



一种新型上行 SCMA 系统接收机

张宏扬, 郑长亮, 邵根富, 刘华平
(杭州电子科技大学, 浙江 杭州 310018)

摘要: 稀疏码多址接入 (SCMA) 是一种码域非正交多址接入技术, 以其优异性能成为 5G 多址接入技术的热门候选方案。上行 SCMA 系统一般采用消息传递算法 (MPA) 接收机, 检测过程中存在由先验信息带来的误差。针对这一问题提出一种新型接收机, 称为环 MPA (R-MPA) 接收机, 其通过一种联合检测方案来消除上述误差对最终检测结果的影响。理论分析和仿真验证表明, 与现有的 log-MPA 接收机及经典 MPA 接收机相比, 所提 R-MPA 接收机是一种检测精度更高而实施复杂度较低的上行 SCMA 系统接收机。

关键词: 5G; 稀疏码多址接入; 消息传递算法; 环 MPA; 过载率

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017188

A novel receiver for uplink SCMA system

ZHANG Hongyang, ZHENG Changliang, SHAO Genfu, LIU Huaping
Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China

Abstract: Sparse code multiple access (SCMA) is a type of code domain non-orthogonal multiple access technology, which is regarded as a promising multiple access technology for 5G due to its excellent performance. The uplink SCMA system generally uses a message passing algorithm (MPA) in the receiver. The priori information can be inaccurate to cause an increased detection error. A novel receiver for the uplink SCMA system, called ring-MPA (R-MPA) receiver, was proposed to solve this problem, by using a joint detection process. The proposed R-MPA receiver was compared with the log-MPA receiver and the classic MPA receiver, two state-of-the-art existing schemes. Both theoretical analysis and computer simulation results show that the proposed receiver not only has a superior error performance, but also has a lower implementation complexity than these existing schemes.

Key words: 5G, sparse code multiple access, message passing algorithm, R-MPA, overloading factor

1 引言

从 20 世纪 80 年代诞生至今, 移动通信系统

历经四代发展与变迁, 逐渐成为推动社会和经济
发展的重要引擎之一。目前, 移动互联网业务与
物联网业务的快速增长, 推动着人们对 5G^[1]的探

收稿日期: 2017-04-17; 修回日期: 2017-06-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61471153); 杭州电子科技大学科研启动基金资助项目 (No.KYS085614014, No.ZX150204307002/001)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61471153), Scientific Research Foundation of Hangzhou Dianzi University (No.KYS085614014, No.ZX150204307002/001)

索与研究。5G 作为面向 2020 年及以后移动通信需求而发展的新一代移动通信系统,其应用场景具有超高流量密度、超高连接数密度、超高移动性等特征^[2,3]。相比于传统正交多址接入技术,非正交多址接入(non-orthogonal multiple access, NMA)^[4,5]技术能进一步提升频谱效率且能增加有限资源下的用户连接数,更适应 5G 的需求。

稀疏码多址接入(sparse code multiple access, SCMA)^[6]是华为提出的一种码域 NMA (code-domain NMA, CNMA) 技术,其主要思想是将四维调制和低密度签名多址接入(low density signature multiple access, LDSMA)^[7]相结合。基于 SCMA 的上行移动通信系统,不仅在频谱效率和吞吐量上表现优异,而且可以引入免调度的竞争随机接入机制,从而降低业务的接入时延和信令开销,支持大量、可动态变化的用户数目。因此,SCMA 技术成为 5G 多址接入技术研究中的一个热点,受到学术界和工业界的重视。

然而 SCMA 要正式成为 5G 空口技术,一个亟需解决的关键问题是接收机的设计。具体而言,SCMA 接收机的重点和难点在于多用户检测(multi-user detection, MUD),故国内外学者针对 SCMA 系统检测做了大量研究。参考文献[6]介绍了基于经典消息传递算法(message passing algorithm, MPA)^[8]的 SCMA 系统检测方案。目前,在现存各类面向 SCMA 系统的检测算法中,MPA 相关类算法已经占据主流。参考文献[9]将经典

