



XXXX

5G网络中PDSCH RBG随机化分配策略的性能优化研究

求钦龙¹, 李文娟², 张启飞³

(1. 绍兴职业技术学院信息工程学院, 浙江 绍兴 312000;

2. 杭州师范大学信息科学与技术学院, 浙江 杭州 311121;

3. 浙江大学软件学院, 浙江 宁波 315000)

摘要: 针对5G网络多小区同频干扰与复杂信道环境快速变化的挑战, 提出一种物理下行共享信道 (physical downlink shared channel, PDSCH) 资源块组 (resource block group, RBG) 随机化分配方法, 并通过理论分析确立其性能边界。该方法通过随机化不同小区的频域资源位置, 有效规避资源重叠, 显著抑制小区间干扰; 同时通过对用户设备 (user equipment, UE) 进行均匀频域调度, 保障各位置用户获得稳定的服务质量, 缓解资源分配不均导致的体验差异。系统级仿真结果表明, 在中低负载场景下, 所提方法能够提升小区平均吞吐量4%以上, 小区边缘用户的吞吐量16%以上。

关键词: 物理下行共享信道 (PDSCH); 资源块组 (RBG); 随机化分配; 吞吐量

中图分类号: TN929.53

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.

Research on Performance Optimization of Randomized RBG Allocation Strategies for PDSCH in 5G Networks

QIU Qinlong¹, LI Wenjuan², ZHANG Qifei³

1. Information Engineering, Shaoxing Vocational & Technical College, 31200, China

2. Information Science and Technology, Hangzhou Normal University, 311121, China

3. School of Software, Zhejiang University, 315000, China

Abstract: To address the challenges of inter-cell co-channel interference and rapid channel variations in complex 5G network environments, a randomized resource block group (RBG) allocation method for the physical downlink shared channel (PDSCH) is proposed, and its performance boundaries are theoretically established. By randomizing the frequency-domain resource positions across different cells, the proposed method effectively avoids resource overlapping and significantly suppresses inter-cell interference. Meanwhile, through uniform frequency-domain scheduling

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修回日期: XXXX-XX-XX

通信作者: 求钦龙, qiuqinlong@163.com

基金项目: 浙江省自然科学基金杭州市联合基金重点项目 (No.LHZSZ24F020001); 浙江省“尖兵领雁+X”科技计划项目 (No. 2026C02A1245)

Foundation Items: The Joint Funds of the Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (No. LHZSZ24F020001), The Zhejiang Provincial Leading (Lingyan) RD Program (No.2026C02A245)



for user equipments (UEs), it ensures stable service quality for users at various locations, thereby alleviating experience disparities caused by uneven resource distribution. System-level simulation results demonstrate that the proposed method improves the average cell throughput by more than 4% and the cell-edge user throughput by more than 16% under medium and low load scenarios.

Key words: physical downlink shared channel (PDSCH), resource block group (RBG), randomized allocation, throughput

0 引言

频谱是无线通信系统中最关键和最有价值的资源^[1]。随着5G的飞速发展,频谱资源的高效利用成为通信领域亟待解决的关键问题之一。而作为下行数据传输的主要信道物理下行共享信道(physical downlink shared channel, PDSCH)承载了从基站(gNB)到用户设备(user equipment, UE)的大部分数据传输^[2],且其耗时占据了数据时延的绝大部分^[3],因此对其进行性能优化显得尤为重要。

目前已有的性能优化集中在PDSCH编码优化^[4-6]、信道估计^[7-9]和多址接入^[10]等技术上,对资源块组(resource block group, RBG)分配方面的优化相对较少。而传统的RBG分配方式在某些场景下存在资源浪费、抗干扰能力不足等问题^[11]。因此,研究PDSCH RBG的分配方式并对其优化具有重要意义。

在5G中,PDSCH的RBG分配方式包括传统的Type 0和Type 1^[12]。这两种方式均由基站集中调度,用于指示UE如何解析接收到的资源分配信息。其中,Type 0通过位图的方式分配RBG,其特点是能够为单UE分配非连续的RBG,从而在频域上提供一定的灵活性。该方式适用于多径衰落显著、信道条件快速变化的场景,能够灵活支持多用户动态共享频谱资源;但其调度开销较大,需更多下行控制信息(downlink control information, DCI)指示资源分配,实现复杂度较高,对基站与终端的处理能力要求更为严格。而Type 1分配方式则要求UE获得的RBG资源在频

域连续,适用于信道条件稳定且优良的场景,如单用户或少量用户的高吞吐量业务(例如高清视频流媒体)。Type 1分配方式调度机制简单,易于实现,且能通过连续资源分配减少频谱碎片,提升频谱利用效率;其局限性在于难以适应需频谱碎片化分配的场景,灵活性不及Type 0,在信道条件多变或干扰复杂的环境中频谱利用率可能下降。

