接收向量为中心的球面内。文献[6-8]在MPA之前使用SD算法减小搜索空间,从而降低复杂度,其中文献[6,7]中的方法是在性能和复杂度之间取得折中;文献[8]中提出的SD-MPA算法采用计算球形区域内叠加星座点的方法,并且半径对应于加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN)的方差,但在半径较小的情况下系统性能恶化严重,并且在低SNR条件下译码复杂度仍然很高。文献[9]提出了一种基于SD且性能接近最优ML的算法,但是复杂度极高无实际使用价值。文献[10]提出的基于SD的改进检测算法能够实现接近ML算法性能的同时保持较低的复杂度。文献[11]提出了一种计算发送符号最小均方误差(Minimum Mean Square Error, MMSE)的低复杂度改进SD检测算法。

上述基于SD的译码算法都只适用于恒模星座,不能应用到所有类型的星座中,因此具有一定的局限性。文献[12]结果表明在某些场景下,非恒模的不规则星座性能优于其他星座。因此,找到适合所有星座图类型的检测算法是十分必要的。基于此,本文提出一种基于SD且适用于所有星座类型的改进检测算法ISD,该算法能够实现最优ML性能。

与文献[13]中的改进算法MSD相比,改进算法有如下优势:

- (1) 本文改进算法ISD对发送信号的结构无要求,能够应用于任何类型的星座;
- (2) 本文改进算法ISD在每一层树的浮点计算

量(Floating-point Operations, FLOPs)与用户数无关,这大大降低了本文改进算法的复杂度。

2 系统模型

假设上行SCMA系统中有 K 个用户以及 N 个资源元素(Resource Element, RE),由于SCMA的稀疏特性,因此每个用户只能分配 P 个REs,且 $P \ll N$, $\mathbf{X}_k(k \in \{1, 2, \dots, K\})$ 代表用户 k 从 $\chi_k \in \mathcal{R}^P$ 选择的 d_u 维复星座点,且 \mathbf{X}_k 是从 χ_k 中选择而来并通过用户 k 分配的 P 个REs发送的。此外,本文把 \mathbf{X}_k 的每一个元素作为一层,并且它是在用户 k 分配到的 P 个REs中的某一个进行发送的。即每个用户有 P 层,因此一共有 PK 层。定义 L 维向量 $\mathbf{X} = (\mathbf{X}_1^T, \mathbf{X}_2^T, \dots, \mathbf{X}_K^T)^T = (x_1, x_2, \dots, x_L)^T$,它包含了所有层的发送星座点,因此 $\mathbf{X} = \chi_1 \times \chi_2 \times \dots \times \chi_K$,且 $|\chi| = M^K$ 。

通过扩展矩阵 $\mathbf{S}_k(N \times P)$ 可以完成用户 k 对应RE的分配,其中 N 行代表了 N 个REs, P 列代表了用户 k 的 P 层。由于SCMA特殊的稀疏结构,用户 k 的扩展矩阵 \mathbf{S}_k 的每一列只有单个元素1,该元素对应于用户 k 分配的RE所在的行,其他元素全部为0。因此,User-RE级扩展矩阵可以表示为 $\mathbf{S} = [\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2, \dots, \mathbf{S}_K]$,并且 \mathbf{S} 是 $N \times L$ 维的矩阵。此外,每个RE都与 Q 层相连,这些层与 \mathbf{S} 每一行中元素1的位置对应。可以通过User-RE级列向量 \mathbf{f}_k 将 P 个REs分配给第 k 个用户,其中 $\mathbf{f}_k = \text{diag}(\mathbf{S}_k \mathbf{S}_k^T)$, $\text{diag}(\cdot)$ 表示的是对角矩阵。User-RE级指示矩阵可表示为 $\mathbf{F} = [\mathbf{f}_1 \mathbf{f}_2 \dots \mathbf{f}_K]$,并且 \mathbf{F} 是 $N \times K$ 的矩阵,其每一行和每一列分别对应 Q 个非零元素的RE和 P 个非零元素的用户。

经过信道后的接收信号可以表示成

$$\mathbf{y} = \sum_{k=1}^K \text{diag}(\mathbf{h}_k) \mathbf{S}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{n} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_N)^T$, $\mathbf{h}_k = (h_{1,k}, h_{2,k}, \dots, h_{N,k})^T$, $\mathbf{n} = (n_1, n_2, \dots, n_N)^T$, $\mathbf{n} \sim CN(0, \sigma^2 \mathbf{I})$, \mathbf{n} 表示加性高斯白噪声。