MPA 的检测运算投入对数域,提出对数域 MPA(log domain MPA, log-MPA);参考文献[10,11]分别提出基于部分边缘化方法的 MPA 和基于阈值中断方法的 MPA;参考文献[12,13]对基于串行更新策略的 MPA 检测方案进行研究与分析;参考文献[14]则基于信号不确定性原理提出一种动态缩小平方搜索 MPA(dynamic shrunk square searching MPA, DSSS-MPA)。

在上述相关研究中,SCMA 接收机在对接收信号进行检测时,均假定各用户所有传输码字的先验概率相等。因此,这些接收机不可避免地存在由先验信息带来的检测误差。针对这一问题,本文提出一种基于联合检测的 SCMA 接收机,称为环 MPA (ring-MPA, R-MPA) 接收机。该接收机在不增加实施复杂度的基础上,可以最大程度地消除由先验信息带来的检测误差。

2 系统模型

假定一个上行 SCMA 系统,系统中 J 个用户共享 K 个正交时频资源(如 OFDM 子载波),所有用户使用同一个基站,系统过载率(overloading factor, OF)为 J/K 。当 $J=6$ 时,上行 SCMA 系统框架如图 1 所示。

整体上,上行 SCMA 系统可分为发送端和接收端两大模块。

(1) 发送端

根据 SCMA 系统码本,SCMA 编码器将信道

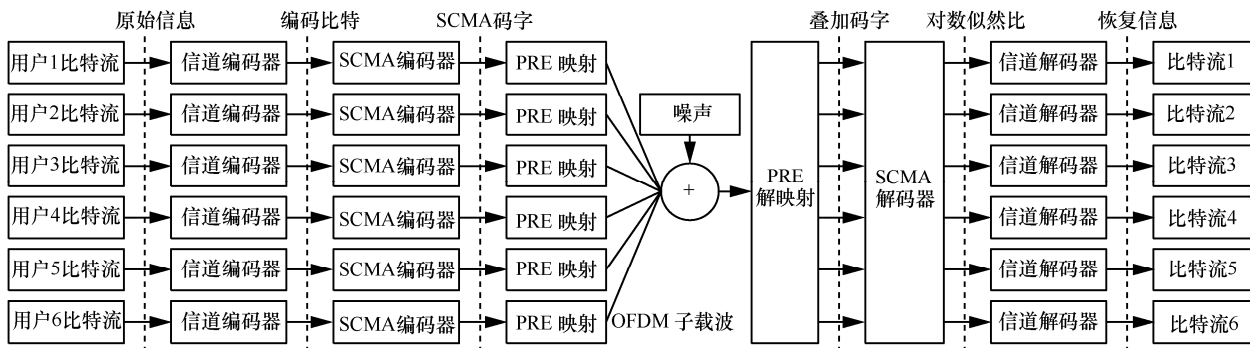
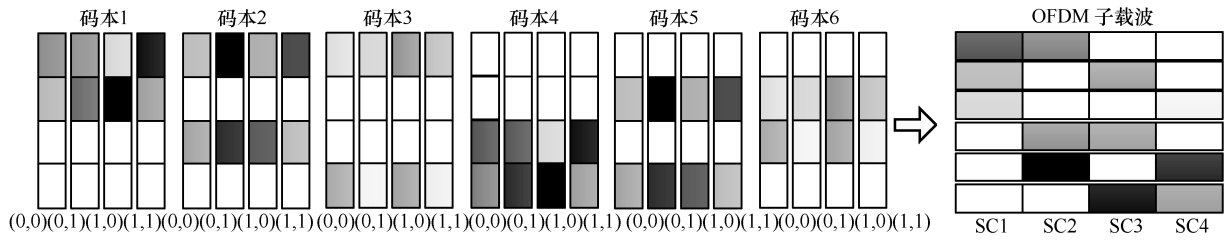


图 1 上行 SCMA 系统框架 ($J=6$)

图2 SCMA 编码与 PRE 映射 ($J=6, K=4, M=4, N=2$)

