

面向异构多层多小区的多级服务质量跳频稀疏码分多址通信系统

曾琦 钟俊 刘星*

(四川大学电气工程学院 成都 610065)

摘要: 该文主要解决未来大规模接入场景下, 无线异构多层多小区通信网络设计及其多级服务质量(QoS)实现等问题。针对多层异构大规模接入网络的通信需求, 该文提出一种基于跳频(FH)的稀疏码分多址接入(SCMA)多层异构传输方案(FH/SCMA)。该通信方案中, 小区内大规模用户数据通过SCMA技术复用, 异构网络的层间小区和层内小区通过跳频码分多址进行区分。由于传统跳频只能提供同一级别的频点碰撞率(即同一误码率), 无法保证异构网络多级QoS需求, 因此该文进而提出一类新的具有两级汉明相关值的跳频序列集合, 利用交织技术给出了这类跳频序列的设计方法。为了验证所提出的多级QoS跳频及其异构多层FH/SCMA通信性能, 该文从序列设计和系统分析方面进行了严谨的理论分析和大量的仿真验证。研究表明, 采用了新型跳频SCMA技术的多层异构网络可保证大规模用户接入、有效抑制多层小区干扰和衰落信道影响; 同时, 又可实现异构多层网络多级QoS传输质量需求(多级误码率(BER))。该文的研究成果从信号处理与传输角度, 为多层异构网络设计及其多级QoS传输需求提供了有价值的解决方案。

关键词: 异构多层网络; 稀疏码分多址; 跳频; 多级服务质量; 跳频序列

中图分类号: TN914

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2022)09-2977-09

DOI: [10.11999/JEIT211364](https://doi.org/10.11999/JEIT211364)

Sparse Code Multiple Access Communication Networks Based on Multi-Level Quality-of-Service Frequency-hopping for Heterogeneous Multi-tier Multi-cell

ZENG Qi ZHONG Jun LIU Xing

(School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: This paper dedicates to the design of heterogeneous multi-tier multi-cell communication networks and its multi-level Quality-of-Service (QoS) implementation in the future massive connectivity scenarios. To meet the requirement of massive connectivity in heterogeneous multi-tier networks, a Frequency-Hopping (FH) based Sparse Code Multiple Access (FH/SCMA) transmission is proposed for heterogeneous multi-tier infrastructure in this paper. In such a network infrastructure, all users' transmitted data are multiplexed by SCMA technique and all intra- and inter- cells located in multi-tier are distinguished by FH multi-access technique. Since the traditional FH technique just provides a single-level frequency-hit rate (i.e., a single-level error-rate), it can not offer the multi-QoS for heterogeneous multi-tier networks. Thus, a novel type of FH sequence set with two level Hamming-correlations is proposed in this paper, and its construction algorithm is designed via the interleaving technique. The strictly theoretical analysis and extensively simulated analysis are carried out to verify the multi-QoS performance of the proposed heterogeneous FH/SCMA networks. The results of this paper are shown that, by employing the new FH into SCMA, the heterogeneous multi-tier networks possesses the massive connectivity, and the strongly anti- multi-tier interference and anti-fading capability; Meanwhile, it achieves successfully the multi-QoS target (i.e., multi-level Bit-Error Ratio(BER)). The proposed FH/SCMA provides a valuable solution to heterogeneous multi-tier networks and multi-QoS requirement from the viewpoint of signal and transmission.

收稿日期: 2021-11-30; 改回日期: 2022-03-30; 网络出版: 2022-04-18

*通信作者: 刘星 liuxing4@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(61701328, 61901288), 保密通信国防科技重点实验室开放基金(6142103200106)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61701328, 61901288), The Foundation of Science and Technology on Communication Security Laboratory of China (6142103200106)

Key words: Heterogeneous multi-tier networks; Sparse Code Multiple Access(SCMA); Frequency-Hopping(FH); Multi-Level Quality-of-Service(Multi-QoS); Frequency-Hopping(FH) sequence

1 概述

随着多种无线通信业务快速增长,未来无线网络呈现多层异构特征(例如宏/微/微微小区)。与传统单一架构网络相比,无线异构网络具有多层小区非协作相互重叠、海量用户随机接入,频谱资源有限、多层网络不同传输服务质量需求(Quality-of-Service, QoS)等特点^[1,2]。多层异构无线网络架构如图1所示。在这种网络架构下,属于不同网络层的用户(或小区)很难实现完全同步接入,同时,海量用户接入带来严重的同层/跨层(小区内/小区间)等多种干扰。因此,在有限频谱资源下,如何设计网络容量大、频谱效率高、干扰少、多级QoS的无线通信传输方式,是实现多层异构通信网络的关键问题。

作为一种极具潜力的非正交多址技术——稀疏码分多址(Sparse Code Multiple Access, SCMA)已成为B5G/6G蜂窝通信的关键技术之一。SCMA通过有效的稀疏码本设计,并借助基于消息传递算法的多用户检测,可在有限的频谱资源块(Resource Blocks, RBs)上实现大规模用户接入^[3]。SCMA网络设计和SCMA码本设计已经成为当前学术界的研究热点^[4-6]。但是,目前关于SCMA系统的研究存在一些不足。现有的SCMA系统假设每个用户码本通过若干个固定的子载波持续发送SCMA码字。当一些子载波遭受干扰或频率选择性衰落时,SCMA系统将无法获得优异的误码率性能。此外,现有的研究工作^[3-6]仅关注单个小区网络的SCMA码本设计,无法实现多层多小区的有效接入。因此,十分有必要在SCMA基础上融合多种通信信号处理,将

传统单小区SCMA网络扩展为异构多层多小区网络体制。对于无线通信中广泛存在的干扰和信道衰落,跳频技术(Frequency-Hopping, FH)理所当然地成为最佳的可选技术之一。FH技术通过频点随机跳变,灵活地获取空闲或者优质频带,有效地避免干扰和恶劣衰落的影响^[7-9]。虽然跳频已经广泛应用于多种无线通信系统中(如WiFi、蓝牙和战术数据链等)^[9],但对于频谱资源少、海量用户异步接入和多级QoS的多层异构无线网络,传统跳频无法完全满足这些需求。对跳频技术进行适当改进,使其在未来多层异构网络架构中仍可发挥强大的技术生命力。