在接收端,使用MPA译码算法恢复 \mathbf{X}_k ,它是一种基于最大后验概率(Maximum Posterior probability, MAP)准则的检测算法。

3 译码算法

为了方便描述提出的检测算法,首先定义用户 k 的有效信道因子 $\mathbf{G}_k = \text{diag}(\mathbf{h}_k) \mathbf{S}_k$,因此式(1)可以改写为

$$\mathbf{y} = \mathbf{G} \mathbf{X} + \mathbf{n} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{G} = (\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2, \dots, \mathbf{G}_K)$ 表示用户有效信道矩阵。

众所周知,ML译码算法能够实现最优的检测性能,其检测符号可以表示为

$$\hat{\mathbf{X}} = \arg \min \|\mathbf{y} - \mathbf{G}\mathbf{X}\| \quad (3)$$

由于ML检测算法是以牺牲复杂度为代价换取最优性能的，其复杂度很高，因此在实际应用中很少使用。而基于SD的检测算法由于同时兼备高性能和低复杂度特性，受到越来越多的关注。

由于SCMA具有高过载能力，一般来说RE的数量是小于用户数的，即用户信道矩阵 \mathbf{G} 的行数是小于列数的。为了方便描述，把 \mathbf{G} 改写为 $\mathbf{G} = [\mathbf{G}^{(1)} \mathbf{G}^{(2)}]$ ，并且 $\mathbf{G}^{(1)}$ 和 $\mathbf{G}^{(2)}$ 分别是 N 阶矩阵和 $N \times (L - N)$ 维矩阵，分别代表了 \mathbf{G} 的前 N 列和后 $(L - N)$ 列。同理，式(3)中的 \mathbf{X} 可以改写为 $\mathbf{X} = [\mathbf{X}^{(1)} \mathbf{X}^{(2)}]$ ，并且 $\mathbf{X}^{(1)}$ 和 $\mathbf{X}^{(2)}$ 分别代表了 \mathbf{X} 的前 N 个和后 $L - N$ 个元素。

现有基于SD的译码算法^[13]做了如式(4)的定义

$$\tilde{\mathbf{y}} = \left[\begin{array}{c} \mathbf{y}^T \quad \mathbf{0}_{1 \times (L-N)} \\ \mathbf{G}^{(1)} \quad \mathbf{G}^{(2)} \\ \mathbf{0}_{(L-N) \times N} \quad \mathbf{I} \end{array} \right] \quad (4)$$

其中， $\mathbf{0}_{1 \times (L-N)}$ 表示 $1 \times (L - N)$ 维0矩阵， \mathbf{I} 是 $L - N$ 阶方阵。

然而，文献[6-11,13]中的算法均采用了式(5)中的方法进行译码，即

$$\hat{\mathbf{X}} = \arg \min_{\mathbf{X} \in \chi} \|\tilde{\mathbf{y}} - \mathbf{G}\mathbf{X}\|^2 \quad (5)$$

但是通过分析发现，式(5)并非完全等同于式(3)，只有在 $\|\mathbf{X}^{(2)}\|$ 为常数时，式(5)和式(3)才完全等价，因此上述方法不能应用于任意类型的星座图。

3.1 改进的译码算法

首先，分别定义 $\mathbf{X}^{(1)}$ 和 $\mathbf{X}^{(2)}$ 的元素对应层 $l \in \{1, 2, \dots, N\}$ 和 $l \in \{N + 1, N + 2, \dots, L\}$ ，并分别命名为Type 1层和Type 2层。借鉴文献[14]对亏秩MIMO (Multiple Input Multiple Output)系统的最优检测思想，固定 $\mathbf{X}^{(2)}$ 的元素并将式(3)改写为

$$\hat{\mathbf{X}}^{(1)} = \arg \min_{\mathbf{X}^{(1)} \in \chi^{(1)}} \left\| \mathbf{y} - \mathbf{G}^{(1)} \mathbf{X}^{(1)} - \mathbf{G}^{(2)} \mathbf{X}^{(2)} \right\|^2 \quad (6)$$

其中， $\hat{\mathbf{X}}^{(1)}$ 表示 $\hat{\mathbf{X}}$ 的前 N 个元素， $\chi^{(1)} = \{(x_1, x_2, \dots, x_N)^T | \mathbf{X} \in \chi\}$ 。

