



过载率对上行 SCMA 系统影响分析

张宏扬, 郑长亮, 陆宇, 刘华平

(杭州电子科技大学通信工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 稀疏码多址接入 (sparse code multiple access, SCMA) 以其优异性能成为 5G 多址接入技术的热门候选, 而海量接入是 5G 所面临的主要挑战之一, SCMA 自然要承受过载传输的考验。针对这一问题, 探究了上行 SCMA 系统在不同过载传输场景中的性能表现。首先, 从误码率性能与检测复杂度两个方面, 分析系统过载率对系统检测译码的影响; 其次, 通过建立系统过载率与系统平均和速率的关系模型, 分析系统过载率对系统传输速率的影响; 最后, 通过实验仿真验证分析的合理性与准确性。

关键词: 5G; 稀疏码多址接入; 消息传递算法; 过载率

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2018115

Impact of overload factor on uplink SCMA system

ZHANG Hongyang, ZHENG Changliang, LU Yu, LIU Huaping

School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China

Abstract: Sparse code multiple access (SCMA) is regarded as a promising multiple access technology for 5G because of its excellent performance. One of the major challenges that 5G networks are facing is the massive connectivity in terms of both data volume and the number of devices, thus SCMA must be capable of coping with transmission overload. Analyzing the performance of the uplink SCMA system in overloading scenarios was focused on. At first, the influence of the overloading factor on the detection and decoding complexities and error performances of the uplink SCMA system were analyzed. Then, by establishing the relationship between the overloading factor and the average sum-rate, the impact of the overloading factor on the transmission rate of the uplink SCMA system was analyzed. Extensive numerical results are provided to verify the accuracy and insights derivable from the analytical results.

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

收稿日期: 2017-10-17; 修回日期: 2018-02-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61671282, 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); “电子科学与技术”浙江省一流学科 A 类资助项目 (No.GK178800207001/029)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61671282, No.61471153), Scientific Research Foundation of Hangzhou Dianzi University (No.KYS085614014, No.ZX150204307002/001), The Open Research Foundation of “Electronics Science and Technology” Top-ranking Discipline Class A in Zhejiang Province (No.GK178800207001/029)

1 引言

多址接入是移动通信系统中的重要技术之一,是实现多用户同时通信并区分用户的关键。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,而多址接入技术也随之不断变革。前几代移动通信系统主要采用正交多址接入技术,而面向5G移动通信系统^[1-3],非正交多址接入(non-orthogonal multiple access, NMA)技术^[4]更受青睐。这是由于NMA技术能进一步提高系统容量且能增加有限资源用户连接数,可以更好地适应具有超高流量密度、超高连接数密度、超高移动性等特征的5G应用场景^[5,6]。

稀疏码多址接入(sparse code multiple access, SCMA)^[7]是华为公司提出的一种码域NMA技术,是多维调制方法与LDSMA(low density signature multiple access, 低密度签名多址接入)^[8]技术的融合。LDSMA系统中的QAM调制与低密度扩频处理,在SCMA系统中合并为编码操作。SCMA属于免调度的竞争随机接入,不仅能使移动通信系统在频谱效率和吞吐量上表现优异,而且能使得系统可接入用户数目更大、更灵活。因此,SCMA技术得到了学术界和工业界的认可与重视,逐渐成为5G多址接入技术的有力候选者。

SCMA是面向5G的新型空口技术,目前还没有完全成熟,研究者们针对其各方面性能进行

了分析与验证。参考文献[9-10]对SCMA在5G场景中的能效问题进行了分析与探讨,参考文献[11]对SCMA系统的系统容量问题进行了探究,参考文献[12-13]则对使用不同检测算法的SCMA系统接收机的误码率性能进行了分析与评估。而在5G时代“万物互连”的通信需求下,作为备受期待的新一代空口技术,SCMA不可避免地要面对过载传输的挑战。