为了解决上述的部分问题,近期出现了基于FH的SCMA系统初步研究(FH/SCMA)^[10-13],这些成果为本文进一步研究异构多层多小区多QoS网络奠定了基础。FH与SCMA具有多样的结合方式,其中一种方式为:跳频技术依据特定跳频图案,改变本小区复用SCMA码字的物理传输信道,以避免信道衰落和干扰的影响;同时实现了多小区接入(跳频序列即为小区地址码)。然而,文献^[10]中的FH/SCMA系统采用了随机跳频图案,这导致了由于存在频率碰撞而产生的小区间干扰,更无法实现多级QoS需求。文献^[11]针对FH/SCMA中跳频的需求,使用2次同余提出了一种适合FH/SCMA的最佳跳频图案,但这种FH/SCMA方案仅适用于单小区上行链路。在前期研究中,文献^[13]将传统的单小区SCMA扩展为多小区SCMA,并设计了一种实现正交FH/SCMA的跳频图案。文献^[13]仅能实现所有SCMA小区具有相同级别传输性能;也就是

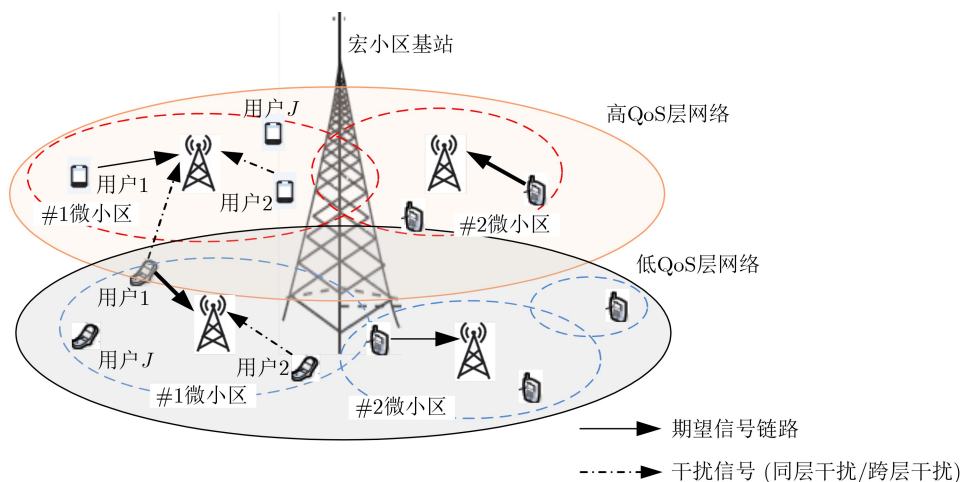


图1 异构多层多小区无线通信网络架构(以两层QoS网络为例)

说, 只能实现同层多小区网络架构。综合上述研究成果来看, FH/SCMA系统中的FH技术是至关重要的, 决定了该系统的诸多性能。但上述研究存在一些不足: 这些研究都只能实现单小区FH/SCMA或同层多小区FH/SCMA, 这些网络设计均无法实现多层多级QoS传输需求。

对于多层异构网络的多级QoS需求, 大多数已有研究均从功率控制、功率分配和接入控制等方法来实现^[1,14]。为了获得全局最优的多级QoS需求, 这类方法一般需要进行全网跨层的最优化设计, 然而对于属于不同应用的多层网络和大规模用户接入, 进行全网最优设计是很难实现的。本文为了实现异构多层FH/SCMA网络的多级QoS目标, 从跳频序列设计的全新角度, 通过精确地控制跳频序列的汉明相关特性(频点碰撞分布)实现两级的误码率性能(Bit-Error Rate, BER)。从跳频序列设计及其性能来看, 传统跳频序列以频点满足独立均匀分布为主要目标, 依此目标产生了许多传统最优的跳频序列集合^[7,9,15-17], 但是频点的均匀特性决定了这类跳频序列只能产生同一级别的频点碰撞概率(对于任一用户, 频点发生1次碰撞的概率均为 $1/q$, 其中 q 为频点集合大小), 由此导出跳频系统的同一级传输质量(同一级BER性能)。本文提出的多级QoS跳频序列, 在满足传统跳频序列性能的同时, 还需满足特定的多级汉明相关特性, 因此这类跳频序列设计具有更多的技术挑战。

本文各节安排如下, 首先介绍传统SCMA系统结构, 由此归纳传统SCMA系统在多小区接入方式、多级QoS需求、抗信道衰落干扰影响等方面的局限性, 进而引出本文提出的多层异构FH/SCMA通信网络及其对跳频图案性能的特性需求。其次, 针对多小区接入、多级QoS需求、抗信道衰落干扰的要求, 在传统伪随机跳频序列基础上, 通过一系列数学变换得到一类具有多级汉明相关、随机性较好的新跳频图案。这类跳频序列集合正好满足多层多级FH/SCMA通信需求。进而, 将新型跳频图案应用于多层多小区FH-SCMA系统中, 通过仿真验证其多级BER性能表现。

2 系统模型

本节首先介绍传统SCMA系统及其信号处理流程。总结传统SCMA系统在抗频率选择性衰落、抗多层干扰、多层多小区接入和多层QoS等关键问题的不足。为了解决这些问题, 进而提出适用于异构多层多小区的具有多级QoS的新型FH/SCMA系统。

2.1 传统SCMA系统及问题描述

本文考虑一个单小区SCMA系统的上行链路,

具有 K 个频率资源块(Resource Block, RB)和 J 个用户, 每个用户发送 M 进制数据。通过设计的 J 个($K \times M$)维SCMA码本将 J 个用户数据复用到这 K 个RB上。该小区 J 个用户使用的SCMA码本集合可以表示为

$$\mathbf{X} = \{\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_J\} \quad (1)$$

$$\mathbf{X}_j = [\mathbf{x}_1^{(j)}, \mathbf{x}_2^{(j)}, \dots, \mathbf{x}_M^{(j)}]$$

其中, \mathbf{X}_j 表示用户 j 使用的SCMA码本。每个码本 \mathbf{X}_j 可写为一个($K \times M$)维的矩阵, 且满足 $\text{Tr}(\mathbf{X}_j \mathbf{X}_j^H) = M$ 。码本中列向量 $\mathbf{x}_m^{(j)} = (x_{m,1}^{(j)}, x_{m,2}^{(j)}, \dots, x_{m,K}^{(j)})^T$ 称为低密度码字。SCMA码本设计是当前研究热点之一, 大量的SCMA码字设计方法可参看文献^[4-6]。本文对SCMA码本设计不做详细介绍。