编码后的用户比特信息直接映射为多维复数码字, 然后进行物理资源单元 (physical resource element, PRE) 映射, 来自 J 个用户的码字信息在 K 个 OFDM 子载波上复用。当 $J=6, K=4$ 时, 上述操作的示意如图 2 所示。其中, $M=4$, 代表码本大小, $M=2^l$, l 为用户编码比特的位数; $N=2$, 代表码字中非零元素个数, 即图 2 各码字中不为白色的元素个数。

(2) 接收端

由于 J 个用户在 K 个 OFDM 子载波上复用, 则接收端信号可以表示为:

$$y = \sum_{j=1}^J \sqrt{P_j/N} \text{diag}(F_j) \text{diag}(H_j) m + N_0 \quad (1)$$

其中, $y=\{y_i\}, i=1,2,\dots,K$, y_i 为子载波 i 上的接收信号; $m=\{m_j\}, j=1,2,\dots,J$, m_j 为用户 j 的传输码字; N_0 为噪声功率; $H_j=[h_{j1}, h_{j2}, \dots, h_{jK}]^T$ 、 P_j 、 $F_j=[f_{j1}, f_{j2}, \dots, f_{jK}]^T$ 分别为用户 j 的信道增益、传输功率、标记向量。 F_j 对应于 PRE 映射过程, 即当用户 j 的码字信息在子载波 i 上传输时, $f_{ji}=1$; 否则为 0。

与发送端的操作相对应, 接收端的工作是对上述接收信号进行解 PRE 映射、检测与译码。

3 接收机设计

由第 2 节分析可知, 在上行 SCMA 系统中, 各用户之间存在干扰。故能否设计出高性能、低复杂度的接收机决定着系统性能的优劣, 而 SCMA 接收机设计的关键在于 MUD 检测方法^[15]。

3.1 消息传递算法

结合图 3 所示因子图^[16]来阐述基于经典 MPA

的 SCMA 系统检测过程。该因子图对应于 SCMA 系统的 PRE 映射, 其中变量节点 (variable node, VN) v_j 和资源节点 (resource node, RN) r_i 分别对应用户 j 与子载波 i (i, j 的取值如第 2 节所述), 连线则反映用户与子载波的复用关系。

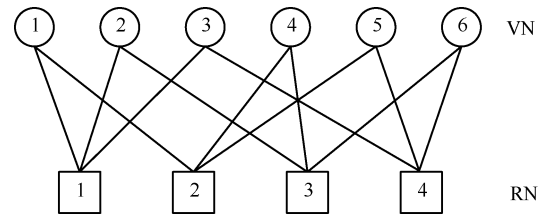


图3 因子图

第一步, 信息初始化。给定各用户所有码字的先验概率, 作为变量节点 v_j 传递给资源节点 r_i 的初始信息; 同时, 计算各资源节点所对应的载波上所有残差信息的集合。以资源节点 r_i 为例:

$$I_{v_1 \rightarrow r_i}^0(m_1) = I_{v_2 \rightarrow r_i}^0(m_2) = I_{v_3 \rightarrow r_i}^0(m_3) = \frac{1}{M} \quad (2)$$

$$f_i(y_i, m_1, m_2, m_3, N_{0,i}, H_i)$$

$$= \frac{-1}{N_{0,i}} \left\| y_i - (h_{1i} C_{1i}(m_1) + h_{2i} C_{2i}(m_2) + h_{3i} C_{3i}(m_3)) \right\|^2 \quad (3)$$

其中, v_1, v_2, v_3 表示与资源节点 r_i 相连接的变量节点, m_1, m_2, m_3 代表 v_1, v_2, v_3 对应的用户在子载波 i 传输上的码字; $H_i=[h_{1i}, h_{2i}, \dots, h_{Ji}]^T$ 为载波 i 上各用户的信道增益集合; $C_{ji}(m_j)$ 代表码字为 m_j 时, 用户 j 在子载波 i 上的发送符号; $N_{0,i}$ 为子载波 i 上的噪声功率。

