中国科学: 信息科学 2017 年 第 47 卷 第 6 期: 789–799
SCIENTIA SINICA Informationis
论文

超蜂窝架构下基于跳码的 SCMA 控制信道接入设计

廉晋[1,2*], 周世东[1,2], 张秀军[1,2], 王玉锋[1,2]

1. 清华大学电子工程系, 北京 100084
2. 清华信息科学与技术国家实验室 (筹), 北京 100084
* 通信作者. E-mail: lianj15@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2017–2–15; 接受日期: 2017–03–27; 网络出版日期: 2017–06–13
国家重点基础研究发展计划 (973) (批准号: 2012CB316002)、国家高技术研究发展计划 (863) (批准号: 2015AA01A701)、国家自然科学基金 (批准号: 61201192, 61631013)、国家科技重大专项课题 (批准号: 2016ZX03001009) 和清华大学自主科研项目 (批准号: 2015Z02-3) 资助项目

摘要 为了实现高能效绿色通信同时满足高速增长的业务量需求, 未来网络将引入超蜂窝架构, 通过控制与业务覆盖分离的方式实现柔性覆盖. 在超蜂窝架构里, 当用户有业务需求时, 将免授权地随机接入控制信道发送请求信令. 作为目前较为理想的随机接入方案, 稀疏码多址接入 (sparse code multiple access, SCMA), 通过为用户分配不同码本实现非正交多址接入, 从而在资源数一定的情况下提升系统的容量, 允许大量用户同时接入, 进而可以作为控制信道中的随机接入方式. 然而, 在随机接入的过程中, 可能会出现采用相同码本的用户同时接入的情况, 称之为码本碰撞, 这会导致接收性能的恶化, 并且解码算法的运算量随着码本碰撞的用户数成指数增长, 严重增加了最坏情况延时. 为此, 本文提出一个基于时变码本的跳码方案. 仿真结果表明这一新方案提升了解码准确性, 进一步通过在发生严重码本碰撞时有选择地抛弃 SCMA 子块, 可以在较低的误码率代价下大大降低整体的解码延时, 从而满足控制信令高可靠、低延时的传输需求.

关键词 绿色通信, 超蜂窝, 控制信道, 免授权接入, SCMA

1 引言

未来蜂窝移动网络需要高能效绿色网络, 在业务量空间和时间上高度动态变化时, 按峰值业务密集部署的蜂窝全时工作会带来极大的能耗, 无法支持可持续发展. 针对能效与资源的优化问题, 文献 [1∼5] 等提出了绿色通信的一系列思想与举措. 文献 [6,7] 提出一种全新的超蜂窝网络架构作为有效的解决途径. 其核心在于通过控制覆盖和业务覆盖分离实现了网络的柔性覆盖与资源的弹性匹配.

引用格式: 廉晋, 周世东, 张秀军, 等. 超蜂窝架构下基于跳码的 SCMA 控制信道接入设计. 中国科学: 信息科学, 2017, 47: 789–799, doi: 10.1360/N112017-00038
Lian J, Zhou S D, Zhang X J, et al. An SCMA control channel accessing scheme based on codebook-hopping under hyper-cellular network architecture (in Chinese). Sci Sin Inform, 2017, 47: 789–799, doi: 10.1360/N112017-00038

© 2017《中国科学》杂志社

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N112017-00038

通过无缝的控制覆盖, 保证所有用户的实时在线体验, 从而允许大部分处于业务量很小区域的业务覆盖基站可以进入休眠状态以节能.

然而由于控制覆盖基站的负责区域扩大, 以及未来终端数量的激增 [8], 单个控制覆盖基站面临超大容量的控制信令服务的压力, 特别是需要保障有业务传输需求的用户发出请求时, 网络侧能够及时启动相应的业务基站. 虽然单次请求的数据量不大, 是典型的孤立短包业务, 但这种潜在的有接入请求的终端数量巨大, 如果每个短包业务都需要通过传统的基站与终端间多次握手, 分配无线资源后传输, 会占用大量宝贵的控制信道资源. 而资源开销与实际数据传输本身相比, 代价巨大. 作为控制信令, 不仅有低传输开销的需求, 更有低时延和高可靠的要求 [9]. 为此, 有必要对其采用无授权接入的方式进行传输. 目前有很多关于短包传输的研究, 诸如文献 [10~13], 但是大部分工作没有考虑无授权接入的需求.

在之前的研究中, 文献 [14] 提出了稀疏码多址接入 (sparse code multiple access, SCMA) 这一基于竞争的上行传输方案, 通过为用户分配不同码本实现非正交的多址接入 [15]. 利用对码字的稀疏性设计, SCMA 能够保证即使来自多个不同码本的码字叠加在一起, 接收机仍然能够解码, 从而实现接入用户数多于可用的正交通信资源数的过载情况 [16], 可大大增加系统容量, 这是传统的正交多址接入无法实现的. 而码字的非正交性, 使得接收机可以采用消息传递算法 (message passing algorithm, MPA) [17] 等低复杂度接收算法, 而不需要使用复杂度过高的最大似然方法 (most likelihood, ML) 来进行用户分离与解码. 正是因其一定程度上的多用户分离能力, SCMA 是目前免授权接入的一种较为理想的解决方案 [18].