在发送端, 基于用户 j 当前发送的数据符号 $m \in \{1, 2, \dots, M\}$, SCMA编码器从码本 \mathbf{X}_j 中映射得到相应的SCMA码字(即映射为 \mathbf{X}_j 中某一系列向量 $\mathbf{x}_m^{(j)}$)。假设用户 j 所使用的 K 个RB的信道增益为 $\mathbf{h}_j = \{h_{j,1}, h_{j,2}, \dots, h_{j,K}\}$, 则本小区SCMA上行链路 J 个用户的接收信号 \mathbf{r} 可以表示为

$$\mathbf{r} = \sqrt{P/J} \sum_{j=1}^J \text{diag}(\mathbf{h}_j) \mathbf{x}_m^{(j)} + \mathbf{n} \quad (2)$$

其中, P 表示总发射功率, 并且假设 J 个用户等功率分配。 \mathbf{n} 是($K \times 1$)维的加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN)向量。 \mathbf{n} 中每个元素满足均值为0、方差为 $N_0/2$ 的正态分布。

下面以用户 j 使用 $K=4$ 个RB发送SCMA码字为例, 解释传统SCMA系统中码字元素与RB的使用关系, 如图2所示。在图2中, 某时刻的 m 元数据通过SCMA编码器映射为SCMA码字 $\mathbf{x}_m^{(j)}$, 即

$$\mathbf{x}_m^{(j)}(n) = (x_{m,1}^{(j)}(n), x_{m,2}^{(j)}(n), x_{m,3}^{(j)}(n), x_{m,4}^{(j)}(n))^T \quad (3)$$

图2阴影部分表示SCMA码字中非零元素。传统SCMA系统通过在固定分配的RB上传输该非0信息^[3,4,6]。图2中, 用户 j 的SCMA码字始终在第2和第4个RB上传输。然而在实际的无线通信中, 可用

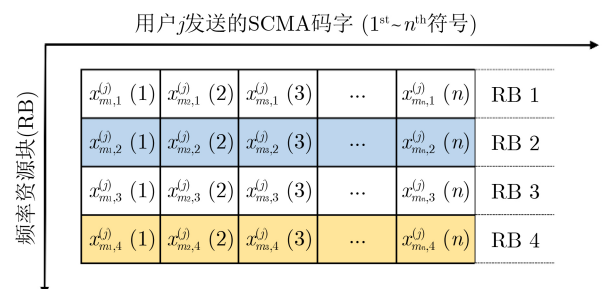


图2 传统SCMA系统码字传输与资源块示意图

频带中全部或部分可能会受到深度频率选择性衰落或干扰攻击等因素影响,当影响的频带正好是发送SCMA非0元素的RB时,SCMA码字传输会受到较大干扰,该用户的传输性能会一直处于较差水平。反之,当SCMA非0元素在非干扰的RB上传输时,用户性能一直处于最优。这样会导致SCMA网络中用户传输体验极不平衡。另外,当前SCMA系统通常部署在单小区网络中,如何将传统SCMA扩展到多层多小区场景,并保证较低的多层(多小区)干扰、较好的抗信道衰落能力,将是十分必要的工作。

2.2 多层多小区的FH/SCMA网络

针对上节提出的问题,本文设计的异构多层多小区FH/SCMA网络架构如图3所示。该网络中,每个微小区采用传统SCMA方式将 J 个用户数据复用在 K 个RB上,然后对复用后的SCMA符号进行跳频,实现FH/SCMA系统。不同微小区采用不同的跳频图案(跳频序列),也就是说,跳频序列可视为微小区地址码。通过对跳频序列集精细化的设计,使得该跳频序列集合具有多层汉明相关特性值,从而实现多层微小区接入和多层多级QoS传输质量。为了便于分析,本文以下章节考虑两层多小区FH/SCMA网络架构。如图3所示,该两层多小区的FH/SCMA网络中,具有高QoS层(High QoS, HQoS)的小区采用具有较好性能的跳频序列集合 C^H ;低QoS层(Low QoS, LQoS)的小区采用性能较差的跳频序列集合 C^L 。这里 $C = \{C^H; C^L\}$ 即为本文提出的具有两级QoS特性的新型跳频序列集合。如何实现这样的序列将在下一节论述。

下面详细介绍FH技术与SCMA系统具体融合方式。假设多层异构网络有 K_{RB} 个可用频隙资源块(RB),这些资源块的中心频率分别为 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_{K_{RB}}\}$,以及信道增益分别为 $H = \{h_1, h_2, \dots, h_{K_{RB}}\}$ (其中 h_i 对应于 F 中 f_i 的信道增益)。从 F 中选择 K 个RB得到一个RB子集 $F_G^{(i)}$ (这里, $F_G^{(i)}$ 称为一个RB组)。因此,RB集合 F 可产生 $Q = \lfloor K_{RB}/K \rfloor$ 个正交RB组,这些正交RB组表示为

$$F_G = \{F_G^{(0)}, F_G^{(1)}, \dots, F_G^{(Q-1)}\}, F_G^{(i)} \cap F_G^{(j)} = \emptyset, i \neq j \quad (4)$$

该发射端模型中,微小区中的 J 个用户使用传统SCMA码本(如式(1)和式(2)所示)复用形成SCMA符号。在SCMA编码器之后,每个SCMA符号的中心频率根据设计的跳频序列 $c^{(r)}$ 在频率资源RB组 F_G 中跳变。分配给微小区 r 的序列 $c^{(r)}$ 可以表示为

$$c^{(r)} = (c_0^{(r)}, c_1^{(r)}, \dots, c_{L-1}^{(r)}) \quad (5)$$

其中, L 表示跳频序列的长度。微小区 r 的序列 $c^{(r)}$ 是来自 C^H 还是 C^L ,视该小区属于HQoS层还是LQoS层决定。

这里值得注意的是,由于异构多层网络属于不同的无线应用,不同层之间实现全网完全同步是十分困难的,因此本文考虑符合实际情况的多层多小区准同步接入方式,即各层小区(用户)之间接入允许较小的相对时延 τ_r 。并假设FH/SCMA系统采用每一跳发送1个 M 元符号(即1跳发送1个SCMA码字)。在第 l 个符号持续时间上,两层多小区所有用户的复用信号可以写为

