

# 卫星通信系统的稀疏码多址检测技术研究

蒋怡婷, 朱立东

(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室, 四川 成都 611731)

**摘要:** 对卫星通信系统中的SCMA检测算法进行研究, 提出将码本优化分配与不完全迭代MPA算法联合检测, 在提升系统性能的同时降低系统复杂度。同时, 对SCMA检测算法的收敛性进行研究, 提出改进的串并结合MPA算法, 该算法能够加快系统收敛速度的同时降低处理时延, 并且系统复杂度得到了降低。

**关键词:** 卫星通信系统; 稀疏码多址接入; 检测算法; 算法收敛性

**中图分类号:** TN927.2

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-8930.20200108

## Research on Sparse Code Multiple Access Detection Technology in Satellite Communication Systems

JIANG Yiting, ZHU Lidong

National Key Laboratory of Science and Technology on Communications of UESTC, Chengdu, 611731, China

**Abstract:** SCMA detection algorithms in the satellite communication system was studied, and optimal allocation of codebook and the incomplete iterative MPA detection algorithm were combined to improve system performance while reducing system complexity. The convergence of the SCMA detection algorithm was studied, and an improved serial-parallel MPA algorithm was proposed. This algorithm could accelerate the system convergence speed while reducing the processing delay, and the system complexity was also reduced.

**Key Words:** satellite communication system, sparse code multiple access, detection algorithm, algorithm convergence

### 1 引言

天地一体化信息网络的发展要求卫星通信与地面5G网络进行融合, 发挥卫星系统全球无缝覆盖的特性, 结合地面通信网络的优势, 对高用户密度服务区提供支持, 为人们提供无处不在的、随时接入的宽带通信服务。然而卫星网络与地面5G网络是异构网络, 技术体制不一, 难以高效互联, 传输性能低下。3GPP TR 38.811明确提出了卫星与地面5G网络融合的架构, 在融合的高级阶段, 将实现卫星与地面5G网络技术体制的统一。传统的卫星通信系统均采用正交多址接入体制, 例如FDMA、TDMA、CDMA或这几种多址方式的组合, 相比非正交多址接入方式, 正交多址接入方式容量偏小, 频谱利用效率不够高。

稀疏码多址接入 (Sparse Code Multiple Access, SCMA) 是5G系统的一种候选非正交多址接入方案,

在相同带宽资源条件下可增加终端接入数量。如果将SCMA引入卫星通信系统, 可以增加终端接入数量。但卫星通信系统的信道特性与地面系统有较大差异, 需要做适应性改进。目前对稀疏码多址接入技术的研究大都集中在码本设计与检测算法两个方面, 关于检测算法的研究旨在提高系统性能或降低系统复杂度。目前在检测算法方面的研究难以同时兼顾系统性能与复杂度, 更多只是倾向于单方面的改善。如传统MPA算法<sup>[1]</sup>, 虽然其性能很优, 但是复杂度很高。在此基础上衍生出的max-log MPA算法<sup>[2]</sup>利用对数域的特点, 对运算器进行转化, 相较于传统MPA算法一定程度上减少了复杂度, 但是性能却降低了。基于以上考虑, 本文将SCMA体制引入卫星通信系统。由于复杂度高会影响SCMA检测算法在卫星通信系统中的实际应用, 需要对算法进行优化, 从而

降低复杂度。为了降低SCMA检测算法的复杂度,需要合理选择检测迭代次数。利用不完全迭代MPA检测算法来降低复杂度,并且结合码本优化分配方法提升系统性能。此外,本文针对检测算法的收敛性,提出改进思路,加快算法的收敛速度。

## 2 不完全迭代MPA算法

### 2.1 算法原理

无论是传统MPA算法还是max-log MPA算法,在算法流程上都是对所有用户节点进行了相同迭代次数的消息更新以使各个用户节点的概率值得到收敛,但是在迭代过程中,可能会发生某些用户节点在未达到最大迭代次数前已经收敛的情况,这时在最大迭代次数之前这些已经达到收敛状态的用户节点还要继续参与其他用户节点的迭代<sup>[3]</sup>。此时,已经收敛的用户节点继续迭代会使系统产生一些不必要的或重复的运算,结果使系统的复杂度增加。因此,对于在未达到最大迭代次数之前已经达到收敛状态的用户节点,可以将其信息直接输出,即将检测结果输出,不再参与迭代更新,剩余用户节点继续迭代更新。这种情况下所有用户节点并不会经历相同的迭代次数,先解出信息用户节点迭代次数小于最大迭代次数。由于部分用户节点的迭代次数变小,所以系统最后的复杂度降低,这种方法称为不完全迭代法。