在基于 SCMA 的免授权接入系统中, 如果能够保证不同用户使用的是不同码本, 那么接收机可以提供令人满意的接收性能. 然而, 在超蜂窝架构下, 无授权接入即意味着没有调度与分配, 用户必然是使用注册入网时的固定码本或者随机选择码本. 由于系统中的潜在用户数可能远远多于可用的码本数, SCMA 方案存在较高的码本碰撞概率, 严重的码本碰撞会导致分离性能的下降和运算复杂度的激增. 为此, 本文提出一种跳码 SCMA 方案, 核心思想是让每个注册用户根据预设的跳码序列采用时变的码本, 对每个不同的子块采用不同的码本传输, 从而在一个短包内提供码本碰撞图样的分集. 再利用纠错码的能力降低码本碰撞带来的损失. 在跳码多址传输的基础上, 接收机可以采用完全 MPA 算法实现, 即所谓跳码的完全解码方案. 此时即使部分严重碰撞的 SCMA 子块解调性能下降, 但由于仍存在其他碰撞轻微的 SCMA 子块可获得高质量的软解调信息, 再通过外码译码即可获得较为均衡的消息块传输质量, 避免了传统非跳码 SCMA 随机接入中, 要么整体碰撞轻微, 要么整体碰撞严重导致的较高的中断概率. 在此基础上, 为了进一步降低解调复杂度, 还提出了一种跳码的精简解码方案, 即直接将碰撞严重的码块抛弃, 这样可以大大降低整体计算复杂度, 而性能损失很小.

本文结构安排如下: 第 2 节对现有的 SCMA 上行传输方案进行综述, 并指出其应用于无授权的控制信令传输存在的问题; 第 3 节给出为解决相应问题所提出的跳码设计; 第 4 节通过仿真结果验证方案的有效性; 第 5 节总结全文.

2 上行 SCMA 综述

2.1 SCMA 简介

SCMA 稀疏码多址接入是一种基于多维码本的非正交传输技术 [16]. 编码器根据给定的码本将用户 u_i 的 $\log_2 M$ 个比特 $\boldsymbol{b}_{u_i}^{\mathrm{T}} = [b_{u_i}^{(1)}, b_{u_i}^{(2)}, \ldots, b_{u_i}^{(\log_2 M)}]$ 映射到一个 L 维的码字向量, 并且每个维度通

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N112017-00038

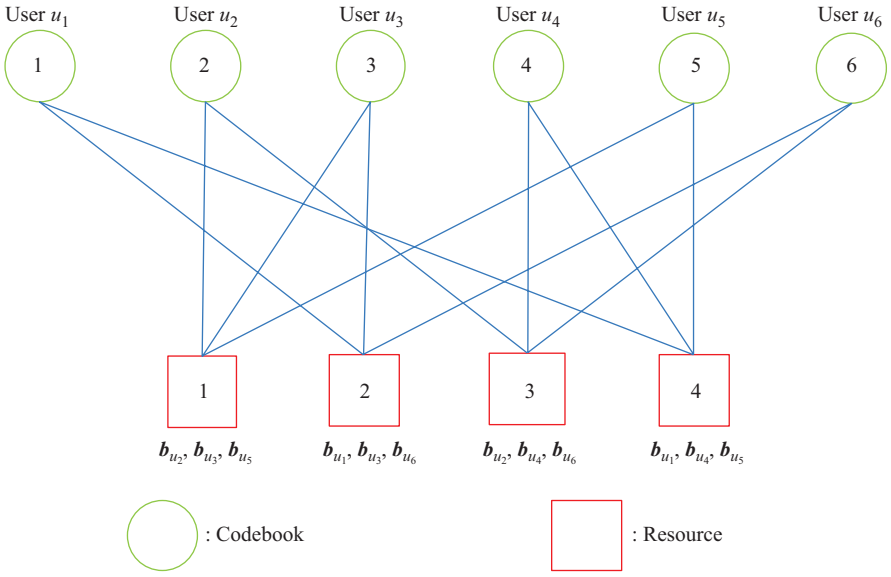


图 1 (网络版彩图) 各用户采用不同码本时 SCMA 因子图. $L = 4$, $N = 2$, $K = 6$, $U = 6$

Figure 1 (Color online) SCMA factor graph when all users adopt different codebook. $L = 4$, $N = 2$, $K = 6$, $U = 6$

过一个正交的通信资源发送 (例如 OFDM 的一个子载波). 为了引入稀疏性从而降低接收译码的复杂度, 每个码字中只有 N 个位置非零, 其余 $L - N$ 个位置均为 0. 因此, 一个码本实际对应着从 L 个位置中选取 N 个非零位置的组合. 对于不同的 L 与 N 的选取, 总共可用的码本数有 $K = \binom{L}{N}$ 种. 例如, 在 $L = 4$, $N = 2$, $K = 6$ 时, $U = 6$ 个接入的用户恰好采用了不同码本的理想情况对应的系统因子图, 如图 1 所示, 图中的每一条边连接一个用户节点和资源节点, 表示该用户码本在该资源上的调制幅度非 0, 而没有边连接的用户节点和资源节点, 表明这个用户没有使用该资源. 其中每个码本 k ($k = 1, 2, \ldots, K$) 也对应了 N 个不同的大小为 M 的备选符号集合, 用 $\Upsilon_{k,n} = \{\upsilon_{k,n}^{(1)}, \upsilon_{k,n}^{(2)}, \ldots, \upsilon_{k,n}^{(M)}\}$ 表示码本 k 对应的码字的第 n 个非零位置的备选符号集合. 为了方便, 用 j_i 表示用户 u_i 的信息索引, 其中 $j_i = 1 + \sum_{r=1}^{\log_2 M} 2^{\log_2 M - r} b_{u_i}^{(r)}$. 也就是说, j_i 可以看作用户 u_i 数据的一种等价表示, 如果其在传输中使用码本 k, 则其发送的码字的 N 个非零位置的符号分别为 $\upsilon_{k,1}^{(j_i)}, \upsilon_{k,2}^{(j_i)}, \ldots, \upsilon_{k,N}^{(j_i)}$. 当不同用户采用不同码本时, 可以看到系统的因子图的连接边具有一定的稀疏性, 因此可利用消息传递算法等低复杂度迭代算法进行接收译码, 可得到接近最优译码的性能.