基于这一点,本文着重分析过载问题对上行SCMA系统的影响。参考文献[12]分析了过载率对上行SCMA系统检测误码率的影响,本文在此基础上加入了关于过载率对系统检测复杂度影响的分析,给出了基于过载率的系统检测计算量表达式。此外,系统传输速率是通信系统的一个重要性能指标^[14];而在目前的相关研究中,尚无针对过载率问题的上行SCMA系统传输速率分析。故本文建立了上行SCMA系统的过载率与系统平均和速率(average sum rate, ASR)之间的关系模型,借以分析过载率对系统传输速率的具体影响。

2 系统模型

假定一个上行SCMA系统,其系统框架如图1所示。系统中一个基站(base station, BS)服务 J 个用户,假定所有用户和基站都是单天线。所有用户共享 K 个正交时频资源(OFDM子载波),

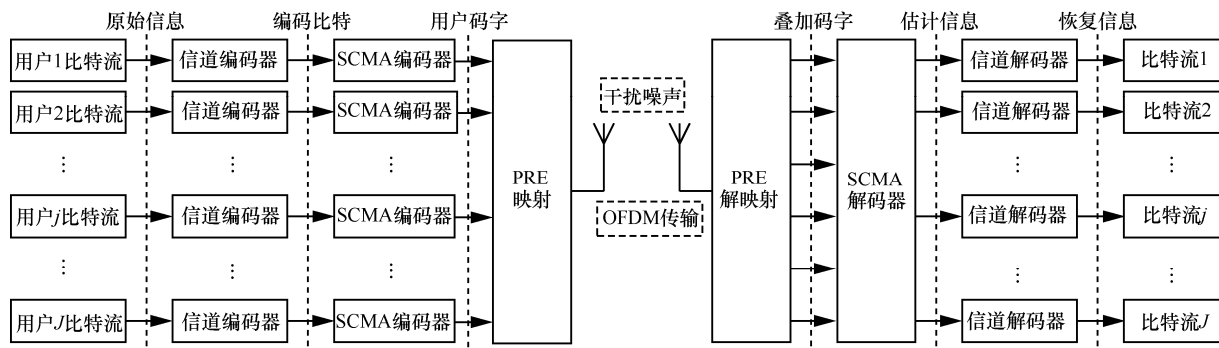


图1 上行SCMA系统



d_j 为用户 j 到BS的距离,其中, $j=1,2,\dots,J$ 。对于该上行SCMA系统,其过载率(overloading factor, OF)等于系统中用户数量与正交时频资源数量之比,即 $OF=J/K$ 。

首先,信道编码器(如Turbo编码器)对 J 个用户的比特信息进行编码。其次,SCMA编码器将用户编码比特,(根据系统码本)直接映射为多维复数码字。

其中,码本设计是SCMA技术的一个关键问题,也是其稀疏性由来。本文系统的码本设计基于参考文献[15]给出的一种次优设计方案,该方案为迄今绝大多数SCMA研究者所采用。 $J=6$ 时,系统码本如图2所示。其中, M 代表码本大小, $M=2^l$, l 为用户编码比特的位数; N 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。

接下来,进行物理资源单元(physical resource element, PRE)映射,即将 J 个用户的码字信息映射到 K 个OFDM子载波上。该系统的PRE映射过程,可借助图3所示因子^[16]来阐述。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 ($i=1,2,\dots,K$),连线则反映子载波对用户信息的承载关系。在图3中,用户1的码字信息映射到子载波1和子载波2上,而子载波1承载在用户1、用户2和用户3的码字信息。

最后,叠加的码字信息经OFDM子载波传输到该系统接收端,进行PRE解映射和检测译码等操作。在该系统接收端上,接收信号可表示为:

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

其中, $y=\{y_i\}$, $m=\{m_j\}$, y_i 为子载波 i 上的接收信号, m_j 为用户 j 的传输码字; N_0 为系统噪声。 $H_j=[h_{j1} \ h_{j2} \ \dots \ h_{jK}]^T$ 为用户 j 的信道增益, P_j 为其传输功率, $F_j=[f_{j1} \ f_{j2} \ \dots \ f_{jK}]$ 为其标记矩阵,且 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, $f_{ji}=1$;否则为零。