第二步, 用户信息在 VN 与 RN 之间迭代更新。以 v_j 与 r_i 为例:

$$I_{r_i \rightarrow v_1}(m_1) = \sum_{m_2=1}^4 \sum_{m_3=1}^4 \phi_i(y_i, m_1, m_2, m_3, N_{0,i}, H_i) \cdot (I_{v_2 \rightarrow r_i}(m_2) I_{v_3 \rightarrow r_i}(m_3)) \quad (4)$$

$$I_{r_i \rightarrow v_2}(m_2) = \sum_{m_1=1}^4 \sum_{m_3=1}^4 \phi_i(y_i, m_1, m_2, m_3, N_{0,i}, H_i) \cdot (I_{v_1 \rightarrow r_i}(m_1) I_{v_3 \rightarrow r_i}(m_3)) \quad (5)$$

$$I_{r_i \rightarrow v_3}(m_3) = \sum_{m_1=1}^4 \sum_{m_2=1}^4 \phi_i(y_i, m_1, m_2, m_3, N_{0,i}, H_i) \cdot (I_{v_1 \rightarrow r_i}(m_1) I_{v_2 \rightarrow r_i}(m_2)) \quad (6)$$

$$I_{v_j \rightarrow r_1}(m_j) = \text{norm}(ap_v(m_j) I_{r_2 \rightarrow v_j}(m_j)) \quad (7)$$

$$I_{v_j \rightarrow r_2}(m_j) = \text{norm}(ap_v(m_j) I_{r_1 \rightarrow v_j}(m_j)) \quad (8)$$

其中, $\phi_i(y_i, m_1, m_2, m_3, N_{0,i}, H_i) = \exp(f_i(y_i, m_1, m_2, m_3, N_{0,i}, H_i))$, $ap_v(m_j)$ 表示用户 v_j 码字的先验信息, $\text{norm}()$ 代表归一化处理。

第三步, 当所设置的中断条件 (比如迭代次数) 达成时, 迭代停止; 检测器输出检测信息, 即用户各编码比特的对数似然比 (log likelihood rate, LLR):

$$LLR_x = \ln \left(\frac{\sum_{m_j: b(m_j, x)=0} I_{v_j}(m_j)}{\sum_{m_j: b(m_j, x)=1} I_{v_j}(m_j)} \right) = \ln \left(\sum_{m_j: b(m_j, x)=0} I_{v_j}(m_j) \right) - \ln \left(\sum_{m_j: b(m_j, x)=1} I_{v_j}(m_j) \right) \quad (9)$$

$$I_{v_j}(m_j) = ap_v(m_j) I_{r_1 \rightarrow v_j}(m_j) I_{r_2 \rightarrow v_j}(m_j) \quad (10)$$

其中, $b(m_j, x)$ 表示码字 m_j 中第 x 个编码比特。

3.2 R-MPA 接收机

由第 3.1 节内容可知, 基于经典 MPA 的 SCMA 检测, 在初始化阶段需要各用户所有码字的先验概率。经典 MPA 检测方案及第 1 节所述诸多改进 MPA 检测方案, 都假定 SCMA 系统中各用户所有码字的先验概率相等, 这势必会给系统的检测译码带来误差。

针对这一问题, 本文提出一种新型 SCMA 接收机, 称为 R-MPA 接收机, 其设计流程如图 4 所示。该接收机的基本思想是通过串联两个 SCMA 检测器, 构建一个环状接收机。检测器 1 先对接收信号 y 进行处理, 得到的 LLR 信息传入判决器; 判决器输出检测器 2 所需的先验信息; 检测器 2 据此对接收信号 y 进行处理, 得到最终的 LLR 信息, 传递给解码器。

在上述两个检测器中, 检测算法均采用参考文献[9]所提的 log-MPA。这是因为 log-MPA 的检测性能基本等同于经典 MPA, 而其检测运算量远小于后者。两者的检测运算量对比见表 1。其中, d_r 表示一个 RN 连接的 VN 个数, d_v 表示一个 VN 连接的 RN 个数, n 表示算法迭代次数。log-MPA 检测器的检测思想是把雅可比对数式与经典 MPA 相结合, 即将式 (11) 运用到第 3.1 节所述的检测计算中:

$$\ln \left(\sum_{i=1}^K \exp(f_i) \right) = \max \{f_1, f_2, \dots, f_K\} \quad (11)$$