2.2 上行 SCMA

文献 [14] 中给出了基于竞争的上行 SCMA 方案, 即控制信道接入所需的无授权接入方式. 其主要思想可以简单描述为当用户 u_i 注册入网时, 系统分配给其一个固定导频序列 P_{u_i} 与 SCMA 码本 C_{u_i}, 其中每个可用的导频序列, 对应于唯一的预分配的码本. 具体地讲, 其目的在于接收机只要识别出收到某个导频序列, 则必然存在一个采用相应码本的用户在工作, 且其信道可以通过对该导频序列的分析估计出来. 当用户 u_i 有数据业务需求时, 在一个同步的接入时隙里, 将无线资源正交地划分为导频部分和数据部分, 用户在导频部分发送指定的导频序列 P_{u_i}, 再将其信息比特经过信道编码器后, 每 $\log_2 M$ 个编码比特组成一个前述的子块向量 $\boldsymbol{b}_{u_i}$, 并根据预先分配的码本 C_{u_i}, 映射成码字向量 $\boldsymbol{x}_{u_i}^{\mathrm{T}} = [x_{u_i}^{(1)}, x_{u_i}^{(2)}, \ldots, x_{u_i}^{(L)}]$, 在数据部分的无线资源里发送出去. 在接收端, 首先根据接入时隙里的导频资源部分收到的信号, 识别出当前存在哪些导频序列信号, 据此, 得到当前活跃用户对应的 SCMA 码

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N112017-00038

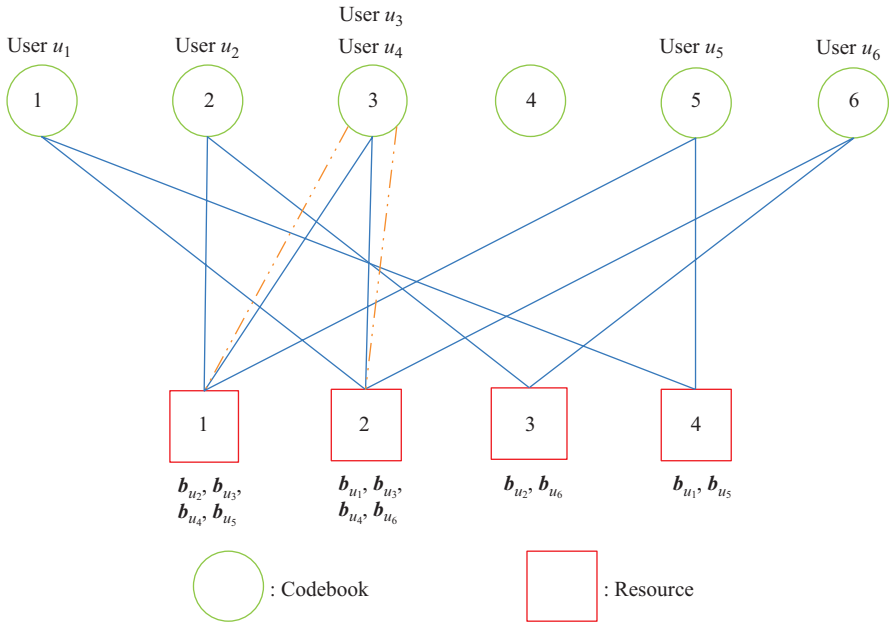


图 2　(网络版彩图) 码本 3 出现码本碰撞的因子图

Figure 2　(Color online) SCMA factor graph when codebook collision occurs on codebook 3

本. 进一步在接入资源的数据部分的每一个 SCMA 子块里, 得到一个接收信号矢量

$$\boldsymbol{y} = \sum_{i=1}^{U} \mathrm{diag}(\boldsymbol{h}_{u_i})\boldsymbol{x}_{u_i} + \boldsymbol{n}, \tag{1}$$

其中 $\boldsymbol{y}$, $\boldsymbol{h}_{u_i}$ 与 $\boldsymbol{n}$ 均为 L 维向量. $\boldsymbol{y}^{\mathrm{T}} = [y^{(1)}, y^{(2)}, \ldots, y^{(L)}]$ 为接收信号, $\boldsymbol{h}_{u_i}^{\mathrm{T}} = [h_{u_i}^{(1)}, h_{u_i}^{(2)}, \ldots, h_{u_i}^{(L)}]$ 表示用户 u_i 的信道, $\boldsymbol{n}$ 为噪声, U 表示接入的活跃用户个数.

根据接收信号和估计出的码本与信道, SCMA 解码器通过 MPA 等软解码算法, 输出各用户的各编码比特的对数似然比, 经过信道解码后, 与估计出的活跃用户 ID 对应完成上行传输.