与现有算法使用式(5)进行译码不同之处在于，本文提出的检测算法使用式(6)进行译码操作，并且本文改进算法对 $\mathbf{X}^{(1)}$ 或 $\mathbf{X}^{(2)}$ 没有任何限制，即本文提出的改进算法对 \mathbf{X} 的结构无任何限制，因此本文提出的改进译码算法适用于任意类型的星座。

本文改进算法ISD的主要思想是对 L 层的树进行搜索，并且树的每一层都对应于 x_l 。此外，对树的搜索是从高至低进行的，即从树的 L 层逐渐到第1层。用户 k 对应 $[(k - 1)P + 1 \sim kP]$ 层，与之对应的是 \mathbf{X}_k 的元素。因此，对于层 kP 共有 M 个分支，而对于层 $[(k - 1)P + 1, (k - 1)P + 2, \dots, kP - 1]$ 只有1个分支。

图1表示的是 $K = 6, P = 2, M = 4$ 时树的结构，用户6在层12和层11发送信息，并且在层12有4条分支而在层11只有1条分支，它们分别对应于 x_{12} 和 x_{11} 。如3.1节所述，固定 $\mathbf{X}^{(2)}$ 的元素并将问题转换到式(7)，同时，在树的搜索过程中有如下原则：

(1) 与Type2层相关联的每个路径(例如， $l \in \{N + 1, N + 2, \dots, L\}$)，在树的Type1层的每个分支处进行部分度量(例如， $l \in \{1, 2, \dots, N\}$)；

(2) 该度量是基于先前层中已经确定的部分度量；Type1中的 l 层的部分度量可以表示为

$$\mu_l(X_l^L) = \sum_{i=l}^N \left| y_i - \sum_{j=i}^N g_{i,j}^{(1)} x_j^{(1)} - \sum_{j=1}^{L-N} g_{i,j}^{(2)} x_j^{(2)} \right|^2 \quad (7)$$

其中， $g_{i,j}^{(1)}, g_{i,j}^{(2)}, x_j^{(1)}, x_j^{(2)}$ 分别表示 $\mathbf{G}^{(1)}, \mathbf{G}^{(2)}, \mathbf{X}^{(1)}, \mathbf{X}^{(2)}$ 的元素。

因此，该检测问题是确定 X_l^L 的值从而最小化 $\mu_l(X_l^L)$ 。考虑到SCMA结构的稀疏性， \mathbf{G} 中每一行非零元素的个数为 Q ，并且它们的位置是由矩阵 \mathbf{F} 中元素值为1的位置确定。

令 $S_l = \{j | f_{l,j} = 1\}$ ，且 $Q = |S_l|$ ，则式(7)可以表示为

$$\mu_l(X_l^L) = \mu_{l+1}(X_{l+1}^L) + |y_l - \sum_{j \in S_l} g_{l,j} x_j|^2 \quad (8)$$

SD算法的原理是从接收向量中找到落在半径为 d 超球面内的 X_l^L ，而对于本文改进算法ISD而

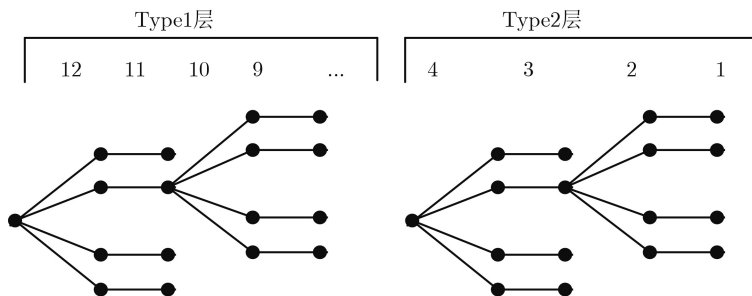


图1 树结构

言, 则是确定 X_l^L 的值满足 $\mu_l(X_l^L) \leq d^2$ 。并且随着搜索的继续, 部分度量总是越来越深入的进入树中, 若 $\mu_l(X_l^L) > d^2$, 则没有继续沿着这条路径下降的点。当 $\mu_L(X_l^L) < d$ 时, d 被更新并等于 $\mu_L(X_l^L)$, 从而确保找到ML解。