在 R-MPA 接收机中, 以检测器 2 为主, 检测

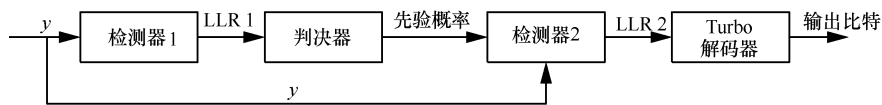


图 4 R-MPA 接收机设计流程

表 1 MPA 和 log-MPA 检测运算量对比

运算	MPA	log-MPA
加法运算	$(2d_r+1)M^{d_r}Kd_r n + (d_v-2)MKd_r + 2MKd_r$	$3M^{d_r}Kd_r^2 n + 2MKd_r$
乘法运算	$(d_r+2)M^{d_r}Kd_r n + 4MKd_r$	$3M^{d_r}Kd_r n + 4MKd_r$
指数运算	$M^{d_r}Kd_r n$	0
比较运算	0	$M^{d_r}Kd_r n + (d_v-2)MKd_r n$



器 1 为辅, 分别对接收信号 y 进行检测; 检测器 1 所需先验信息仍通过假定获得, 检测器 2 所需先验信息则由 R-MPA 接收机的判决器给出。判决器中的主要操作是: 借助检测器 1 输出的 LLR 信息, 计算用户编码比特 (如 00 01 10 11) 的概率分布; 据此得出用户各编码比特所对应的多维码字的先验概率, 发送给检测器 2。Turbo 解码器则是根据检测器 2 输出的 LLR 信息对接收信号 y 进行解码操作。

其中, 判决器在计算用户编码比特的概率分布时, 一位编码比特 (如 00) 最多对应 4 次比较运算与一次加法运算。这些运算相比于复杂的 MUD 检测运算, 可以忽略不计。因此, 当检测器总迭代次数相等时, R-MPA 接收机与 log-MPA 接收机的实施复杂度近乎相等。

4 仿真与结果分析

为了验证本文所提接收机的性能, 设计了几种不同场景, 对 R-MPA 接收机的误码率性能与实施复杂度进行仿真分析。

4.1 误码率性能

据参考文献[9]中的实验仿真可知, 在相同通信场景中, log-MPA 接收机的检测误码率几乎与经典 MPA 接收机完全相等。因此基于上行 SCMA 系统, 将 R-MPA 接收机与 log-MPA 接收机的检测误码率进行对比, 仿真参数设置见表 2。

表 2 R-MPA 接收机与 log-MPA 接收机的检测误码率仿真参数设置

场景	接收机	J	K	系统过载率 (OF)	迭代次数/次
1	log-MPA	6	4	150%	2
2	log-MPA	4	4	100%	4
3	log-MPA	6	4	150%	4
4	R-MPA	4	4	100%	4
5	R-MPA	6	4	150%	4

其中, SCMA 系统码本设计采用参考文献[17]给出的设计方案, 且 $M=4$ 、 $N=2$; 信道编码采用

1/2 Turbo, Turbo 解码的迭代次数为 3; 系统噪声设定为高斯噪声。此外, 场景 4、场景 5 中 R-MPA 接收机的两个检测器的检测算法迭代次数均为 2, 总迭代次数为 4。

在表 2 所述的 5 种场景中, R-MPA 接收机与 log-MPA 接收机的检测误码率如图 5 所示。其中, 场景 1 与场景 5 的仿真结果对比, 验证了本文所提接收机设计方案的合理性与有效性。而从场景 2~4 的仿真结果可以看出, 相比于 log-MPA 接收机, R-MPA 接收机在检测误码率性能方面有着明显的优势; 且 SCMA 系统的过载率越大, R-MPA 接收机在检测误码率性能方面的优势越明显。