2.3　潜在问题

尽管 SCMA 能提供一定数量的不同码本, 但是随着业务量的激增与终端数量、种类的不断攀升, 免授权接入势必会使得不同的用户接入过程中采用相同的码本. 举例说明, 假设在随机接入的过程中, 仍然是 $L = 4$, $N = 2$, $K = 6$ 资源分配, 当在某个接入时隙里, 有 $U = 6$ 个用户同时传输时, 由于用户产生业务的事件是相互独立的, 因此当前这 6 个用户使用的码本也是独立的, 就会出现这样的情况: 其中两个用户都使用码本 3 (即两个采用码本 3 的用户同时需要发送控制消息), 其余人分别使用码本 1, 2, 5, 6, 则因子图从理想情况的图 1 变为图 2.

理论上讲, 即使发生这种码本碰撞, SCMA 解码器也能够根据受影响的用户的不同无线信道解调出各个用户的数据 (考虑到信道增益是模拟量, 不同用户的信道增益不同的概率是非常高的). 但是, 现有方案中没有明确指出具体如何做到这一点. 不当的操作可能会使得解码复杂度过高. 而且, 这种基于码本区分用户的方法, 在一次短包传输过程中 (往往会有很多个 SCMA 子块组成), 每个用户使用的码本是不会变的.

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N112017-00038

表 1 码本碰撞情况及其发生概率

Table 1 Codebook collision situations with their corresponding probability

α	$\boldsymbol{b}$	Probability
1	[6]	0.002%
2	[5,1]	0.39%
	[4,2]	3.86%
	[3,3]	0.64%
3	[4,1,1]	0.97%
	[3,2,1]	15.43%
4	[3,1,1,1]	15.43%
	[2,2,1,1]	34.73%
5	[2,1,1,1,1]	23.15%
6	[1,1,1,1,1,1]	1.54%

某次传输有较少的用户被分配到了相同的码本, 鉴于码字的稀疏性, SCMA 还是能保证一定的接收性能. 然而, 当出现了严重的码本碰撞, 有多个用户都使用了相同的码本, 会导致极高的解码复杂度 [19], 相应的解码时间的增加, 最终可能破坏控制信道接入的低延时需求. 这种严重的碰撞, 也就意味着因子图上出现大量的短环, 或严重下降的多用户码字欧氏距离, 其结果往往意味着很高的误符号率, 接收机可能花了很长时间解码, 最后只得到错误的结果. 然而, 在超蜂窝网络中, 控制信号与业务数据分离的前提下, 控制信令的短包传输有着超低延时与超高可靠度的严苛要求.

表 1 给出了一个 SCMA 随机接入系统中, 当前存在 $U = 6$ 个同时接入用户时, 每个用户独立在 $K = 6$ 个可用的不同码本中随机选择时碰撞分类的分布情况. 表 1 中 α 表示当前这 6 个用户共采用了多少个不同的码本, 矢量 $\boldsymbol{b}$ 表示这 α 个码本被使用的用户数由高到低排列的矢量. 如 $\boldsymbol{b}$=[4, 1, 1] 表示当前使用了 $\alpha = 3$ 个码本, 其中有一个码本被 4 个用户使用, 另外 2 个码本各被 1 个用户使用. 从表 1 中可以看出每个用户都使用不同码本的理想情况只有 1.54%, 而有 3 个或 3 个以上用户使用相同码本的概率大于 38%, 可见严重的码本冲突并不是小概率事件, 需要一定的手段来解决其造成的表现恶化.

3 跳码方案

3.1 跳码方案描述

为了克服所有数据块采用统一码本映射的缺点, 首先, 取消系统在注册时只给用户一个固定的码本的限制, 改为分配给各个用户一个特定的跳码序列 $[C_{u_i}^{(1)}, C_{u_i}^{(2)}, C_{u_i}^{(3)}, \ldots]$. 对于每个用户, 该跳码序列在其注册入网时进行唯一一次的固定分配, 而不是在每次接入时重新获取. 同样, 基站已知每个用户对应的跳码序列顺序, 因此传输开销不会有明显增加. 在传输每个 SCMA 子块前, 用户根据其跳码序列的指定顺序重新选择码本, 然后利用该码本传输这一 SCMA 子块. 这样, 对于每一个信息包, 它经历了从一个码本跳向另一个码本从而完成传输, 因此称之为 “跳码机制”.

理论上讲, 跳码方案相比于原始方案并没有降低码本碰撞的概率. 然而, 跳码方案引入了码本碰撞图样的分集. 假设有 J 个可用的码本, 传输时间内包含 B 个 SCMA 子块, 原始方案相当于提供了 J 种码本序列图样, 而跳码方案则提供了 J^B 种不同的码本序列图样. 举例说明, 图 3 指出应用跳码策