3.2 低复杂度ISD

基于SD的检测器的复杂度通常等于层数乘以树的每一层计算度量所需的FLOPs, 根据式(8)可知, 每个Type1层所需的实数加法(Real Additions, RAs)和实数乘法(Real Multiplications, RMs)数量与 d_c 成正比, 利用 \mathbf{G} 的稀疏性, 本文改进算法ISD的复杂度可以进一步降低。

令 y_l 和 $g_{l,j}$ 分别表示 \mathbf{y} 和 \mathbf{G} 的元素, 对于Type1层, 定义 $z_{l,l} = y_l - \sum_{j=1}^L g_{l,j}x_j$ 。可以通过递归的方式确定式(8)最右边的项,

$$z_{l,l}(X_l^L) = z_{l,l+1}(X_{l+1}^L) - g_{l,l}x_l \quad (9)$$

因此, 层 l 的度量可以表示为

$$\mu_l(X_l^L) = \mu_{l+1}(X_{l+1}^L) + |z_{l,l}(X_l^L)|^2 \quad (10)$$

由于 \mathbf{G} 的每一列中只有一个非零元素, 因此式(10)中 $z_{l,l}(X_l^L)$ 在每一层中仅更新1次, 根据式(9)和式(10), ISD算法在Type1的每一层需要6次RAs和6次RMs, 即每一层的FLOPs是固定的, 并且与 Q 无关。因此本文改进算法能够显著减少系统复杂度。

4 仿真结果

本节重点分析本文ISD与MPA算法^[15], SD, MSD, ML算法的性能, 其中仿真场景如下, 用户数 $K = 6$, RE个数 $N = 4$, $P = 2$, 发送端和接收端天线个数均为1。

文献^[16]提出了一种不规则非恒模4-Beko星座图, 文献^[12]仿真结果表明在某些场景下4-Beko星座图性能优于其他已知的星座图, 然而现有的基于SD的MSD检测算法^[13]不适用于4-Beko星座图。文献^[17]提出了T16QAM星座图, 文献^[12]对比了T16QAM星座图和4-Beko星座图性能。为了证明本文所提ISD算法在所有类型的星座图下都能达到ML算法性能, 对比了采用4-Beko星座图和T16QAM星座图的SCMA系统在不同检测算法时的性能, 其结果如图2所示。

由图2可知, 使用4-Beko星座图时, 3种检测算法性能相当; 而使用T16QAM星座图时, 本文改进算法ISD可实现ML算法检测性能, 且优于MPA算法, 并且在高SNR时, 本文改进ISD算法比MPA算法改善了0.6 dB。

由于本文改进检测算法ISD可达到最优ML检测性能, 而MSD算法无法用于4-Beko星座图时的检测, 因此无法在4-Beko星座图下对比两者的复杂度。

为了更好地分析本文改进算法的性能, 下面将对多种检测算法使用文献^[18]中通用星座图时误码率和复杂度情况。

图3表示的是MPA, SD, MSD, 本文改进算法ISD以及ML在文献^[18]星座图下平均误码率对比情况, 本文改进算法ISD可实现ML算法的BER性能, 且明显优于MSD, SD和MPA算法, MSD算法BER性能优于SD算法, MPA算法BER性能最差; 在BER为 10^{-3} 数量级时, ISD比MSD, SD和MPA算法分别改善0.3 dB, 0.7 dB和1.0 dB。

图4表示的是MPA, SD, MSD以及本文改进算法ISD在文献^[18]星座图条件下复杂度对比情况, 本文改进算法ISD复杂度最低, MPA算法复杂度最高, 并且在SNR为16 dB时, MSD算法和MPA算法的复杂度分别是ISD的2倍和4倍。