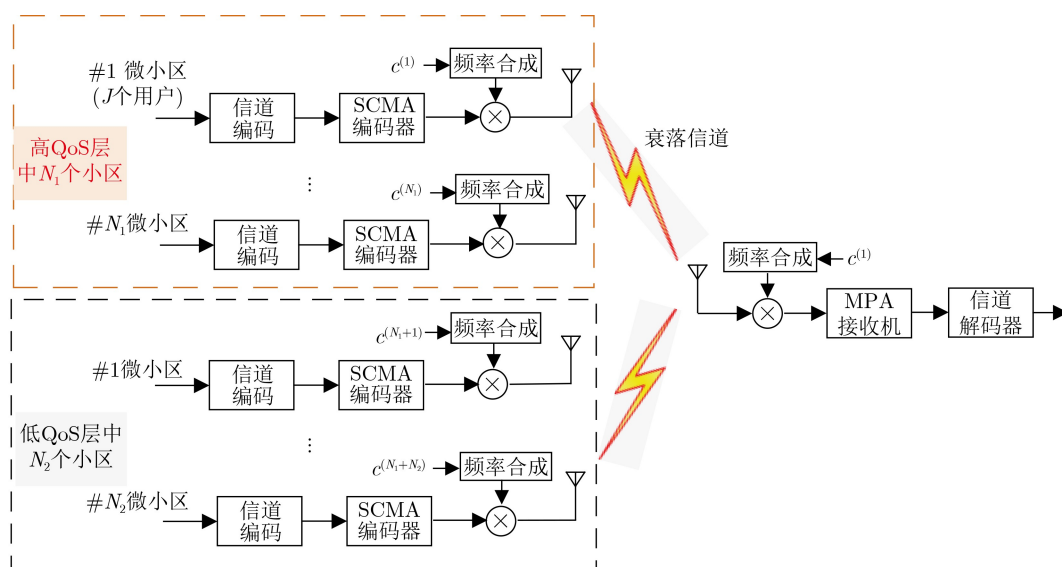


图3 异构两层多小区FH/SCMA网络的收发端模型

$$\mathbf{r}_l = \sqrt{P/J} \sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^J \text{diag} \left(\mathbf{h}_j^{(c_l^{(r)})} \right) \mathbf{x}_m^{(r,j)}(l + \tau_r) + \mathbf{n} \quad (6)$$

其中, R 表示两层网络中所有微小区数(即HQoS层小区数 N_1 和LQoS层小区数 N_2 之和)。下标运算 $l \oplus \tau_r$ 为模 L 加。 $\mathbf{x}_m^{(r,j)}(\cdot)$ 表示小区 r 中用户 j 发送的SCMA码字。 $\mathbf{h}_j^{(c)} \in \mathbf{H}'$ 是由跳频序列 $\mathbf{c}^{(r)}$ 所指定的RB组 $\mathbf{F}_G^{(c)}$ 的信道增益。对于准同步接入机制(给定

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_l = & \underbrace{\sqrt{P/J} \sum_{j=1}^J \text{diag} \left(\mathbf{h}_j^{(c_l^{(1)})} \right) \mathbf{x}_m^{(1,j)}(l)}_{\text{期望小区的数据}} + \underbrace{\sqrt{P/J} \sum_{r=2}^{N_1} \sum_{j=1}^J h \left(c_l^{(1)}, c_{l \oplus \tau_r}^{(r)} \right) \text{diag} \left(\mathbf{h}_j^{(c_{l \oplus \tau_r}^{(r)})} \right) \mathbf{x}_m^{(r,j)}(l + \tau_r)}_{\text{本层小区间干扰}} \\ & + \underbrace{\sqrt{P/J} \sum_{r=1}^{N_2} \sum_{j=1}^J h \left(c_l^{(1)}, c_{l \oplus \tau_r}^{(r)} \right) \text{diag} \left(\mathbf{h}_j^{(c_{l \oplus \tau_r}^{(r)})} \right) \mathbf{x}_m^{(r,j)}(l + \tau_r) + \mathbf{n}}_{\text{跨层小区间干扰}} \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $h \left(c_l^{(1)}, c_{l \oplus \tau_r}^{(r)} \right)$ 表示期望小区频点 $c_l^{(1)}$ 与小区 r 的频点碰撞函数(即跳频序列的汉明相关函数^[9])。当 $h \left(c_l^{(1)}, c_{l \oplus \tau_r}^{(r)} \right) = 1$ 表示两个频点碰撞, 导致多小区干扰(跨层干扰或者本层干扰), 当 $h \left(c_l^{(1)}, c_{l \oplus \tau_r}^{(r)} \right) = 0$ 表示两个频点正交, 干扰被完全消除。式(7)中的本层/跨层的小区干扰完全由跳频序列的汉明相关特性决定。若LQoS层的微小区1基站为期望接收端, 解跳信号 \mathbf{y}_l 也可由式(7)所表征, 但是需将其中参数 N_1 和 N_2 位置对换。通过解跳后得到将基带SCMA信号; 然后再依次通过消息传递算法(Message Passing Algorithm, MPA)解码器和检测器得到发送的 M 进制符号。由于本文采用的MPA解码器和检测器的信号处理流程与传统SCMA解调端一致, 这里不在赘述。

3 两级QoS跳频序列构造方法

通过前面的分析可知, 为了降低异构两层多小区FH/SCMA系统中信道衰落和本层/跨层干扰的影响, 并实现多级QoS, 跳频技术及跳频序列特性是关键部分。为了同时实现上述目标, 跳频序列特性需满足以下要求(在给定的集合 \mathbf{F}_G 中RB组个数 Q 的前提下):

(1) 跳频序列中, \mathbf{F}_G 中每个RB组的使用次数和位置应满足均匀性, 该特性可有效抑制信道衰落和干扰影响。

(2) 跳频序列条数 R 应尽可能多, 以提供更强的多小区接入能力。跳频序列周期 L 尽可能长, 以提供更好的安全性。

(3) HQoS层内(和LQoS层内), 多小区使用的

最大接入时延 $D = WT \ll LT$, W 是一个较小的整数, T 为 m 元符号宽度), 用户 r 的接入时延 τ 应满足 $[-D, D]$ 内的均匀分布。由式(6)可知, 因为采用了FH技术, 某一时刻发送的SCMA码字 $\mathbf{x}_m^{(r,j)}(\cdot)$ 在哪个RB组上发送是由跳频序列 $\mathbf{c}^{(r)}$ 决定的。