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N112017-00038

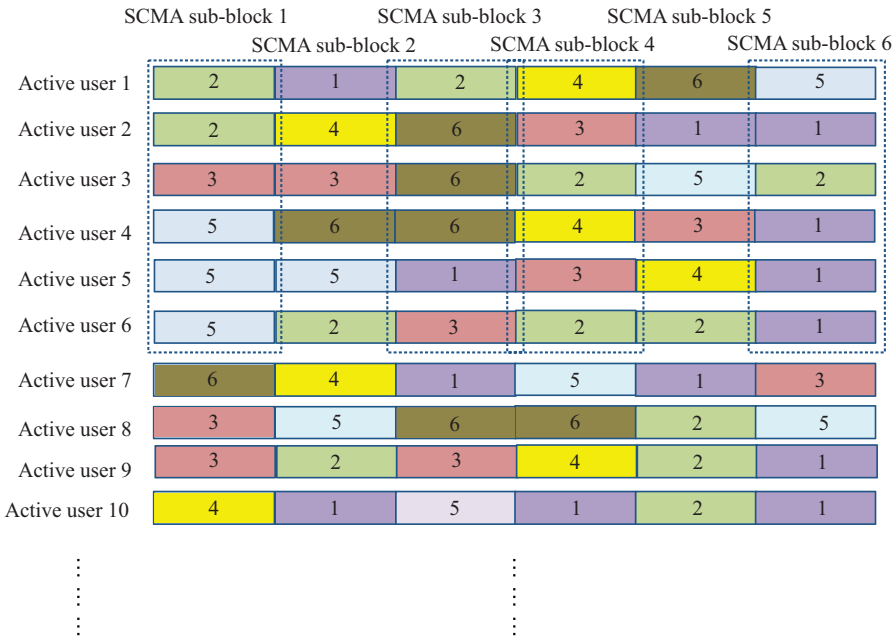


图 3 (网络版彩图) 跳码方案下的码本碰撞图样

Figure 3 (Color online) Codebook collision pattern under codebook-hopping SCMA scheme

略后, 尽管在 SCMA 子块 1, 3, 4, 6 活跃用户都存在码本冲突, 但是并没有用户自始至终都受到冲突的波及. 在 SCMA 子块 1 处, 用户 1 与 2 发生码本碰撞, 用户 4 ∼ 6 发生码本碰撞, 但是到了 SCMA 子块 3 处, 用户 1, 5, 6 便不再受影响. 利用信道编码的纠错特性, 这些用户能够成功地传输数据. 如果所有活跃用户自始至终使用相同的码本, 如图 4 所示, 则码本冲突会一直持续到传输的完成, 其中用户 1 和 2 永远发生码本冲突, 用户 4 ∼ 6 也发生冲突. 在解码时, 这些用户很可能会出现解码错误. 因此这种码本图案的分集能够提升整体的解码性能. 码本序列可以通过进一步的设计带来更多好处, 尽可能通过分散跳码图样带来最大的分集效果. 这里采用随机产生的码本序列, 即用户入网时的码本序列之间没有相关性, 但足以带来所需的性能提升.

3.2 跳码接收方案

在跳码系统中, 接收机将针对不同的 SCMA 子块, 根据已获得的用户 ID 及其跳码图案, 获得当前 SCMA 子块的因子图. 并据此开展该 SCMA 子块的解调, 其方法可以采用文献 [19] 描述的存在码本碰撞的因子图解调方法. 接收机对收到的每一个 SCMA 子块都进行相应的解调后, 得到每个用户的外码编码比特软信息, 送外码译码器进行进一步的译码, 得到每个用户的整个短包的控制消息数据. 这种把所有 SCMA 子块都进行相应的解调的接收算法称为跳码的完全解码算法. 由于存在码本碰撞时的 SCMA 解调算法中备选符号集的大小随同一码本碰撞用户数增加而指数增长, 这是造成 SCMA 随机接入解码复杂度增加的主要因素, 且从统计上看, 无论发端是否采用跳码, 平均的解调复杂度的增加是一样多的. 为了进一步降低接收复杂度, 在跳码系统里, 我们提出了一种精简接收算法. 其基本思路是: 设置一个复杂度门限, 在得到当前的激活用户使用的码本序列后, 即可估计当前待解 SCMA 子块上的码本碰撞情况, 据此, 接收机可以估计解码的复杂度, 当复杂度超过一个指定的门限, 便放弃该 SCMA 子块的解码, 直接输出全 0 作为该块对应的对数似然比.