图5和图6分别表示了MPA和ISD算法在4-Beko以及T16QAM星座图下的复杂度对比情况, 由图可知, 本文改进ISD算法复杂度远低于MPA算法的复杂度。

5 结束语

本文提出一种适用于所有SCMA星座图类型的

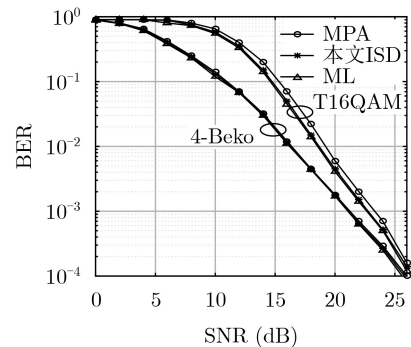


图2 不同检测算法在4-Beko和T16QAM星座图下SCMA系统性能

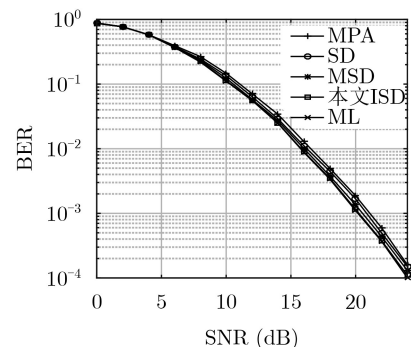


图3 不同检测算法在通用星座图下的平均BER性能对比

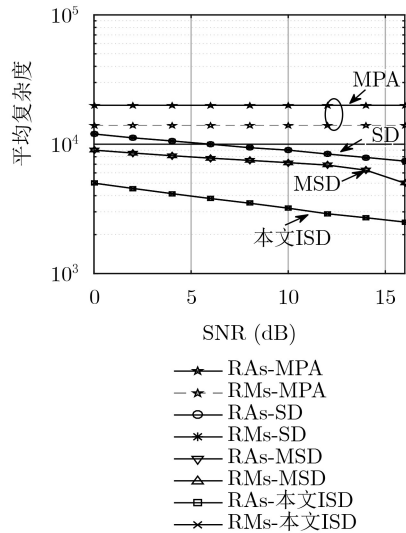


图4 不同检测算法在通用星座图下的复杂度对比

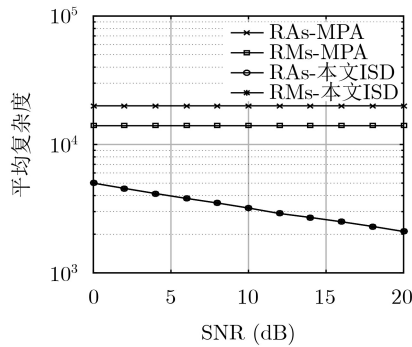


图5 MPA和ISD算法在4-Beko星座图下的复杂度对比

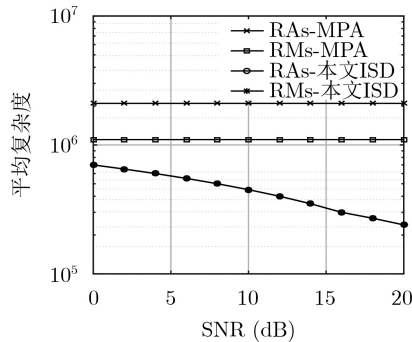


图6 MPA和ISD算法在T16QAM星座图下的复杂度对比

低复杂度检测算法ISD，该检测算法解决了现有的基于SD的算法只能用于某些特定类型的星座图的问题。仿真结果表明本文所提ISD算法实现ML检测性能的同时，可以显著降低计算复杂度，验证了改进算法的有效性。

参考文献

[1] IMT-2020(5G)推进组. 5G概念白皮书[R]. 2015: 1–18.
IMT-2020(5G) Promotion. 5G concept white paper[R]. 2015: 1–18.
[2] ANDREWS J G, BUZZI S, CHOI W, *et al.* What will 5G