3 过载对系统检测的影响

多用户检测(multi-user detection, MUD)是

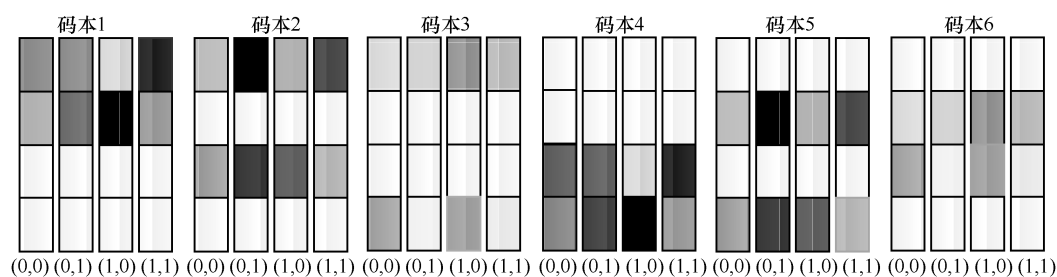


图2 系统码本 ($J=6, M=4, N=2$)

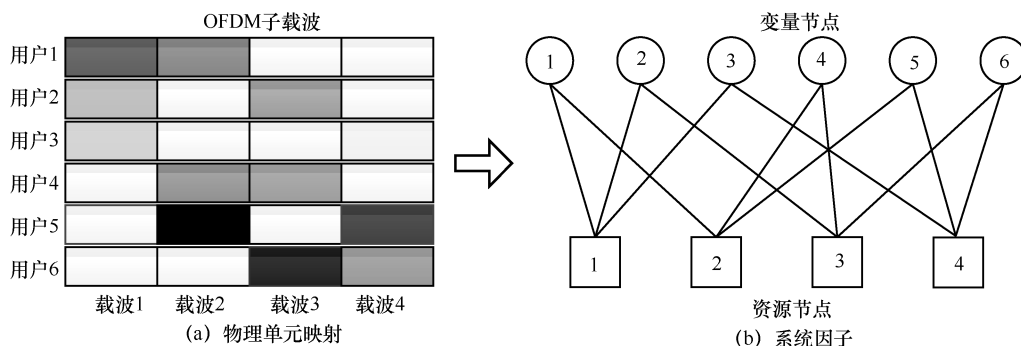


图3 系统PRE映射及对应的因子 ($J=6, K=4, OF=150\%$)

上行 SCMA 系统的核心问题之一,其直接决定着系统性能的优劣^[17]。从误码率性能和检测复杂度两个方面,分析过载率对上行 SCMA 系统 MUD 的影响。

3.1 消息传递算法

现存面向上行 SCMA 系统的接收机,基本都采用消息传递算法 (message passing algorithm, MPA)^[7,9,18]或其改进算法来对接收信号进行检测。因此,本文亦采用 MPA 对接收信号进行检测,其过程可借助图 3 所示因子来阐述,具体如下。

步骤 1 初始化。给出 VN 传递给 RN 的初始信息,即各用户所有码字的先验概率,一般假定所有码字先验概率相等;设定迭代的次数 T ;建立各资源节点 (所对应的载波) 上残差信息的集合 $\{S_i\}$,据此可估算各子载波上复合信息的条件概率。以 r_i 为例:

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

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

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, $C_{ji}(m_j)$ 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。

步骤 2 检测器对信息的估计在 VN 与 RN 之间迭代更新。以 v_j 与 r_i 为例:

$$I_{r_i \rightarrow v_1}^{(t)}(m_1) = \sum_{m_2=1}^4 \sum_{m_3=1}^4 e^{-S_i} (I_{v_2 \rightarrow r_i}^{(t-1)}(m_2) I_{v_3 \rightarrow r_i}^{(t-1)}(m_3)) \quad (4)$$

$$I_{r_i \rightarrow v_2}^{(t)}(m_2) = \sum_{m_1=1}^4 \sum_{m_3=1}^4 e^{-S_i} (I_{v_1 \rightarrow r_i}^{(t-1)}(m_1) I_{v_3 \rightarrow r_i}^{(t-1)}(m_3)) \quad (5)$$

$$I_{r_i \rightarrow v_3}^{(t)}(m_3) = \sum_{m_1=1}^4 \sum_{m_2=1}^4 e^{-S_i} (I_{v_1 \rightarrow r_i}^{(t-1)}(m_1) I_{v_2 \rightarrow r_i}^{(t-1)}(m_2)) \quad (6)$$

$$I_{v_j \rightarrow r_i}^{(t)}(m_j) = \text{normal}(ap_v(m_j) I_{r_2 \rightarrow v_j}^{(t)}(m_j)) \quad (7)$$