不完全迭代MPA算法采用分层的思想,对所有的用户节点进行分层,每层都有独立的迭代次数,总的迭代次数等于所有层迭代次数的和。至于先对哪些用户节点进行解码,可采用按自然顺序的方式。假定将用户分为 $C$ 层,每层需要解码的用户数为 $\lambda oU_c$ ,每层的迭代次数为 $\lambda_c$ ,总的迭代次数为 $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_C$ 。在实际情况中,这些参数可以根据不同需求来进行设置。采用6个用户复用1个SCMA块的系统,假设与用户 $U_i$ 一起在4个资源块上传输的用户集合为 $U^i = \{U_1^i, U_2^i, \dots, U_6^i\}$ ,将用户分为 $C=3$ 层,每层的迭代次数为 $(2, 2, 1)$ ,每层需要解码的用户数为 $(2, 2, 2)$ ,则总的迭代次数 $\lambda=5$ 。在用户节点 $U$ 处进行不完全迭代MPA算法的步骤如下。

第一步:与传统MPA相似,初始化每个用户节点传递到功能节点的概率为 $1/M$ ,假设最开始在第一层,设 $\text{flag}_i=0, i=1, 2, \dots, 6$ 表示该用户未解码的标志。

第二步:判断是否 $c \leq C$ ,若满足,根据 $\lambda oU_c$ ,确定本次需要进行检测解码的用户 $U_{2c-1}^i, U_{2c}^i$ ,对 $\text{flag}=0$ 的用户按照传统MPA算法进行 $\lambda_c$ 迭代更新,迭代完成后,令 $c=c+1$ ,将用户 $U_{2c-1}^i$ 、用户 $U_{2c}^i$ 的标志设为 $\text{flag}_{(2c-1)}=1$ 和 $\text{flag}_{(2c)}=1$ ,表示已对用户 $U_{2c-1}^i$ 和用户 $U_{2c}^i$ 解码。

第三步:对 $U_i \in \{U_{2c-1}^i, U_{2c}^i\}$ 进行判断,若满足,则

对该用户计算发送每个码字的概率,从而计算用户的对数似然比,此时解码成功,检测结束,否则,返回执行第二步。

从不完全迭代MPA算法的步骤可以看出,该算法进行每层的迭代操作后,就已经解码出该层用户的信息,并且已解码的用户不参与下一层用户的检测,此时因子图因为已解码用户节点停止后续更新发生了变化,如图1所示,但是下层用户的检测需要上层已解码用户最后检测更新的消息进行传递。

图1因子图中虚框以及虚线分别表示的是已经在上一层中解码的用户以及与该用户节点相连的边,实线和实框表示在该层迭代更新操作需要进行检测的用户。

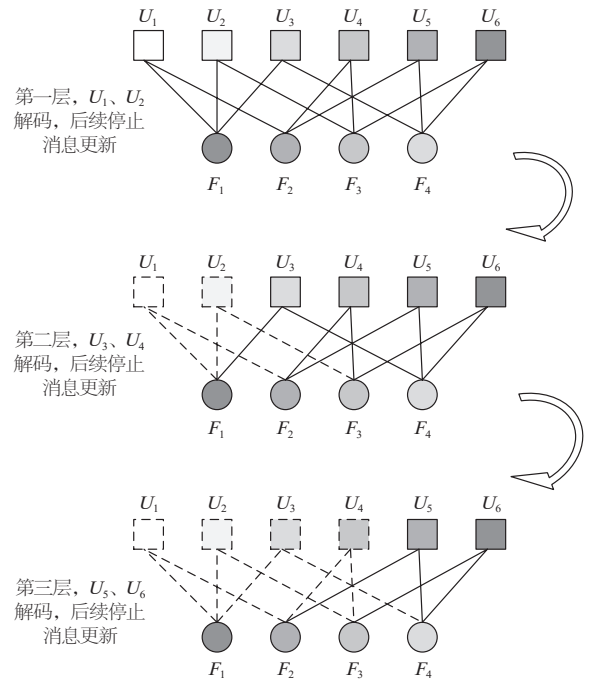


图1 因子图裁剪过程

### 2.2 复杂度分析

这种不完全迭代的MPA算法对于先检测的用户,其迭代次数得到了减少,可以降低系统的复杂度,因为先解码的用户在后续用户的检测中停止了消息更新,使因子图发生裁剪,从而使资源节点的度减少,最后使系统的复杂度会呈指数级减小。然而从算法步骤来看,对于后检测的用户可能会进行多次总迭代次数的消息更新,但是随着用户层数的增加,其复杂度会相应减小。下面根据图1粗略地分析该算法的复杂度。