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N112017-00038

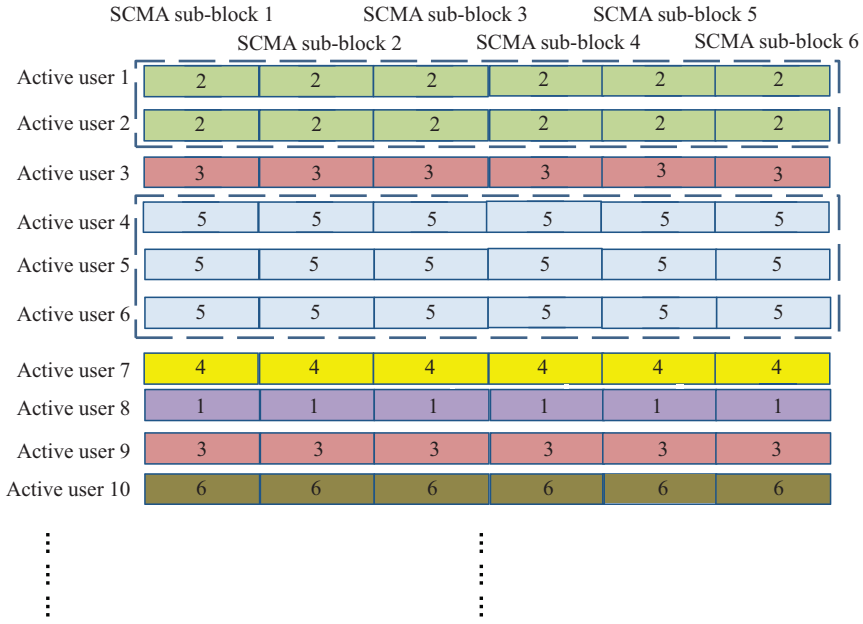


图 4 (网络版彩图) 原始方案下的码本碰撞图样

Figure 4 (Color online) Codebook collision pattern under original SCMA scheme

尽管在非跳码方案中, 也可以采用这种基于门限的方法, 但由于复杂度超门限时, 整个数据块都属于复杂度超门限的情况, 因此接收机必须丢掉整个数据块, 导致严重的性能损失. 而对于跳码方案, 乍看之下当复杂度门限低到能够满足低延时需求时, 这种丢弃同样会造成严重的接收表现恶化. 事实上, 高复杂度的解码由于过分密集的联合星座图会导致准确度和确信度的下降, 因此即使执行了解调, 往往会给出近 0 的对数似然比结果. 因此, 如果将信道编码的编码效率选得合适, 接收表现并不一定发生明显的恶化. 此外, 为了达到低接入延时和解码准确度之间的平衡, 该复杂度门限需要经过慎重的选取, 或者可以根据实时需求适应性地调整.

3.3 跳码方案小结

根据之前的方案调整, 所提出的基于跳码的 SCMA 控制信道接入设计可以总结为如下步骤:

步骤 1: 用户在网络中注册, 系统分配导频序列与跳码序列, 其中每个导频序列对应于唯一的跳码序列.

步骤 2: 用户随机接入, 在接入资源块里将导频和经外码编码、跳码 SCMA 消息包一次性全部发送出去. 如果出现使用相同导频序列的用户同时传输, 会导致解码失败, 他们需选取一个随机退避的时间等待重新发送接入请求.

步骤 3: 在传输该消息包的过程中, 每个用户根据其特有的跳码序列, 对每个 SCMA 子块采用对应的码本进行传输.

步骤 4: 接收机识别出活跃用户并索引出其使用的跳码序列. 解码器维护每个 SCMA 子块的码本碰撞信息.

步骤 5: SCMA 解码器运行消息传递算法. 在完全解码方案中, 对每一个 SCMA 子块进行解码; 而在精简解码方案中, 一旦某个 SCMA 子块对应严重的码本冲突, 即解码复杂度超过门限, 解码器放弃当前 SCMA 子块的解码, 直接输出全 0 作为对数似然比.

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N112017-00038

表 2 仿真参数

Table 2 Simulation parameter

Meaning	Simulation parameter
Average accessing users U	6
Resources per SCMA sub-block L	4
Resources taken up per user per SCMA sub-block N	2
SCMA codebook numbers J	6
SCMA mother constellation size M	16
SCMA sub-block size	4 bits
Information block size	200 bits
Coding efficiency of turbo code	2/3
Channel model	Block fading, Gaussian channel

步骤 6: 结合用户识别的结果, 解码器给出每个用户的 ID 与其对应的数据.

4 仿真结果

本节将给出仿真结果证明跳码方案的有效性. 对于跳码方案, 对比原始 SCMA 方案 (即非跳码方案)、完全跳码方案与精简跳码方案的数据块误块率, 给出跳码方案对接收效果的提升. 仿真的参数设置如表 2 所示. 在实际场景中, 服务区域内可能有数十到数百个潜在用户, 而瞬时随机接入的活跃用户只有几个人. 仿真中假设有 $U = 6$ 个随机的活跃用户在同时上传数据, 总共有 $L = 4$ 个正交的传输资源. 对每个码字, 有 $N = 2$ 个非零位置. 其中 SCMA 的星座图与码本采用文献 [16] 中的参数.

基于仿真场景, 将原始的方案、跳码的完全接收方案与精简接收方案就数据块级别的误块率进行比较. 这里, 针对跳码的完全接收方案, 采用相对简单直接的复杂度门限, 即在某个 SCMA 子块里, 若有 4 个及以上活跃用户采用了相同的码本, 则跳过对其的解码过程, 直接输出全 0 作为对数似然比.

最终的性能结果如图 5 所示, 当信噪比相对较低时, 原始方案相比跳码方案有更好的性能表现. 这种差异是由于对跳码方案, 一个传输块包含了若干不同碰撞图样 SCMA 子块, 在低信噪比的情况下, 它们中的大多数会出现解码错误, 这会影响整个数据块的解码进而导致跳码不理想的解码性能. 然而, 对于原始方案却没有这种影响. 当信噪比提高时, 在一个数据块中错误解码的 SCMA 子块越来越少, 再加上信道编码的进一步纠错, 使得跳码方案的性能超越了原始方案. 仿真中所设定的资源数 L 和非零位置数 N 都相对比较小, 因此导致可用码本数 K 不大. 在实际系统中, 当可用资源数 L 与非零位置数 N 足够大时, 系统的可用码本数 K 足够多, 可以提供更多样的码本序列, 从而进一步提升码本碰撞图样的分集效果, 使得本方案性能更优. 此外, 采用与文献 [19] 中相同的复杂度度量, 即利用循环遍历次数, 得到了不同方案的复杂度对比, 如图 6 所示. 在完全跳码方案与原始方案有着大致相同的运算复杂度下, 精简跳码方案相比完全跳码方案的确有性能的损失, 但是其解码复杂度相比于完全跳码方案减少了 1/3, 使其更容易满足低延时的应用需求.