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

其中,上标 t 代表该信息对应于第 t 次迭代 ($t=1, 2, \dots, T$), $ap_v(m_j)$ 表示用户 v_j 码字的先验信息, $\text{normal}()$ 代表归一化处理。

步骤 3 当迭代次数达到所设置的中断次数 T 时,停止迭代;输出最终估计,即用户编码比特的对数似然比 (log likelihood rate, LLR):

$$\begin{aligned} \text{LLR}_x &= \ln \left(\frac{\sum_{m_j: b(m_j, x)=0} I_{v_j}(m_j)}{\sum_{m_j: b(m_j, x)=1} I_{v_j}(m_j)} \right) \\ &= \ln \left(\sum_{m_j: b(m_j, x)=0} I_{v_j}(m_j) \right) - \ln \left(\sum_{m_j: b(m_j, x)=1} I_{v_j}(m_j) \right) \end{aligned} \quad (9)$$

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

其中, $b(m_j, x)$ 表示码字 m_j 中第 x 个编码比特。

3.2 系统 OF 与系统检测

上面已描述 OF 为系统中用户数量与正交时频资源数量之比。结合图 3 可以看出,随着 OF 的增大, VN 个数与 RN 个数的比值增大,每个 RN 所连接的 VN 个数增多,即每个子载波上承载的用户数量增多。这势必导致用户间干扰增强,进而使系统的检测准确度下降。

另一方面,本文系统码本设计采用参考文献[15]所给方案,若令 d_r 表示一个 RN 所连接的 VN 个数,则 d_r 为确定整数,且 $d_r = N \cdot \text{OF}$ 。据第 3.1 节可推算出在基于 MPA 的上行 SCMA 系统检测中,各类运算所进行的次数,见表 1。其中, d_v 表示一个 VN 连接的 RN 个数, n 表示算法迭代次数。据表 1 可知,MPA 检测运算量大小的主要影响因子是 $N \cdot \text{OF}$,而 N 代表用户码字中非零元素个数,由系统码本决定。因此可以说,OF 对 MPA 检测运算量的大小有着决定性的影响。



表 1 上行 SCMA 系统检测 (MPA) 运算量

运算种类	次数
加法运算	$(2N \cdot \text{OF} + 1)M^{N \cdot \text{OF}} \cdot KNn \cdot \text{OF} + (d_v - 2)MKNn \cdot \text{OF} + 2MKN \cdot \text{OF}$
乘法运算	$(N \cdot \text{OF} + 2)M^{N \cdot \text{OF}} \cdot KNn \cdot \text{OF} + 4MKN \cdot \text{OF}$
指数运算	$M^{N \cdot \text{OF}} \cdot KNn \cdot \text{OF}$

综上所述, 对于一个上行 SCMA 系统而言, 其过载率的增大会降低系统检测准确性, 同时会增大系统检测复杂度。

4 过载对系统平均和速率的影响

SCMA 系统的一大优势是其支持过载传输, 这是其总传输速率高于 OFDMA 系统的关键。本节主要分析上行 SCMA 系统的过载率对其平均和速率的影响, 并建立两者关系模型。

4.1 上行 SCMA 系统 ASR

据式 (1) 可知, 在上行 SCMA 系统中, 对于给定的子载波 i , 其接收信号为:

$$y_i = \sum_{j=1}^J f_{ij} \sqrt{P_j / N} h_{ij} m_j + N_{0,i} \quad (11)$$

其中, $N_{0,i}$ 表示子载波上 i 的噪声。

本文系统借助 MPA 检测器与 Turbo 解码器对信号进行恢复, 而根据第 2.1 节所述基于 MPA 的检测流程可推知, 如果设置合适的迭代次数 T , MPA 检测理论上可以达到香农容量。那么对于该系统中给定的子载波 i , 其和速率应该与多址信道速率相类似^[19-20], 进而得到此载波上的和速率:

$$R_i = \text{lb}(1 + \frac{1}{N} \sum_{j=1}^J f_{ij} P_j |h_{ij}|^2) \quad (12)$$