这两种传统的PDSCH RBG分配方式各有优缺点,具体选择哪种方式取决于系统的具体需求和所处的信道条件。针对传统分配方式在抗干扰能力和资源利用率方面存在的局限性,本文提出一种改良的Type 0分配方式——面向PDSCH的RBG随机化分配策略。该策略通过引入随机化机制,使不同小区的资源分配位置尽可能错开,从而有效抑制小区间同频干扰;同时通过对UE进行均匀的频域资源分配,提升资源调度的公平性,增强系统在复杂信道环境下的鲁棒性。具体安排如下:章节1给出了具体的随机分配方案及其理论基础,章节2给出了仿真环境及其相关的业务模型,章节3分析了不同场景下的各种测试结果及理论性能的边界验证,最后章节4进行了总结和未来工作的展望。

1 PDSCH的RBG随机分配策略

在5G中,带宽部分(bandwidth part, BWP)机制是灵活管理频谱资源的重要特性^[12]。BWP是一组连续的物理资源块(physical resource block, PRB),从给定载波上给定参数集(numerology, μ)的公共资源块的连续子集中选择。

每个BWP可以有不同的子载波间隔、循环前缀长度和频域资源分配方式。BWP允许网络根据UE的能力和业务需求动态分配频谱资源，从而提高频谱效率和系统性能。比如对于大多数物联网场景，可以分配更小的载波带宽而不是原来的全带宽^[13]。

BWP机制包括单激活BWP和多激活BWP这两种机制。在单激活BWP机制中，UE在每个载波上只能激活一个下行BWP和一个上行BWP。这意味着UE在同一时刻只能使用一个BWP进行数据传输，但这样的设计能简化UE和网络的实现复杂度，而且能显著减少切换BWP带来的时延。但是由于UE无法同时使用多个BWP，限制了对不同业务需求的支持，比如在需要支持多种子载波间隔的场景，UE必须在不同BWP之间切换。而多激活BWP机制允许UE同时激活多个BWP，它的优缺点刚好和单激活BWP相反。下面分别讨论这两种激活BWP机制下的PDSCH RBG的随机分配策略。

1.1 单激活BWP下的PDSCH RBG随机分配

在5G中，常用的gNB调度器是基于加权轮询（weighted round robin, WRR）机制设计的。该机制包括权重分配，轮询调度，权重调整和带宽分配这四个步骤^[11,14]。

(1) 权重分配：WRR机制为每个队列分配一个权重 w_i ，权重值越大，该队列在调度中获得的服务机会就越多。权重一般以业务类型进行配

置的。

(2) 轮询调度：gNB调度器按照各个队列的权重顺序，依次从每个队列中取出一个数据包进行服务。如果某个队列的权重较高，它将在轮询中获得更多的服务机会。

(3) 权重调整：在服务完一个队列的数据包后，该队列的权重会降低，以防止高权重队列无限期占用服务资源。当所有队列的权重都用完后，权重会重新初始化，开始新一轮的调度。

(4) 带宽分配：WRR根据每个队列的权重与所有队列权重总和的比例，公平地分配带宽资源。这确保高优先级队列能够获得更多的带宽，同时低优先级队列也不会被完全阻塞。

RBG随机分配发生在上述的第(4)步里。由于5G的调度是以时隙为单位的，系统需要在每一个小区的每一个时隙上对RBG进行随机分配。本文设计了式(1)用于产生PDSCH RBG的随机索引号，然后以升序的方式进行RBG的分配。

$$\left\{ \left(n_{SFN} \cdot N_{slot}^{frame, \mu} + n_{slot, frame} \right) + n_{PCI} + n_{RBG} + 1 \right\} \cdot PN \} \bmod N_{RBG} \quad (1)$$

式(1)各个参数的含义如表1。

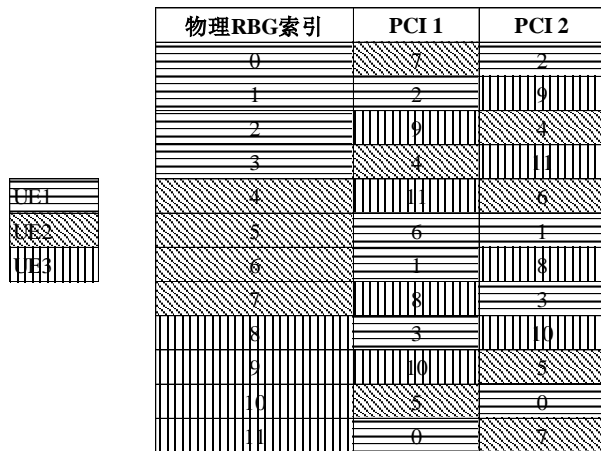
下面以FDD 5 MHz为例，给PCI 1和PCI 2这两个小区分别生成随机数作为分配RBG的索引。在FDD模式下，5 MHz带宽的RBG数量可以通过以下方式计算：子载波间隔为15 kHz时，