上述算法步骤对用户检测按自然顺序,因此用户 $U_1$ 、用户 $U_2$ 的复杂度为:

$$\lambda_{-1} \cdot K \cdot M^d = 4\lambda_{-1} \cdot M^3 \quad (1)$$

由于第一层用户解码之后，资源节点的度发生了改变，因此第二次用户 $U_3$ 、用户 $U_4$ 的复杂度为：

$$(4\lambda_{-1} + \lambda_{-2}) \cdot M^3 + 2\lambda_{-2} \cdot M^2 + \lambda_{-2} \cdot M \quad (2)$$

同理，用户 $U_5$ 与用户 $U_6$ 的复杂度为：

$$(4\lambda_{-1} + \lambda_{-2}) \cdot M^3 + (2\lambda_{-2} + \lambda_{-3}) \cdot M^2 + (\lambda_{-2} + 2\lambda_{-3}) \cdot M \quad (3)$$

传统MPA算法的每个用户复杂度相同，都为：

$$\lambda \cdot K \cdot M^d \quad (4)$$

将不完全迭代MPA算法的复杂度与传统MPA算法复杂度进行比较，前者每个用户复杂度的指数项在不断减小，而后者复杂度的指数项未改变，不完全迭代MPA算法的复杂度远小于传统MPA算法。由于不完全迭代会导致信息丢失一部分，因此此算法下的系统性能会有所下降，但在不同情况下，可以根据不同的需求调节各种参数来取得系统性能和复杂度之间的折中，如通过增加用户层数来提升系统性能但复杂度会增加，或者减少每层迭代次数来降低复杂度但系统性能会降低。

### 3 码本优化分配与不完全迭代MPA算法联合检测

信道条件越好，接收端收到的信息越准确。SCMA的一个资源块上叠加的所有用户的总信道增益越大，在接收端进行检测的时候越容易。因此码本优化分配的思想就是利用信道增益信息对码本进行重新分配，使分配后的用户组合在对应资源节点的信道增益最大，则接收端拥有较低的误码率，系统性能得到了提升<sup>[4]</sup>。该码本分配的算法基本不会影响系统的复杂度。因此可以考虑将码本优化分配与不完全迭代MPA算法联合起来对接收信号进行检测，充分结合码本优化分配提升系统性能的特点以及不完全迭代降低系统复杂度的特点，同时不完全迭代算法还可以通过增加用户分层数来提升系统性能，使联合检测后系统性能再次提升，达到既提升系统性能也降低系统复杂度的效果。码本优化分配与不完全迭代MPA算法联合检测的算法步骤如下。

步骤一：输入各个参数 $J$ 、 $K$ 、 $F$ 、 $\Psi_{K,J}$ 、 $h_{k,j}$ 。

步骤二：输出更新的因子图。

步骤三：for  $k=1:K$  do。

步骤四： $\Psi_{K,J}(n) = \max_{\Psi_{K,J}} \sum_{\{j|h_{k,j}=1\}} |h_{k,j}|$ 。

步骤五： $\hat{\Psi}_{K,J}(k) = \Psi_{K,J}(n)$ 。

步骤六： $\Psi_{K,J} = \Psi_{K,J} - \Psi_{K,J}(n)$ 。

步骤七：end。

步骤八：更新后资源节点与用户节点的组合关系为

$$F_k \leftarrow \Psi_{K,J}(k), k=1,2,\dots,K。$$

步骤九：更新因子图后采用不完全迭代MPA算法进行检测。

### 4 改进的串并结合MPA算法

系统的串行处理比并行处理需要消耗更多的时间。串行MPA算法<sup>[5]</sup>由于采用串行处理节点之间的消息更新，更新后的消息能够立即传递，因此系统只需要较少的迭代次数就能达到收敛状态，在一定程度上降低了系统复杂度。然而串并结合的算法在串行的基础上又引入了并行，虽然能够在一定程度减少处理时延，但在相同迭代次数下必然又增加了系统复杂度。为了在系统处理时延与复杂度之间取得平衡，可以对已有的串并结合MPA算法进行改进。首先保留基于资源节点的串行MPA算法，为了降低系统复杂度，采用不完全迭代MPA算法代替传统MPA算法，将这两种算法结合进行接收端检测。