以此类推, 可得到该系统的 ASR:

$$\bar{R} = \sum_{i=1}^K E \left(\text{lb}(1 + \frac{1}{N} \sum_{j=1}^J f_{ij} P_j |g_{ji}|^2 d_j^{-\alpha}) \right) \quad (13)$$

其中, g_{ji} 为用户 j 与子载波 i 之间的瑞利衰落信道增益, α 为路径损耗指数。

4.2 系统 OF 与系统 ASR

进一步分析式 (10), 利用詹森不等式可得到该系统 ASR 的下界:

$$\begin{aligned} \bar{R} &= \sum_{i=1}^K E \left(\text{lb}(1 + \frac{1}{N} \sum_{j=1}^J f_{ij} P_j e^{\ln(|g_{ji}|^2)} d_j^{-\alpha}) \right) \\ &\geq \sum_{i=1}^K \text{lb}(1 + \frac{1}{N} \sum_{j=1}^J f_{ij} P_j d_j^{-\alpha} \cdot e^{E[\ln(|g_{ji}|^2)]}) \quad (14) \\ &= \sum_{i=1}^K \text{lb}(1 + \frac{1}{N} \sum_{j=1}^J f_{ij} P_j d_j^{-\alpha} \cdot e^{-\gamma}) \end{aligned}$$

对于式 (14) 中的 $\ln(|g_{ji}|^2)$, 有:

$$E[\ln(|g_{ji}|^2)] = \int_0^\infty e^{-x} \ln(x) dx = -\gamma \quad (15)$$

其中, γ 为欧拉常数, 通常取 0.577 2。

而 $J=6, K=4$ 时, 根据该系统的 PRE 映射过程 (如图 3 所示), 可得到该系统的标记矩阵 $F_{K \times J}$ (即 $\{F_{ij}\}$):

$$F_{K \times J} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

那么, 可以推知当 i 确定时, 有:

$$\sum_{j=1}^J f_{ij} = d_r (i=1, 2, \dots, K) \quad (17)$$

若假定该系统中各用户传输功率、各用户与 BS 的距离均相等, 即对任意 i, j , 有 $P_j = P_0, d_j = d_0$ 。此时, 系统中 OFDM 子载波的用户分配不会影响到系统 ASR, 则可得到该上行 SCMA 系统 OF 与其 ASR 之间的关系模型:

$$\begin{aligned} \bar{R} &\geq K \cdot \text{lb}(1 + (d_r / N) \cdot P_0 d_0^{-\alpha} \cdot e^{-\gamma}) \\ &= K \cdot \text{lb}(1 + \text{OF} \cdot P_0 d_0^{-\alpha} \cdot e^{-\gamma}) \end{aligned} \quad (18)$$