be?[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2014, 32(6): 1065–1082. doi: [10.1109/JSAC.2014.2328098](https://doi.org/10.1109/JSAC.2014.2328098).
[3] 谢显中, 黎佳, 黄倩, 等. 机器类通信中基于NOMA短编码块传输的高可靠低延迟无线资源分配优化方案[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(11): 2549–2556. doi: [10.11999/JEIT190128](https://doi.org/10.11999/JEIT190128).
XIE Xianzhong, LI Jia, HUANG Qian, *et al.* Optimal scheme of resource allocation for ultra-reliable and low-latency in machine type communications based on non-orthogonal multiple access with short block transmission[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(11): 2549–2556. doi: [10.11999/JEIT190128](https://doi.org/10.11999/JEIT190128).
[4] 尤肖虎, 潘志文, 高西奇, 等. 5G移动通信发展趋势与若干关键技术[J]. *中国科学: 信息科学*, 2014, 44(5): 551–563. doi: [10.1360/N112014-00032](https://doi.org/10.1360/N112014-00032).
YOU Xiaohu, PAN Zhiwen, GAO Xiqi, *et al.* The 5G mobile communication: The development trends and its emerging key techniques[J]. *Scientia Sinica Information*, 2014, 44(5): 551–563. doi: [10.1360/N112014-00032](https://doi.org/10.1360/N112014-00032).
[5] NIKOPOUR H and BALIGH H. Sparse code multiple access[C]. *The 24th IEEE Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications*, London, UK, 2013: 332–336. doi: [10.1109/PIMRC.2013.6666156](https://doi.org/10.1109/PIMRC.2013.6666156).
[6] WEI Fan and CHEN Wen. A low complexity SCMA decoder based on list sphere decoding[C]. *2016 IEEE Global Communications Conference*, Washington, USA, 2016: 1–6. doi: [10.1109/GLOCOM.2016.7841513](https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2016.7841513).
[7] WEI Fan and CHEN Wen. Low complexity iterative receiver design for sparse code multiple access[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(2): 621–634. doi: [10.1109/TCOMM.2016.2631468](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2016.2631468).
[8] YANG Lin, MA Xinying, and SIU Yunming. Low complexity MPA detector based on sphere decoding for SCMA[J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(8): 1855–1858. doi: [10.1109/LCOMM.2017.2697425](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2017.2697425).
[9] CHEN Guangjin, DAI Jincheng, NIU Kai, *et al.* Optimal receiver design for SCMA system[C]. *The 28th IEEE Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications*, Montreal, Canada, 2017: 1–6. doi: [10.1109/PIMRC.2017.8292420](https://doi.org/10.1109/PIMRC.2017.8292420).
[10] LI Lanping, WEN Jinming, TANG Xiaohu, *et al.* Modified sphere decoding for sparse code multiple access[J]. *IEEE Communications Letters*, 2018, 22(8): 1544–1547. doi: [10.1109/LCOMM.2018.2848273](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2018.2848273).
[11] KARAKCHIEVA L and TRIFONOV P. Joint list multistage decoding with sphere detection for polar coded SCMA systems[C]. *The 12th International ITG Conference on Systems, Communications and Coding*, Rostock, Germany, 2019: 1–6. doi: [10.30420/454862018](https://doi.org/10.30420/454862018).

- [12] VAMEGHESTAHBANATI M, MARSLAND I D, GOHARY R H, *et al.* Multidimensional constellations for uplink SCMA systems—A comparative study[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, 21(3): 2169–2194. doi: [10.1109/COMST.2019.2910569](https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2910569).
- [13] VAMEGHESTAHBANATI M, BEDEER E, MARSLAND I, *et al.* Enabling sphere decoding for SCMA[J]. *IEEE Communications Letter*, 2017, 21(12): 2750–2753. doi: [10.1109/LCOMM.2017.2747550](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2017.2747550).
- [14] DAMEN M O, EL GAMAL H, and CAIRE G. On maximum-likelihood detection and the search for the closest lattice point[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2003, 49(10): 2389–2402. doi: [10.1109/TIT.2003.817444](https://doi.org/10.1109/TIT.2003.817444).
- [15] MA Zheng and BAO Jinchun. Sparse code multiple access (SCMA)[M]. VAEZI M, DING Zhiguo, and POOR H V. Multiple Access Techniques for 5G Wireless Networks and Beyond. Cham: Springer, 2019: 369–416.
- [16] BEKO M and DINIS R. Designing good multi-dimensional constellations[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2012, 1(3): 221–224. doi: [10.1109/WCL.2012.032312.120203](https://doi.org/10.1109/WCL.2012.032312.120203).
- [17] TAHERZADEH M, NIKOPOUR H, BAYESTEHA A, *et al.* SCMA codebook design[C]. The 80th IEEE Vehicular Technology Conference, Vancouver, Canada, 2014: 1–5. doi: [10.1109/VTCFall.2014.6966170](https://doi.org/10.1109/VTCFall.2014.6966170).
- [18] Altera Innovate Asia FPGA Design Contest. 5G algorithm innovation competition[EB/OL]. <http://www.innovateasia.com/5g/en/gp2.html>, 2015.
- 武汉: 男, 1991年生, 助理教授, 研究方向为新型多载波调制技术、新型多址接入技术。
- 郝保明: 男, 1980年生, 讲师, 研究方向为数字图像处理和语音信号处理。
- 邵凯: 男, 1977年生, 副教授, 研究方向为新型多载波调制技术、新型多址接入技术。

责任编辑: 马秀强