图2给出了基于资源节点的串行MPA算法<sup>[6]</sup>与不完全迭代MPA算法结合的改进算法，其中 $t_{\max \text{ serial}}$ 表示进行串行迭代的最大次数。

从图2可以看出，改进的串并结合MPA算法首先进行 $t_{\max \text{ serial}}$ 次迭代的串行MPA算法，剩余的迭代次数进行不完全迭代MPA算法。

该改进算法的流程与串并结合的MPA流程相似，首先，检测之前需要输入的部分信息，包括：接收端的接收信号 $y$ ，信道矩阵 $H$ ，信道噪声方差 $N_0$ ，串行MPA算法的最大迭代次数 $t_{\max \text{ serial}}$ ，系统最大迭代次数 $t_{\max}$ 。 $t_{\max} - t_{\max \text{ serial}}$ 是进行不完全迭代的总迭代次数。

然后进入算法第一步，即初始化信息，初始用户发送每个码字的概率相等，每个资源节点用相同的概率将信息传送到用户节点。

紧接着进入算法第二步，即当前迭代次数还没有达到事先设定的串行MPA算法的最大迭代次数时，执行基于资源节点的串行MPA算法。

随后进入算法第三步，即当前迭代次数超过事先设定的串行MPA算法的最大迭代次数而未达到系统最大迭代次数时，执行不完全迭代算法。

最后一个步骤，所有迭代次数完成后，用户节点输出各自发送码字的概率，以便后续对其进行对数似然比处理，检测用户发送的信息。

本文提出的改进算法将传统MPA算法替换为不完全迭代MPA算法与基于资源节点的串行MPA算法结合，既能在一定程度上改善串行迭代算法带来的处理时延问题，还能在一定程度上降低系统复杂度。