5 实验仿真与结果分析

5.1 系统 OF 与系统检测性能

为了验证第 3 节的分析, 对本文上行 SCMA 系统的检测译码进行仿真, 结果如图 4 及图 5 所示。

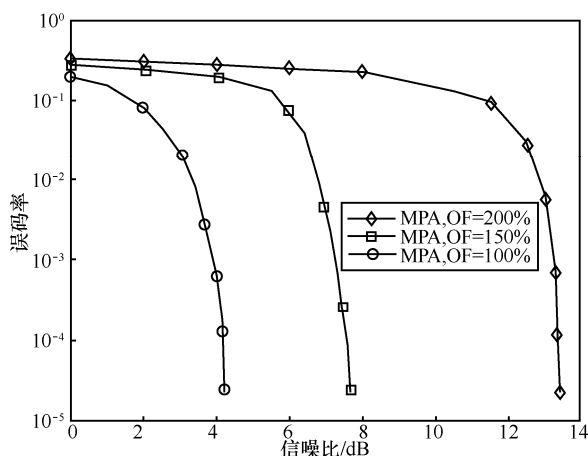


图4 不同过载率下上行 SCMA 系统的检测误码率

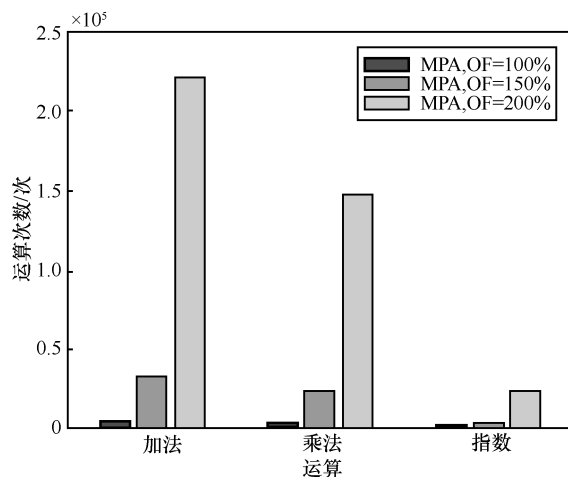


图5 不同过载率下上行 SCMA 系统检测运算量

仿真设置见表2。

表2 仿真设置（一）

场景	检测算法	n	J	K	OF
1	MPA	6	4	4	100%
2	MPA	6	6	4	150%
3	MPA	6	8	4	200%

其中，系统码本设计基于参考文献[15]给出的设计方案，且 $M=4$ ； $N=2$ ，3种场景采用同一系统码本；信道编码采用1/2 Turbo，且Turbo解码器迭代次数为3；噪声设定为高斯噪声。

在图4中，在BER达到 10^{-4} 时，OF由100%增至150%，SNR要求增大大约3.5 dB；OF由150%增至200%，SNR要求增大大约5.5 dB。这

意味着若传输信号的SNR给定，上行SCMA系统的OF增大时，接收信号的误码率也随之增大。而图5直观反映出，在上行SCMA系统的检测过程中，加法、乘法、指数3种运算的运算量都随着OF的增大而增长，且增长的幅度都逐渐加大。

仿真结果表明，随着系统过载率的增大，上行SCMA系统的检测误码率性能逐渐衰退，且其检测复杂度不断增大。这也验证了第4.1节分析的合理性。

5.2 系统OF与系统ASR

为了验证第4节的分析，进行了两种传输场景下的SCMA系统ASR性能仿真，仿真结果如图6所示。仿真设置见表3，其中 P_0 的取值等于用户传输SNR。

表3 仿真设置（二）

场景	系统	J	K	OF	d_0	α
1	OFDMA	4	4	—	3	4
2	SCMA	6	4	150%	3	4
3	SCMA	8	4	200%	3	4

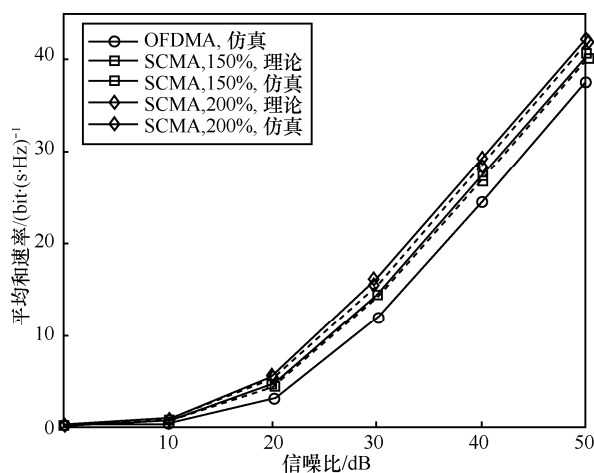


图6 不同过载率下上行 SCMA 系统平均和速率

从图6可以看出，当该上行SCMA系统的过载率大于100%时，其ASR明显大于OFDMA系统的ASR。另一方面，对于该系统，其OF=150%时的系统ASR，始终大于其OF=100%时的系统