在接收端, 假设HQoS层的微小区1基站为期望接收端, 并且期望收发端已经完全实现同步, 即收发端跳频序列完全同步且 $\tau_1=0$ 。接收信号 \mathbf{r}_l 经过解跳后, 得到

跳频序列相互碰撞应尽可能少。以实现较小的层内干扰。

(4) HQoS层和LQoS层之间, 多小区使用的跳频序列相互碰撞尽可能少, 以实现较小的跨层干扰。

(5) HQoS层的跳频碰撞概率应小于LQoS层的跳频碰撞概率(即HQoS的跳频序列汉明相关值小于LQoS层的跳频序列汉明相关值)。从而实现两级QoS传输质量。

由跳频序列设计知识可知, 前3条要求是传统伪随机跳频序列设计的要求; 后面两条是两级QoS跳频序列的附加要求, 因此, 构造这类具有两级汉明相关跳频序列的工作是十分具有挑战的。

在跳频序列设计和分析中, 跳频序列频点碰撞一般采用(最大)周期汉明相关函数来衡量。跳频序列集 \mathbf{C} 的最大周期汉明相关函数定义为 $H_m(\tau|\mathbf{C}) = \max_{\{c^{(t)}, c^{(r)}\} \in \mathbf{C}} \left\{ \sum_{l=0}^{L-1} h \left(c_l^{(t)}, c_{l \oplus \tau}^{(r)} \right) \right\}$, 其中, 当 $t \neq r$ 时, 表示最大周期汉明互相关(序列互碰撞); 当 $t = r$ 时, 表示最大周期汉明自相关(序列自碰撞)。跳频序列设计和分析将以汉明相关值作为重要的性能指标。

3.1 构造方法

步骤1 由于构造的跳频序列首先需满足传统伪随机跳频特性, 本文选取文献^[17]得到的最优跳频序列作为基序列 \mathbf{S} 。将其分为两部分, 得到 \mathbf{S}_1 和 \mathbf{S}_2 两个子序列集。这两个序列子集的序列长度均为 L , 序列数目分别为 M 和1。 \mathbf{S}_1 和 \mathbf{S}_2 子序列集表示为

$$\mathbf{S}_1 = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (s_1(1) & s_1(2) & \cdots & s_1(L)) \\ (s_2(1) & s_2(2) & \cdots & s_2(L)) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (s_M(1) & s_M(2) & \cdots & s_M(L)) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{S}_2 = s_{M+1} = (s_{M+1}(1), s_{M+1}(2), \dots, s_{M+1}(L)) \quad (8)$$

步骤2 定义 \mathbf{S}_1 序列集中两条序列级联(串联)操作

$$[s_i, s_j] = (s_i(1), s_i(2), \dots, s_i(L), s_j(1), s_j(2), \dots, s_j(L)), \quad i \neq j \quad (9)$$

因为文献[17]的基序列为无碰撞区序列,因此级联后的序列也具有无碰撞区正交特性,无碰撞区大小仍为原来的 W 。将 \mathbf{S}_1 中每两条序列级联 $\{[s_i, s_{i \oplus 1}] | i = 1, 2, \dots, M\}$ (其中 $i \oplus 1$ 为模 M 加),即为构造得到的HQoS层的跳频序列集合 \mathbf{C}^H

$$\mathbf{C}^H = \{c_1^H; c_2^H; \dots; c_M^H\} \\ = \{[s_1, s_2]; [s_2, s_3]; \dots; [s_M, s_1]\} \quad (10)$$

其中, \mathbf{C}^H 为序列条数为 $N_1=M$,序列长度为 $2L$ 的无碰撞区跳频序列。

步骤3 取一个整数 a ,使得 $\gcd(\lfloor L/2 \rfloor, a) = 1$ 且 $a < \lfloor L/2 \rfloor$,构造多个长度为2的移位序列集合

$$\mathbf{e} = \{e_1; e_2; \dots; e_k\} = \{(0, \lfloor L/2 \rfloor); \\ (a, a + \lfloor L/2 \rfloor); (2a, 2a + \lfloor L/2 \rfloor); \dots; \\ (ka, \lfloor L/2 \rfloor + ka)\} \quad (11)$$

其中,整数 k 取值需满足 $\lfloor L/2 \rfloor + ka < L$ 。利用每一条移位序列 $\{e_1; e_2; \dots; e_k\}$,将 \mathbf{S}_2 集合中序列(仅有一条序列)进行交织操作^[7,18]。则可得一类长度为 $2L$ 且序列数目为 k 的跳频序列集,该跳频序列即为所构造的LQoS跳频序列集合

$$\mathbf{C}^L = \left. \begin{array}{l} \{c_1^L; c_2^L; \dots; c_k^L\} \\ c_1^L = I(s_{M+1}, e_1); c_2^L = I(s_{M+1}, e_2); \dots; \\ c_k^L = I(s_{M+1}, e_k) \end{array} \right\} \quad (12)$$

其中, $I(s, e)$ 表示序列 s 进行移位为 e 的交织操作。由交织操作的特性可知,由式(12)构造得到的LQoS跳频序列具有低碰撞区特性,序列条数为 $N_2=k$ 。两级QoS跳频序列集 $\mathbf{C} = \{\mathbf{C}^H; \mathbf{C}^L\}$ 使用的频隙个数 Q 与原基序列的频隙个数相同。

3.2 例子

按照上节的构造算法,给出该跳频序列的构造流程,并测试序列的两级汉明相关特性。

步骤1 由文献[17]构造得到一个基序列集合:

$$\mathbf{S} = (1, 6, 11, 1, 6, 11, 2, 7, 12, 4, 9, 14, 2, 7, 12); \\ (2, 7, 12, 2, 7, 12, 3, 8, 13, 0, 5, 10, 3, 8, 13); \\ (3, 8, 13, 3, 8, 13, 4, 9, 14, 1, 6, 11, 4, 9, 14); (4,$$

9, 14, 4, 9, 14, 0, 5, 10, 2, 7, 12, 0, 5, 10); (0, 5, 10, 0, 5, 10, 1, 6, 11, 3, 8, 13, 1, 6, 11);