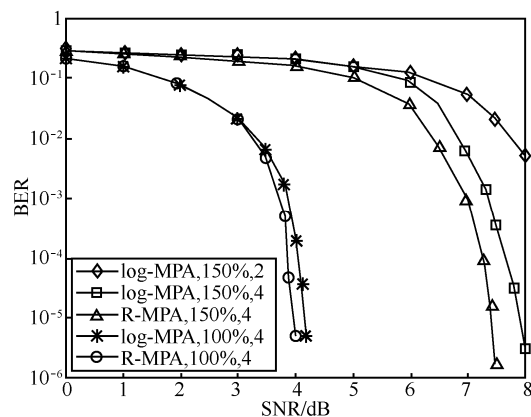


图 5 R-MPA 接收机与 log-MPA 接收机的检测误码率

4.2 实施复杂度

据第 3.2 节内容可知, R-MPA 接收机与 log-MPA 接收机的实施复杂度基本相等。基于上行 SCMA 系统, 对 R-MPA 接收机与经典 MPA 接收机的实施复杂度进行对比, 仿真参数设置见表 3。

表 3 R-MPA 接收机与经典 MPA 接收机的实施复杂度仿真参数设置

场景	接收机	J	K	系统过载率 (OF)	迭代次数/次
1	R-MPA	4	4	100%	4
2	R-MPA	6	4	150%	4
3	MPA	4	4	100%	4
4	MPA	6	4	150%	4

其中, SCMA 系统码本与第 4.1 节仿真实验中的一致; 场景 1、场景 2 中 R-MPA 接收机的两个检测器的检测算法迭代次数均为 2, 总迭代次数为 4。

在表 3 所述的 4 种场景中, R-MPA 接收机与 log-MPA 接收机的检测运算量如图 6 所示。由图 6 可以看出, 在检测环节, 前者的比较运算量基本与后者的指数运算量基本相等; 而前者的乘法运算量明显小于后者, 且随着 SCMA 系统过载率的增大, 两者差距增大; 前者的加法运算量则大于后者, 两者差距也随系统过载率的增大而增大。整体而言, R-MPA 接收机的检测运算量远小于经典 MPA 接收机, 故前者的实施复杂度远低于后者。

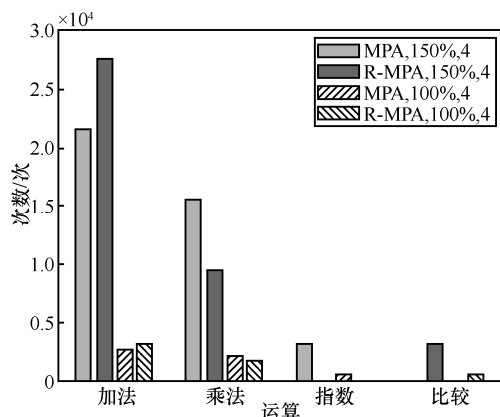


图 6 R-MPA 接收机与经典 MPA 接收机的实施复杂度

综合第 4.1 节与第 4.2 节的仿真实验可知, 所提 R-MPA 接收机的检测误码率性能明显高于 log-MPA 接收机及经典 MPA 接收机; 而其实施复杂度远低于经典 MPA 接收机, 与 log-MPA 接收机基本相等。因此, 本文所提接收机是一种检测精度更高而实施复杂度较低的上行 SCMA 系统接收机。

5 结束语

针对上行 SCMA 通信系统, 本文提出一种新型接收机的设计方案。相比于经典 MPA 接收机以及其他改良 MPA 接收机, 所提接收机在对接通信

号进行检测时, 极大地减小了由先验信息带来的误差。通过理论分析和实验仿真表明, 所提接收机检测精度高而实施复杂度较低。因此, 本文所提接收机是一种实用价值较高的上行 SCMA 系统接收机。

此外, 和现存其他针对上行 SCMA 系统接收机的研究一样, 本文工作是基于上行 SCMA 系统中各用户传输功率相等的场景。将来可以考虑在用户传输功率不等的场景下, 如何设置自适应的码本分配, 使得传输功率最高的两个用户的稀疏码字正交, 进一步提升 SCMA 系统的检测性能。

参考文献:

- [1] IMT-2020(5G)推进组. 5G 概念白皮书[R]. 2015. IMT-2020 (5G) Promotion Group. 5G concept white paper[R]. 2015.
- [2] JEFFREY G A, STEFANO B, WAN C, et al. What will 5G be?[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6): 1065-1082.
- [3] 董振江, 董昊, 韦薇, 等. 5G 环境下的新业务应用及发展趋势[J]. 电信科学, 2016, 32(6): 58-64. DONG Z J, DONG H, WEI W, et al. New services and development trend in 5G environment[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(6): 58-64.
- [4] 毕奇, 梁林, 杨珊, 等. 面向 5G 的非正交多址接入技术[J]. 电信科学, 2015, 31(5): 14-21. BI Q, LIANG L, YANG S, et al. Non-orthogonal multiple access technology for 5G systems[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(5): 14-21.
- [5] DAI L L, WANG B C, YUAN Y F, et al. Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(9): 74-81.
- [6] NIKOPOUR H, BALIGH H. Sparse code multiple access[C]// Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), September 9-11, 2013, London, UK. New Jersey: IEEE Press, 2013: 332-336.
- [7] HOSHYAR R, WATHAN F P, TAFAZOLLI R. Novel low-density signature for synchronous CDMA systems over AWGN channel[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(4): 1616-1626.
- [8] KSCHISCHANG F, FREY B, LOELIGER H. Factor graphs and the sum-product algorithm[J]. IEEE Transactions on Informa-

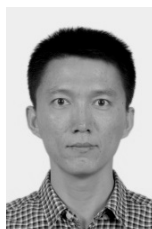


- tion Theory, 2001, 47(2): 498-519.
- [9] ZHANG S Q, XU X Q, LU L, et al. Sparse code multiple access: an energy efficient uplink approach for 5G wireless systems[C]//2014 IEEE GLOBECOM Workshops, December 8-12, 2014, Austin, TX, USA. New Jersey: IEEE Press, 2014: 4782-4787.
- [10] MU H, MA Z, ALHAJI M, et al. A fixed low complexity message pass algorithm detector for up-link SCMA system[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2015, 4(6): 585-588.
- [11] YANG L, LIU Y Y, SIU Y M. Low complexity message passing algorithm for SCMA system[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(12): 2466-2469.
- [12] DU Y, DONG B H, CHEN Z, et al. Shuffled multiuser detection schemes for uplink sparse code multiple access systems[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2016, 20(6): 1231-1234.
- [13] DU Y, DONG B H, CHEN Z, et al. A fast convergence multiuser detection scheme for uplink SCMA systems[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2016, 5(4): 388-391.
- [14] ZHOU Y, LUO H J, LI R, et al. A dynamic states reduction message passing algorithm for sparse code multiple access[C]//2016 Wireless Telecommunications Symposium (WTS), April 18-20, 2016, London, UK. New Jersey: IEEE Press, 2016: 1-5.
- [15] BAYESTEH A, NIKOPOUR H, TAHERZADEH M, et al. Low complexity techniques for scma detection[C]//2015 IEEE GLOBECOM Workshops, December 6-10, San Diego, CA, USA. New Jersey: IEEE Press, 2015: 1-6.
- [16] LOELIGER H. An introduction to factor graphs[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2004, 21(1): 28-41.
- [17] TAHERZADEH M, NIKOPOUR H, BAYESTEH A, et al. SCMA codebook design[C]//2014 IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC), September 14-17, 2014, Vancouver, Canada. New Jersey: IEEE Press, 2014: 1-5.

[作者简介]



张宏扬 (1991-), 男, 杭州电子科技大学硕士生, 主要研究方向为非正交多址接入。



郑长亮 (1980-), 男, 博士, 杭州电子科技大学讲师, 主要研究方向为无线通信、移动通信等。



邵根富 (1962-), 男, 杭州电子科技大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为无线通信理论、信号处理与自动控制等。



刘华平 (1965-), 男, 博士, 杭州电子科技大学特聘教授、硕士生导师, 美国俄勒冈州立大学终身教授, 主要研究方向为无线通信理论、无线传感网络和信号处理等。