表1 产生RBG随机索引的各参数含义
Tab.1 Parameters for generating randomized RBG index

参数名	含义
n_{SFN}	系统帧号
$N_{slot}^{frame, \mu}$	一帧内总的时隙数
$n_{slot, frame}$	一帧内的时隙号
n_{PCI}	PCI号
n_{RBG}	RBG的索引号
N_{RBG}	总共的完整RBG个数
PN	频分双工 (Frequency Division Duplex, FDD) 5 MHz和时分双工 (Time Division Duplex, TDD) 20 MHz时为991; 其他997



对应的PRB数量为25。对于5 MHz带宽，一个RBG通常包含2个PRB。因此，RBG的数量为 $25/2=12.5$ 。由于RBG数量必须是整数，通常会向上取整，因此5 MHz带宽下有13个RBG。但是最后一个RBG是不完整的RBG，故 $N_{RBG}=12$ 。对于FDD 5 MHz来说，一帧内总的时隙数 $N_{slot}^{frame,\mu}=10$ ，假设当前为第一帧 $n_{SFN}=1$ 的第一个时隙 $n_{slot,frame}=1$ ，共有3个UE（UE1，UE2和UE3）需要调度，每个UE需要4个RBG，最后生成的RBG随机索引如图1。最后一个不完整的RBG只有当某个UE申请的是全带宽的BWP的时候才会被使用。



物理RBG索引	PCI 1	PCI 2
0	7	2
1	2	9
2	9	4
3	4	11
4	11	5
5	6	1
6	1	8
7	8	3
8	3	10
9	10	6
10	5	0
11	0	7

图1 物理RBG索引对应的随机RBG索引

Fig.1 Randomized allocation index derived from physical RBG index

1.2 多激活BWP下的PDSCH RBG随机分配

多激活BWP场景下，PDSCH RBG随机分配机制如下：首先，基于单激活BWP机制建立所有BWP的随机RBG分配索引；其次，从最小激活BWP开始，为当前时隙调度的UE分配所需RBG；再次，依次为次小激活BWP分配RBG；重复上述过程，按BWP大小顺序完成所有激活BWP的RBG分配。需注意的是，为某激活BWP分配RBG时，应避免已分配的RBG资源。

仍以FDD 5 MHz为例，UE1与UE2各需BWP 2的4个RBG，UE3需BWP 1的4个RBG。

UE1与UE2在BWP 2上的RBG分配机制与1.1节单激活BWP机制相同。UE3在BWP 1上分配RBG时，因BWP 1随机索引2和4对应的资源已被BWP 2的UE部分占用，按升序原则，只能给UE3分配BWP 1随机分配的RBG索引3和5。最后生成的RBG随机索引如图2。

1.3 与3GPP标准典型的干扰抑制技术对比

为明确所提RBG随机化分配策略的技术定位，与3GPP标准中典型的干扰抑制机制进行原理性对比。RBG跳频是5G系统中常用的干扰随机化手段，通过预定义的跳频图案在时隙间切换频域位置；然而标准中的跳频周期固定、图案可预测，且缺乏小区间差异化设计，随机化充分性受限。相比之下，本文策略基于PCI与质数散列构建伪随机置换，具有更长周期、更高均匀性及确定性的小区间偏移，干扰随机化更为彻底。

小区间干扰协调（Inter-Cell Interference Coordination, ICIC）及其演进技术增强型小区间干扰协调（enhanced Inter-Cell Interference Coordination, eICIC）、进一步增强型小区间干扰协调（Further enhanced Inter-Cell Interference Coordination, FeICIC）则采用截然不同的思路，依赖X2接口的信令交互实现资源块的静态或半静态协调分配，或进一步通过几乎空白的子帧、功率控制等方式抑制干扰。此类技术虽可获得更确定的干扰规避效果，但需额外的信令开销与集中式调度决策，实现复杂度高，且对回传链路时延与带宽有严格要求。本文策略完全分布式实现，无需小区间实时信息交换，通过数学设计的独立随机序列达成隐式干扰规避，以低复杂度为代价换取性能增益，更适用于大规模密集组网场景的快速部署与灵活配置。上述差异也构成了本文理论分析的出发点：在无需协作信令的前提下，随机化分配的性能边界何在？该问题将在下一节予以探讨。