可以验证该序列集为一类最优的无碰撞区跳频序列集合,无碰撞区宽度为 $W=2$,无碰撞区外的汉明相关也很小($H_m(\mathbf{S})=3$)。

步骤2 将 \mathbf{S} 中的前4条序列依次两两级联,得到如下序列: $[s_1, s_2], [s_2, s_3], [s_3, s_4], [s_4, s_1]$ 。这里只给出 $[s_1, s_2]$ 的级联结果: $[s_1, s_2] = (1, 6, 11, 1, 6, 11, 2, 7, 12, 4, 9, 14, 2, 7, 12, 2, 7, 12, 2, 7, 12, 3, 8, 13, 0, 5, 10, 3, 8, 13)$ 。级联后的序列为长度 $2L=30$ 的无碰撞区跳频序列。由此,得到HQoS层跳频序列集合 $\mathbf{C}^H = \{c_1^H; c_2^H; c_3^H; c_M^H\} = \{[s_1, s_2]; [s_2, s_3]; [s_3, s_4]; [s_4, s_1]\}$ 。该跳频序列集合中有 $N_1=M=4$ 条无碰撞区跳频序列,无碰撞区长度也为2。

步骤3 取一个整数 $a=3$,构造长度为2移位序列集合: $e_1 = (0, \lfloor L/2 \rfloor) = (0, 7)$; $e_2 = (a, a + \lfloor L/2 \rfloor) = (3, 10)$; $e_3 = (2a, 2a + \lfloor L/2 \rfloor) = (6, 13)$ 。对 \mathbf{S} 中第5条序列 s_5 分别进行交织,得到LQoS层跳频序列集合 \mathbf{C}^L 。以第1条移位序列(0,7)为例,对序列 s_5 分别进行0位和7位移位后,分别得到如下两条序列: $[(0, 5, 10, 0, 5, 10, 1, 6, 11, 3, 8, 13, 1, 6, 11); (6, 11, 3, 8, 13, 1, 6, 11, 0, 5, 10, 0, 5, 10, 1)]$ 。对上述矩阵按列依次读取,得到 \mathbf{C}^L 中第1条跳频序列: $c_1^L = I(s_5, e_1) = (0, 6, 5, 11, 10, 3, 0, 8, 5, 13, 10, 1, 6, 6, 11, 11, 0, 3, 5, 8, 10, 13, 0, 1, 5, 6, 10, 11, 1)$ 。利用不同的移位序列(3,10)和(6,13)进行交织,可以得到另外2条序列。因此,LQoS层跳频序列集合可以表示为: $\mathbf{C}^L = \{c_1^L; c_2^L; c_3^L\} = \{I(s_5, e_1); I(s_5, e_2); I(s_5, e_3)\}$ 。

由交织技术特性^[7,18]和基序列特性^[17],可以得到如下结论:(1) \mathbf{C}^H 是一类无碰撞区跳频序列; \mathbf{C}^L 是一类低碰撞区跳频序列集合。(2)构造的跳频序列具有两级汉明相关值: \mathbf{C}^H 具有零碰撞区特性 $H_m(|\tau| \leq W | \mathbf{C}^H) = 0$; \mathbf{C}^L 具有低碰撞区碰撞特性 $H_m(|\tau| \leq W | \mathbf{C}^L) \leq 2H_m(\mathbf{S})$;(3) \mathbf{C}^H 和 \mathbf{C}^L 跳频序列集合间汉明相关值也很小,即 $H_m(|\tau| \leq W | \mathbf{C}^H, \mathbf{C}^L) \leq 2H_m(\mathbf{S})$ 。这些汉明相关特性为实现多层异构FH/SCMA网络的多级QoS性能提供了序列基础。

4 基于多级QoS跳频序列的FH/SCMA系统性能分析

本节将构造得到的两级QoS跳频序列 $\mathbf{C} = \{\mathbf{C}^H; \mathbf{C}^L\}$ 应用于两层异构多小区FH/SCMA网络中,通过仿真验证异构FH/SCMA网络的传输性能。为了与实际异构网络接入情况相吻合,假设两层小区多用户准同步接入。为了便于仿真分析,不

失一般性地假设RB组 $F_{MC}^{(i)}$ 由 K 个连续的RB组成，且 $F_{MC}^{(i)}$ 内的信道增益恒定不变，不同RB组具有不同信道质量。由于信道衰落和干扰的影响，可用的 Q 个RB组的信道增益 $H' = \{h'_0, h'_1, \dots, h'_{Q-1}\}$ ，其增益幅度 ($r_i = |h'_i|$) 满足频率选择性Rayleigh衰落。仿真中，系统的其他参数设置如下：可用的RB组数 $Q=15$ ，每个小区的用户数 $J=6$ ，用户使用 $(K \times M) = (4 \times 4)$ 维SCMA码本。

首先研究本文提出的多层FH/SCMA网络抵抗信道衰落(干扰)的能力。图4给出了RBs中存在频率选择性衰落时两层FH/SCMA小区的误码率曲线。为了验证该新系统抵抗信道衰落的能力，该仿真中假设跨层干扰为0(仅考虑本层FH/SCMA系统)，也就是说，仿真HQoS层时，设LQoS层小区数 $N_2=0$ ；仿真LQoS层时，设HQoS层小区数 $N_1=0$ 。这样更能体现跳频技术在多层多小区SCMA系统的抗频率选择性衰落的能力。为了便于比较，本仿真还给出了采用传统频分复用(FDMA) SCMA多小区系统性能(即图4中FDMA/SCMA所示)。由图4可以看出，由于FDMA方式固定分配频带资源，因此当小区工作在非深度衰落频段得到最优性能(Best-case)，当小区工作在深度衰落频段得到最差性能(Worst-case)。而在本文提出的FH/SCMA网络中，由于小区工作频带随设计的跳频序列跳变，使得每个小区受到信道深度衰落(干扰)的影响均匀化，误码率处于“最优-最差”性能之间(更接近于最优BER曲线)，本文提出FH/SCMA通信系统可有效地抵抗信道衰落的影响。同时，该异构网络表现出两级BER传输性能(HQoS层和LQoS层)。

然后，考虑最大接入时延 D 下两层多小区FH/SCMA系统的两级传输性能，如图5所示。这里主要考虑多层准同步接入 ($D \leq WT$) 和同步接入

($D=0$) 两种情况(在实际网络中，多层网络采用准同步接入方式更为普遍)。从图中可以看出，采用本文提出的两级汉明相关跳频序列后，准同步接入FH/SCMA系统误码率性能优于同步接入的性能；同时，系统所呈现出的两级传输特性(HQoS层和LQoS层)。系统BER特性规律与设计的跳频序列汉明相关值密切相关。由于 C^H 和 C^L 两个子序列集具有两级汉明相关特性，同步接入 ($D=0$) 时的汉明相关值大于准同步接入 ($D \leq WT$) 时的汉明相关值(也可参见上节的序列例子结论)。对于传统随机跳频序列，由于其频点满足任何时延下的独立均匀分布，因此不同时延 D 下传统随机跳频SCMA系统的误码率相互重合。在准同步接入时，采用本文提出的FH/SCMA方案，HQoS层和LQoS层的误码率均小于传统随机跳频SCMA系统。