5 结论

针对超蜂窝网络架构中, 控制覆盖的大容量、低延时和高可靠的短包传输需求, 同时也结合未来 MTC 业务的需求, 本文对基于 SCMA 的无授权接入中出现的码本碰撞代来的性能损失和接入复杂度

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N112017-00038

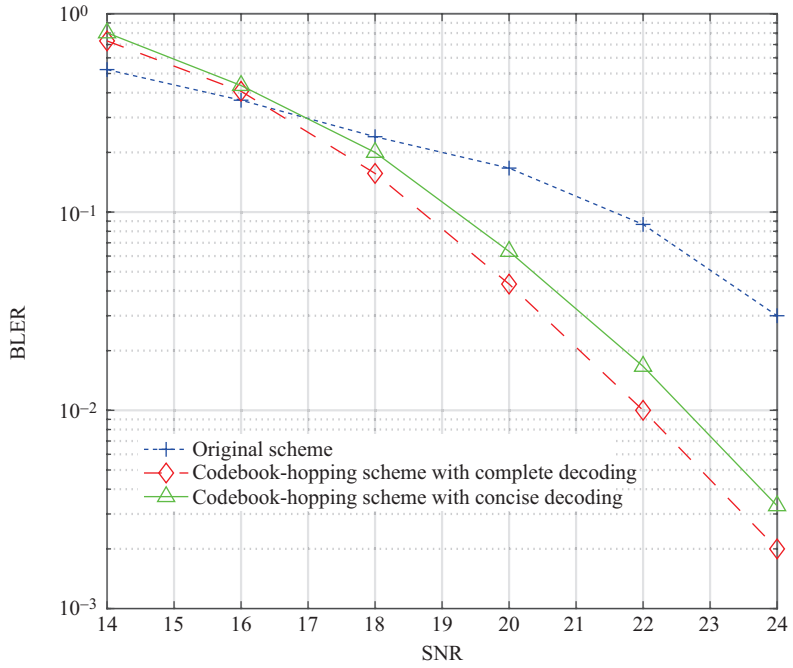


图 5 (网络版彩图) 各方案误块率

Figure 5 (Color online) BLER of different schemes

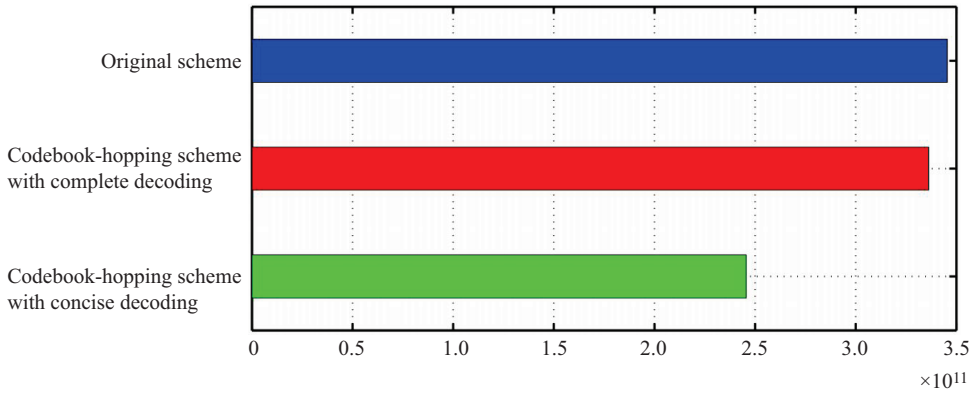


图 6 (网络版彩图) 各方案复杂度

Figure 6 (Color online) Complexity of different schemes

提高的问题进行了分析, 在此基础上, 提出了超蜂窝网络架构下实现能效与资源优化的基于跳码的 SCMA 控制信道接入设计. 为了解决用户出现业务需求而进行无授权接入时出现的码本碰撞问题, 提出了跳码方案, 通过引入更多样的码本序列图样来提升随机接入码本碰撞下的接收性能. 我们还进一步提出了丢弃高译码复杂度的 SCMA 子块的精简跳码方案. 仿真中给出的结果证明了所提方案有效性. 综上所述, 基于跳码的 SCMA 控制信道接入方案可以推动未来绿色通信的进一步发展, 在保障服务质量的同时提高总体能效, 推动了用户弹性接入形式, 从而实现新的超蜂窝网络架构中网络资源与能量的按需分配.

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N112017-00038

参考文献

1 Chen Y, Zhang S Q, Xu S G, et al. Fundamental trade-offs on green wireless networks. IEEE Commun Mag, 2011, 49: 30–37

2 Wu Y Q, Chen Y, Tang J, et al. Green transmission technologies for balancing the energy efficiency and spectrum efficiency trade-off. IEEE Commun Mag, 2014, 52: 112–120

3 Xu Z K, Yang C Y, Li G Y, et al. Energy-efficient configuration of spatial and frequency resources in MIMO-OFDMA systems. IEEE Trans Commun, 2013, 61: 564–575

4 He G N, Zhang S Q, Chen Y, et al. Energy efficiency and deployment efficiency tradeoff for heterogeneous wireless networks. In: Proceedings of the IEEE Global Communications Conference, Anaheim, 2012. 3189–3194

5 He G N, Zhang S Q, Chen Y, et al. Spectrum efficiency and energy efficiency tradeoff for heterogeneous wireless networks. In: Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Shanghai, 2013. 2570–2574