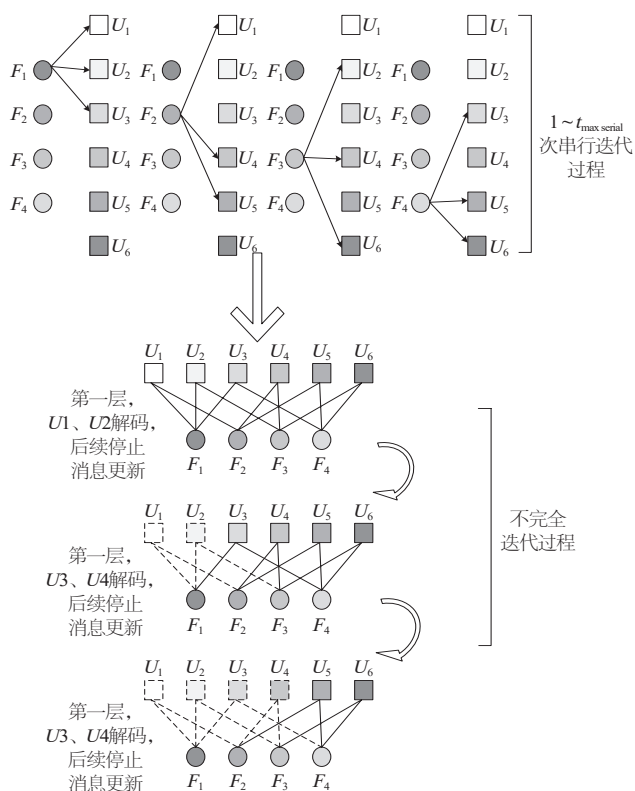


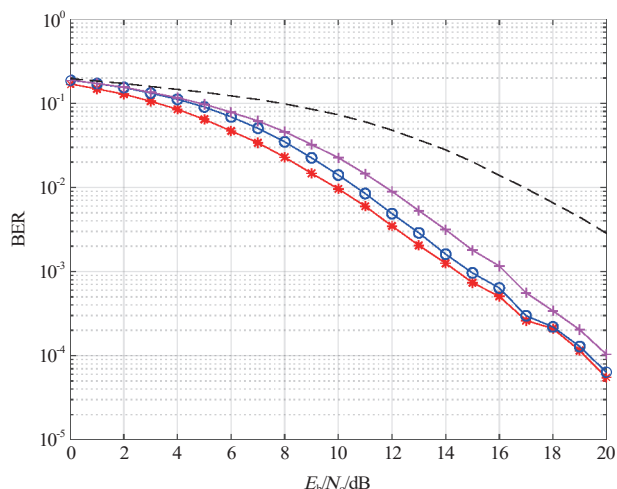
图2 改进的串并结合MPA算法迭代过程

## 5 仿真分析

本文将SCMA应用在卫星通信系统中,分析码本优化分配与不完全迭代MPA联合检测算法的性能以及改进的串并结合MPA算法的性能与收敛性。本文以6个用户同时复用4个资源块为例,仿真参数为用户数 $J=6$ ,扩频因子 $F=4$ ,码本尺寸 $M=4$ ,过载率 $\lambda=150\%$ ,卫星信道使用ITU-R M.1225所提供的Model C信道的参数<sup>[7]</sup>作为卫星信道参数。本文进行了仿真实验,仿真结果如图3~图5所示。

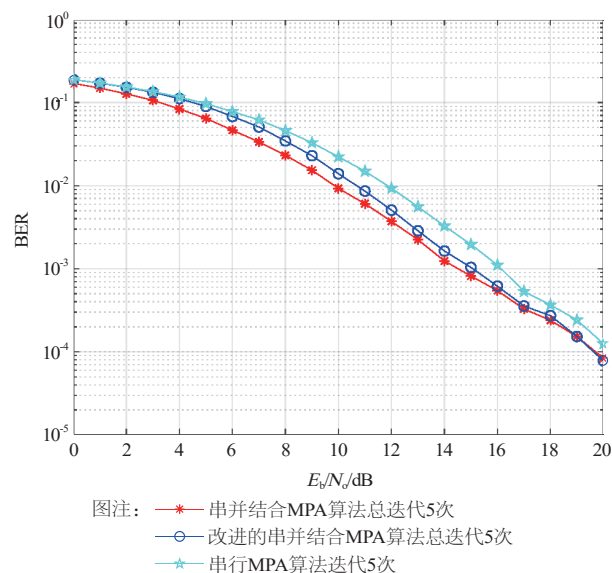
从图3可以看出,码本优化分配与传统MPA算法联合检测的性能最好,这是因为传统MPA检测算法的误码率性能很好,再通过码本的优化分配再次提升了系统的性能,通过联合检测会使系统的性能更优,但系统复杂度很高。相反,随机码本分配与不完全迭代MPA算法联合检测的性能最差,但在不完全迭代MPA算法基础上通过对码本进行优化分配,可以改善系统性能。该联合方式不仅在系统性能上得到了提升,而且因为检测端的不完全迭代使得系统复杂度得到了较大程度的降低。

图4对串行MPA算法、串并结合的MPA算法、改进的串并结合MPA算法3种算法在总迭代次数为5的情况下进行了性能仿真分析。其中串并结合MPA算法及改进的



图注: \* 码本优化分配+传统MPA 5次迭代  
○ 随机码本分配+传统MPA 5次迭代  
+ 码本优化分配+3层, 每层迭代次数(2,2,1), 每层解码2用户  
--- 随机码本分配+3层, 每层迭代次数(2,2,1), 每层解码2用户

图3 两种码本分配方式分别与不完全迭代MPA以及传统MPA联合检测性能



图注: \* 串并结合MPA算法总迭代5次  
○ 改进的串并结合MPA算法总迭代5次  
★ 串行MPA算法总迭代5次

图4 串行MPA、串并结合MPA以及改进的串并结合MPA 3种算法的性能对比

串并结合MPA算法中串行MPA进行的迭代次数都为2,剩余的次数用于并行迭代。从图4中可以看出,串并结合的MPA算法性能最好,其次是改进的串并结合MPA算法,最差的是串行MPA算法。这是因为采用串行与并行MPA的结合,经过串行2次迭代之后,消息已经趋于收敛状态,再经过并行迭代消息更具可靠性,因此使得最后系统的性能得到提升,同时后面3次迭代为并行处理,相对5次迭代的串行MPA来说,减少了处理时延。对于改进的串并结合MPA算法,因为采用了不完全迭代,并且每