ASR; 同样其 OF=200%时的系统 ASR, 始终大于其 OF=150%时的系统 ASR。

仿真结果验证了第 4.2 节分析的准确性, 同时证明上行 SCMA 系统的平均和速率随着系统过载率的增大而增大。

6 结束语

面向 2020 年及以后, 移动互联网业务与物联网业务迅速增长。在此背景下, 本文阐述上行 SCMA 系统的技术原理与框架, 对其在过载传输场景中的表现进行探究。分析系统过载率对系统检测误码率的影响, 给出系统过载率与系统检测复杂度、系统平均和速率之间的关系式, 并通过实验仿真进行验证。

上行 SCMA 系统是免调度的竞争随机接入机制, 其过载率可由系统码本调节。因此今后的工作, 可以进一步研究不同 5G 场景中上行 SCMA 系统的码本设计问题。

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] 林金桐, 许晓东. 第五代移动互联网[J]. 电信科学, 2015, 31(5): 7-14.
LIN J T, XU X D. The 5th generation of mobile internet [J]. Telecommunications Science, 2015, 31(5): 7-14.
- [3] 王庆扬, 谢沛荣, 熊尚坤, 等. 5G 关键技术与标准综述[J]. 电信科学, 2017, 33(11): 112-122.
WANG Q Y, XIE P R, XIONG S K, et al. Key technology and standardization progress for 5G[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(11): 112-122.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] NIKOPOUR H, BALIGH H. Sparse code multiple access [C]// Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), September 9-11, 2013, London, UK. Piscataway: IEEE Press, 2013: 332-336.
- [8] 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.
- [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]// IEEE Global Telecommunications Conference Workshops, December 8-12, 2014, Austin, TX, USA. Piscataway: IEEE Press, 2014: 4782-4787.
- [10] DONG Y T, QIU Y L, LIANG X W. Energy efficiency maximization for uplink SCMA system using CCPSO[C]// IEEE Global Telecommunications Conference Workshops, December 4-8, 2016, Washington, DC, USA. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-5.
- [11] CHENG M, WU Y, CHEN Y. Capacity analysis for non-orthogonal overloading transmissions under constellation constraints [C]// Wireless Communications & Signal Processing (WCSP), October 15-17, 2015, Nanjing, China. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-5.
- [12] YANG H L, FANG X M, LIU Y P, et al. Impact of overloading on link-level performance for sparse code multiple access [C]// IEEE Wireless and Optical Communication Conference (WOCC), May 21-23, 2016, Chengdu, China. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-4.
- [13] BAO J C, MA Z, XIAO M, et al. Error performance of sparse code multiple access networks with joint ML detection [C]// IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), May 15-18, 2016, Nanjing, China. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-5.
- [14] 曹志刚, 钱亚生. 现代通信原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992: 9-11.
CAO Z G, QIAN Y S. Modern communication principle[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1992: 9-11.
- [15] 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. Piscataway: IEEE Press, 2014: 1-5.
- [16] LOELIGER H. An introduction to factor graphs [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2004, 21(1): 28-41.
- [17] 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. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-6.

[18] KSCHISCHANG F R, FREY B J, LOELIGER H. Factor graphs and the sum-product algorithm [J]. IEEE Transactions on Informatro Theory, 2001, 47(2): 498-519.

[19] AL-IMARI M, IMRAN M, TAFAZOLLI R, et al. Subcarrier and power allocation for LDS-OFDM system [C]// IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), May 15-18, 2011, Yokohama, Japan. Piscataway: IEEE Press, 2011: 1-5.

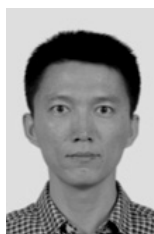
[20] 杨正. 5G 移动网络非正交多址接入及相关技术研究[D]. 西安: 西南交通大学, 2016.

YANG Z. Investigation on non-orthogonal multiple access and related technology for 5th generation mobile networks [D]. Xi'an: Southwest Jiaotong University, 2016.

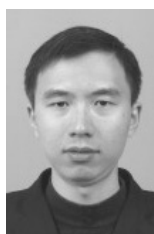
[作者简介]



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。



陆宇 (1977-), 男, 杭州电子科技大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为高效视频压缩方法、立体视频处理等。



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。