6 Niu Z S, Zhou S, Zhou S D, et al. Energy efficiency and resource optimized hyper-cellular mobile communication system architecture and its technical challenges. Sci Sin Inform, 2012, 42: 1191–1203 [牛志升, 周盛, 周世东, 等. 能效与资源优化的超蜂窝移动通信系统新架构及其技术挑战. 中国科学: 信息科学, 2012, 42: 1191–1203]

7 Zhou S, Zhao T, Niu Z S, et al. Software-defined hyper-cellular architecture for green and elastic wireless access. IEEE Commun Mag, 2015, 54: 12–19

8 Cisco. Cisco visual networking index: Global mobile data traffic forecast update, 2010-2015. http://www.cisco.com/

9 Osseiran A, Boccardi F, Braun V, et al. Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project. IEEE Commun Mag, 2014, 52: 26–35

10 Xie R G, Yin H R, Wang Z D, et al. Many access for small packets based on precoding and sparsity-aware recovery. In: Proceedings of the IEEE Global Communications Conference, Washington, 2016. 1–5

11 Ding Z G, Dai L L, Poor H V. MIMO-NOMA design for small packet transmission in the Internet of things. IEEE Access, 2016, 4: 1393–1405

12 Xie R G, Yin H R, Wang Z D, et al. A novel uplink data transmission scheme for small packets in massive MIMO system. In: Proceedings of the IEEE/CIC International Conference on Communications in China, Shanghai, 2014. 375–379

13 Bontu C S, Ghimire J, Periyalwar S, et al. Asynchronous simultaneous small packet transmission in cellular wireless system. In: Proceedings of the 16th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, Atlantic City, 2013. 1–5

14 Au K, Zhang L Q, Nikopour H, et al. Uplink contention based SCMA for 5G radio access. In: Proceedings of the IEEE Globecom Workshops, Austin, 2014. 900–905

15 Nikopour H, Baligh H. Sparse code multiple access. In: Proceedings of the IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications, London, 2013. 332–336

16 Taherzadeh M, Nikopour H, Bayesteh A, et al. SCMA Codebook design. In: Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference, Seoul, 2014. 1–5

17 Guo D, Wang C C. Multiuser detection of sparsely spread CDMA. IEEE J Sel Area Commun, 2008, 26: 421–431

18 Zhang S Q, Xu X Q, Lu L, et al. Sparse code multiple access: an energy efficient uplink approach for 5G wireless systems. In: Proceedings of the IEEE Global Communications Conference, Austin, 2014. 4782–4787

19 Lian J, Zhou S D, Zhang X J, et al. Low complexity decoding method for SCMA in uplink random access. In: Proceedings of the IEEE Global Communications Conference, San Francisco, 2016. 1–6

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N112017-00038

An SCMA control channel accessing scheme based on codebook-hopping under hyper-cellular network architecture

Jin LIAN[1,2*], Shidong ZHOU[1,2], Xiujun ZHANG[1,2] & Yufeng WANG[1,2]

1. *Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing* 100084*, China*;
2. *Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Tsinghua University, Beijing* 100084*, China*
* Corresponding author. E-mail: lianj15@mails.tsinghua.edu.cn

Abstract To satisfy the growing demand on data traffic in hyper-cellular networks while at the same time ensuring high-energy efficiency, soft coverage can be effectively utilized in networks, by separating the control and data channels. In this view, with no data to be transmitted the system is in the sleep mode, and with a certain demand on data transmission the system will wake up and will send control signals in a grant-free manner. As one of the most promising random access schemes, Sparse Code Multiple Access (SCMA) allows users to adopt dedicated codebooks to send their data, with superposed code words. However, owing to the lack of scheduling in random access, different users may accidentally use the same codebook, which is called codebook collision and would result in performance degradation. To alleviate this degradation, we propose a codebook-hopping scheme by adopting time-variant codebooks with different patterns for different users. Simulation results show that the proposed scheme improves the performance in terms of the block error rate. In addition, with selective elimination of SCMA sub-blocks in the case of severe codebook collision, the complexity and latency of decoding can be significantly reduced. By doing so, the system can achieve high reliability and low latency for controlling signals in hyper-cellular networks.

Keywords green communication, hyper-cellular network, control channel, grant-free access, SCMA



Jin LIAN was born in 1993. He received his bachelor degree in electronic engineering from Tsinghua University, Beijing, China, in 2015. Currently, he is a Ph.D. candidate at Tsinghua University, Beijing, China. His research interests include multiple access and massive MIMO.



Shidong ZHOU was born in 1969. He received his B.S. and M.S. degrees from Southeast University, Nanjing, China, in 1991 and 1994, respectively, and his Ph.D. degree from Tsinghua University, Beijing, China, in 1998. He is now a professor at the Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing, China. His research interests include mobile communication system architectures, advanced transmission technique, wireless channel sounding and modeling, radio resource management, and high energy efficient wireless networks.



Xiujun ZHANG was born in 1979. She received her B.E. and Ph.D. degrees in electronic engineering from Tsinghua University, Beijing, China, in 2001 and 2013, respectively. Presently, she is an assistant researcher at the Wireless and Mobile Communication Technology R&D Center, Research Institute of Information Technology, Tsinghua University, Beijing, China. Her research interests are in the area of signal processing and wireless communications.



Yufeng WANG was born in 1992. He received his bachelor degree in electronic engineering from Tsinghua University, Beijing, China, in 2014. Currently, he is a master's candidate at Tsinghua University. His research interests include non-orthogonal multiple access, channel estimation, user detection, and MIMO.

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N112017-00038