进而，研究基于两级QoS跳频序列异构多小区FH/SCMA网络的同层干扰和跨层干扰情况。图6给出了HQoS层小区误码率与多层小区数的关系。系统参数设置为：两层网络小区各用户准同步接入，HQoS层小区个数 $N_1=\{1,4\}$ ，LQoS层小区个数为 $N_2=\{1,4\}$ 。从图中可以看出，对于给定 N_2 时， $N_1=\{1,4\}$ 的BER曲线基本重合；对于给定 N_1 且 N_2 增加时，HQoS层的误码率整体上升。上述现象说明，HQoS层的误码率性能与本层小区数 N_1 无关，这是因为构造的HQoS子跳频序列集合具有“无碰撞区正交”特性 ($H_m(|\tau| \leq W | C^H) \equiv 0$)；HQoS层的性能只受来自LQoS层的跨层干扰影响 ($H_m(|\tau| \leq W | C^H, C^L) \neq 0$)。

图7给出了LQoS层用户受到同层干扰和跨层干扰影响时的误码率性能。仿真参数设置与图6相同。由本仿真图可以看出，LQoS层用户数 N_2 的增加(和HQoS用户 N_1 的增加)都会带来LQoS层

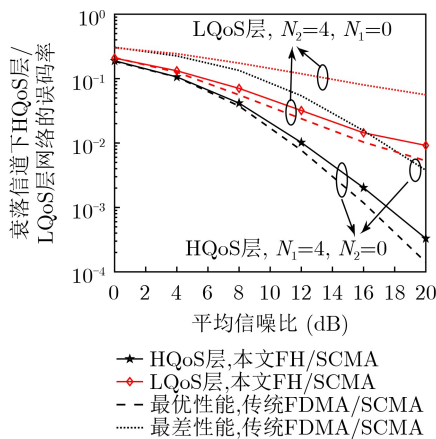


图4 RBs中存在频率选择性衰落时两层FH/SCMA小区的误码率曲线

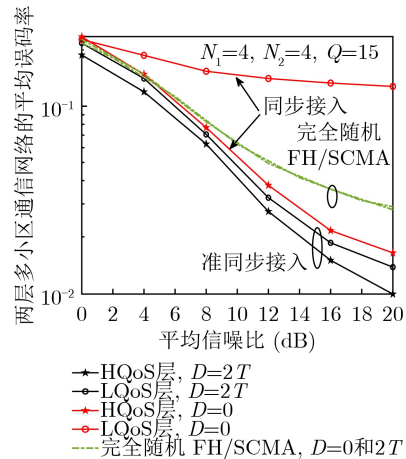


图5 最大接入时延 D 下，两层异构FH/SCMA网络的误码率性能

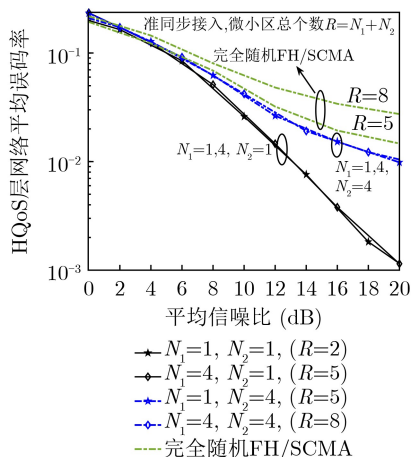


图6 HQoS层小区误码率受多层小区数的影响关系

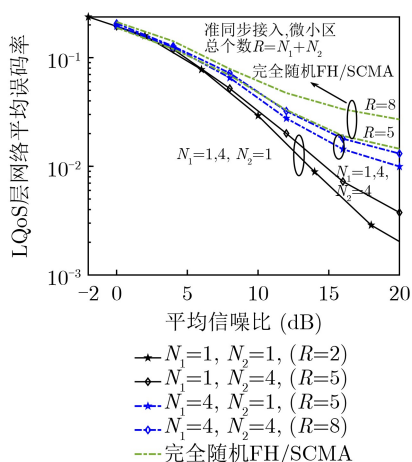


图7 LQoS层小区误码率受多层小区数的影响关系

BER的增加,并且增加 N_1 对LQoS的性能影响更加明显。这说明,LQoS层的干扰主要来源于HQoS的跨层干扰,而LQoS的本层干扰相对较小。这一点也可以从构造的跳频序列的汉明相关特性来解释:在准同步接入时, C^H 和 C^L 之间的汉明相关值 $H_m(|\tau| \leq W|C^H, C^L)$ 一般大于 C^L 内的汉明相关值 $H_m(|\tau| \leq W|C^L)$ 。

图6和图7也给出了采用完全随机跳频SCMA系统性能。为了比较便于比较,完全随机跳频参数与两级QoS跳频图案参数一致,即频点个数为 $Q=15$,小区个数为 $R=N_1+N_2$ 。由于完全随机跳频模式中,频点具有独立的均匀分布特性,因此频点碰撞概率与小区数 R 和频点个数 Q 息息相关,无法完全消除频点碰撞。从仿真图看出,完全随机跳频模式无法提供差异化的BER性能且误码率较高。

5 结束语

随着多种无线通信业务爆发式增长,未来无线通信网络呈现异构多层多小区重叠覆盖、大规模节点接入和多层多级QoS传输需求等特点。在有限频

谱资源下,如何实现网络容量大、频率效率高、干扰抑制佳的无线多层异构网络,是本文主要解决的关键技术问题。本文从信号处理、序列设计与系统分析全方位角度,为多层异构网络及其多级QoS传输需求提供了新的解决方案。