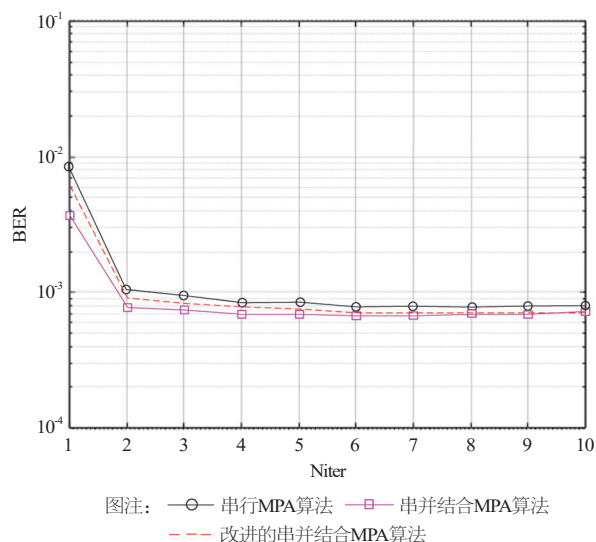


图5 串行MPA算法、串并结合MPA算法以及改进的串并结合MPA算法的收敛性比较

层用户的迭代次数为1，性能相对原有串并结合算法来说有所下降，但系统复杂度却得到明显下降，而且与原有串并结合算法具有相同的减少处理时延的特点，这种算法用在对复杂度要求低的卫星通信系统比较合适。

图5对改进的串并结合MPA算法、串并结合的MPA算法及串行MPA算法的收敛性进行比较。从图5中可以看出当 $E_b/N_0$ 一定时，3种算法的误码率都随着迭代次数的增加而下降，最后趋于稳定，其中在迭代次数较小的情况下，串并结合MPA算法的误码率性能优于改进的串并结合MPA算法与串行MPA算法，串行MPA算法的误码率性能在三者中最差，但3种算法的性能差距不是特别大。随着迭代次数的增加，大概经过3次消息更新迭代后，3种算法的性能趋于稳定，并且每种算法下的误码率都接近。总的来说，改进的串并结合MPA算法拥有与串行MPA算法相似的收敛速度，还能降低系统复杂度，可用作卫星通信系统的检测算法。

## 6 结束语

本文将稀疏码多址技术应用于卫星通信系统，对其检测算法进行了相关研究。提出将码本优化分配与不完全迭代MPA进行联合检测的算法，通过仿真分析发现，该算法能够在提升系统性能的同时降低复杂度，对于复杂度要求低的卫星通信系统来说是可取的。另外针对检测算法的收敛性，提出改进的串并结合MPA算法，该算法在系统性能下降不多时能够加快系统收敛速度并减少处理时延，而且相比传统串并结合MPA算法降低了系统复杂度，可用作卫星通信系统的检测算法。

## 参考文献：

- [1] NIKOPOUR H, BALIGH H. Sparse code multiple access[C]//2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), London, 2013: 332-336.
- [2] 张雪婉, 葛文萍, 吴雄. 基于SCMA系统的多用户检测消息传递算法[J]. 计算机工程, 2018,44(5):88-93.  
ZHANG X W, GE W P, WU X. Multi-user detection message passing algorithm based on SCMA system[J]. Computer Engineering, 2018,44(5):88-93.
- [3] 李玉菱. 稀疏码多址接入技术研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2017.  
LI Y P. Research on sparse code multiple access technology[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2017.
- [4] 马新迎, 杨霖, 林旭彬. 稀疏码多址系统中码本分配优化[J]. 信号处理, 2018,34(2):148-154.  
MA X Y, YANG L, LIN X B. Optimization of codebook allocation in sparse code multiple access system[J]. Signal Processing, 2018,34(2):148-154.
- [5] 杜洋, 董彬虹, 王显俊, 等. 基于串行策略的SCMA多用户检测算法[J]. 电子与信息学报, 2016,38(8):1888-1893.  
DU Y, SONG B H, WANG X J, et al. SCMA multi-user detection algorithm based on serial strategy[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016,38(8):1888-1893.
- [6] 吉明明, 郑建宏. 基于变量节点串行策略的SCMA低复杂度译码研究[J]. 电信科学, 2017,33(9):50-57.  
JI M M, ZHENG J H. Study on SCMA low complexity decoding based on variable node serial strategy[J]. Telecommunications Science, 2017,33(9):50-57.
- [7] ITU-R M.1225. Guideline for evaluation of radio transmission technologies for IMT-2000[S]. 1998.

## [作者简介]



蒋怡婷（1994-），女，四川眉山人，硕士研究生，主要研究多址接入技术。



朱立东（1968-），男，四川邻水人，教授，博士，博士生导师，主要研究方向为卫星通信。