本文首先由传统单小区SCMA网络出发,归纳传统SCMA技术在多小区接入方式、多级QoS需求、抗信道衰落干扰影响等方面的局限性。进而,提出了适合于多层多小区的FH/SCMA传输方案。该网络中,跳频技术及其跳频序列对多层FH/SCMA系统性能起到关键作用。因此,本文另一研究成果为,提出并设计了一类具有两级汉明相关特性的新型跳频序列集合,从而为典型的异构两层FH/SCMA系统实现干扰抑制、两级QoS和两级小区接入奠定了理论基础。最后,通过仿真验证了基于新型跳频序列的FH/SCMA系统的多级BER性能和抑制多层干扰能力。研究成果证实了,新型的多级QoS跳频序列的FH/SCMA系统可实现异构多层多小区接入,有效降低多层干扰(同层/跨层干扰)和衰落信道影响;同时,又可为HQoS层网络和LQoS层网络提供两级BER性能(两级QoS传输需求。)虽然本文主要研究两级QoS跳频序列,但构造思路可通过多种数学方法(交织、迹函数等),进一步扩展为多级QoS跳频序列并应用于多层多小区网络中,这将是本文后续研究内容之一。

参考文献

- [1] HOSSAIN E, RASTI M, TABASSUM H, *et al.* Evolution toward 5G multi-tier cellular wireless networks: An interference management perspective[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2014, 21(3): 118-127. doi: 10.1109/MWC.2014.6845056.
- [2] 肖竹, 李仁发, 易克初, 等. 两层异构网络中femtocell研究进展与展望[J]. *通信学报*, 2013, 34(2): 156-169. XIAO Zhu, LI Renfa, YI Kechu, *et al.* Development and prospect of research on femtocell in two-tier heterogeneous networks[J]. *Journal on Communications*, 2013, 34(2): 156-169.
- [3] 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.
- [4] HAN Changhao, ZHAO Hui, and JIANG Xiangpin. Design of codebook for non-binary polar coded SCMA[C]. The IEEE 32nd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC),

- Helsinki, Finland, 2021: 411–416. doi: [10.1109/PIMRC.50174.2021.9569266](https://doi.org/10.1109/PIMRC.50174.2021.9569266).
- [5] 景小荣, 陶红宝. 一种稀疏码本多址接入码本优化设计方法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(1): 24–31. doi: [10.11999/JEIT180208](https://doi.org/10.11999/JEIT180208).
JIN Xiaorong and TAO Hongbao. Optimization design method for sparse code multiple access codebooks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(1): 24–31. doi: [10.11999/JEIT180208](https://doi.org/10.11999/JEIT180208).
- [6] LIU Zilong and YANG Lieliang. Sparse or dense: A comparative study of code-domain NOMA systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(8): 4768–4780. doi: [10.1109/TWC.2021.3062235](https://doi.org/10.1109/TWC.2021.3062235).
- [7] ZENG Qi, LIU Xing, and DU Pengfei. Multi-level sequence-based frequency-hopping in multi-cell networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(12): 16282–16287. doi: [10.1109/TVT.2020.3039843](https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3039843).
- [8] TORRIERI D, TALARICO S, and VALENTI M C. Analysis of a frequency-hopping millimeter-wave cellular uplink[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(10): 7089–7098. doi: [10.1109/TWC.2016.2597210](https://doi.org/10.1109/TWC.2016.2597210).
- [9] 梅文华, 王淑波, 邱永红, 等. 跳频通信[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 310–360.
MEI Wenhua, WANG Shubo, QIU Yonghong, *et al.* Frequency Hopping Communications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005: 310–360.
- [10] BAI Zhicheng, LI Bo, YANG Mao, *et al.* FH-SCMA: Frequency-hopping based sparse code multiple access for next generation internet of things[C]. 2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), San Francisco, USA, 2017: 1–6. doi: [10.1109/WCNC.2017.7925550](https://doi.org/10.1109/WCNC.2017.7925550).
- [11] LI Shaosheng, NIE Hongrui, and WU Huici. Performance analysis of frequency hopping Ad Hoc communication system with non-orthogonal multiple access[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 113171–113181. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2935024](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2935024).
- [12] MARIC S and VELIMIROVIC L Z. Optimal frequency hopping patterns for FH-SCMA[C]. 2018 IEEE 5G World Forum (5GWF), Silicon Valley, USA, 2018: 377–382. doi: [10.1109/5GWF.2018.8516980](https://doi.org/10.1109/5GWF.2018.8516980).
- [13] ZENG Qi, LIU Zilong, LIU Xing, *et al.* Frequency-hopping based SCMA for massive connectivity in multi-cell networks[C]. The IEEE 94th Vehicular Technology Conference, Norman, USA, 2021: 1–6. doi: [10.1109/VTC2021-Fall52928.2021.9625058](https://doi.org/10.1109/VTC2021-Fall52928.2021.9625058).
- [14] 张达敏, 张绘娟, 闫威, 等. 异构网络中基于能效优化的D2D资源分配机制[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(2): 480–487. doi: [10.11999/JEIT190042](https://doi.org/10.11999/JEIT190042).
ZHANG Damin, ZHANG Huijuan, YAN Wei, *et al.* D2D Resource allocation mechanism based on energy efficiency optimization in heterogeneous networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(2): 480–487. doi: [10.11999/JEIT190042](https://doi.org/10.11999/JEIT190042).
- [15] NIU Xianhua, XING Chaoping, LIU Yang, *et al.* A construction of optimal frequency hopping sequence set via combination of multiplicative and additive groups of finite fields[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2020, 66(8): 5310–5315. doi: [10.1109/TIT.2020.2972388](https://doi.org/10.1109/TIT.2020.2972388).
- [16] CAI Han, YANG Yang, ZHOU Zhengchun, *et al.* Strictly optimal frequency-hopping sequence sets with optimal family sizes[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2016, 62(2): 1087–1093. doi: [10.1109/TIT.2015.2512859](https://doi.org/10.1109/TIT.2015.2512859).
- [17] ZENG Qi, ZHOU Zhengchun, LIU Xing, *et al.* Strong no-hit-zone sequences for improved quasi-orthogonal FHMA systems: Sequence design and performance analysis[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(8): 5336–5345. doi: [10.1109/TCOMM.2019.2915799](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2019.2915799).
- [18] NIU Xianhua, HAN Lu, and LIU Xing. New extension interleaved constructions of optimal frequency hopping sequence sets with low hit zone[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 73870–73879. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2919353](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2919353).
- 曾琦: 男, 副教授, 研究方向为非正交多址技术、uRLLC波形设计、干扰抑制技术。
钟俊: 男, 副教授, 研究方向为无线通信技术、雷达信号处理。
刘星: 男, 助理研究员, 研究方向为跳频系统、跳频序列、编码理论。

责任编辑: 余蓉