BWP 1物理RBG索引	BWP 1随机分配的RBG索引	BWP 2物理RBG索引	BWP 2随机分配的RBG索引
0	7	0	7
1	2	1	2
2	9	2	9
3	4	3	4
4	11	4	11
5	6	5	6
6	1	6	1
7	8	7	8
8	3	8	3
9	10	9	10
10	5	10	5
11	0	11	0

图2 多激活BWP下的PDSCH RBG随机分配索引

Fig.2 Randomized allocation index of PDSCH RBG with multiple active BWPs

1.4 RBG随机化分配的理论基础

为深入理解上述随机化策略相较于标准技术的性能优势，本节基于信息论与概率论建立理论分析框架，确立所提方法的性能边界。考虑包含 N 个小区的蜂窝网络，每小区有一个 gNB 和多个 UE，采用经典 Wyner 模型的扩展形式^[15]：每小区分配 M 个 RBG 资源块，总带宽被划分为 M 个离散的 RBG 单元，采用频率复用因子为 1 的同频组网方式。设小区 i 在 RBG_m 上的发射功率为 $P_{i,m}$ ，则小区 i 中某个典型 UE 在 RBG_m 上接收到的信号为：

$$y_{i,m} = \sqrt{P_{i,m}} h_{ii,m} x_{i,m} + \sum_{j \neq i} \sqrt{P_{j,m}} h_{ji,m} x_{j,m} + n_{i,m} \quad (2)$$

其中 $h_{ii,m}$ 为服务小区信道增益， $h_{ji,m}$ 为干扰小区 j

到目标 UE 的信道增益， $n_{i,m}$ 为加性高斯白噪声，方差为 σ^2 。定义分配指示变量：

$$a_{i,m} = \begin{cases} 1, & \text{如果分配 } RBG_m \text{ 给小区 } i \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (3)$$

本文提出的随机化分配策略可建模为：每小区独立均匀随机选择 K 个 RBG (K 为负载因子)。小区 i 选择 RBG_m 的概率为 $p = K/M$ 。

定理1 RBG冲突概率

在随机化分配下，任意两相邻小区在同一 RBG 上发生冲突的概率为：

$$P_{collision} = p^2 = \left(\frac{K}{M}\right)^2 \quad (4)$$

该公式表明，随机化分配将确定性冲突转化为概率性冲突，冲突概率与负载因子的平方成正比



比。定义干扰随机化增益为相对于固定分配（冲突概率为1）的干扰方差减少量。对于典型UE，在RBG_m上的SINR为：

$$\text{SINR}_{i,m} = \frac{P_{i,m} |h_{ii,m}|^2}{\sigma^2 + \sum_{j \neq i} a_{j,m} P_{j,m} |h_{ji,m}|^2} \quad (5)$$

单用户遍历容量为 $C = \mathbb{E}[\log_2(1 + \text{SINR})]$ 。

设干扰项 $I = \sum_{j \neq i} a_{j,m} P |h_{ji,m}|^2$ ，假设 $|h_{ji,m}|^2 \sim \text{Exp}(1)$ （瑞利衰落），则固定分配时（所有小区使用相同RBG），

$$I_{\text{fixed}} = \sum_{j \neq i} P |h_{ji,m}|^2 \quad (6)$$

由于 $a_{j,m} = 1$ ，对所有j，干扰是确定性的。随机化分配时，

$$I_{\text{random}} = \sum_{j \neq i} a_{j,m} P |h_{ji,m}|^2 \quad (7)$$

其中 $a_{j,m} \sim \text{Bernoulli}(p)$ 且独立， $\mathbb{E}[a_{j,m}] = p$ ， $\mathbb{E}[a_{j,m}^2] = p$ ，因此 $\text{Var}(a_{j,m} X_j) = p \cdot \mathbb{E}[X_j^2] - p^2 \cdot (\mathbb{E}[X_j])^2$ 。

假设 $|h_{ji,m}|^2 \sim \text{Exp}(1)$ （瑞利衰落），对于指数分布 $\mathbb{E}[|h|^2] = 1$ ， $\mathbb{E}[|h|^4] = 2$ ，因此 $\mathbb{E}[X_j] = P \cdot \mathbb{E}[|h|^2] = P$ ，

$$\mathbb{E}[|h|^2] = P,$$

$$\mathbb{E}[X_j^2] = P^2 \cdot \mathbb{E}[|h|^4] = 2P^2, \quad \text{代入后}$$

$\text{Var}(a_{j,m} X_j) = p \cdot 2P^2 - p^2 \cdot P^2 = P^2(2p - p^2) = pP^2(2 - p)$ ，求和后化简得到如下公式：

$$\text{Var}(I_{\text{random}}) = (N-1) \cdot p \cdot P^2 \cdot \mathbb{E}[|h|^4] \quad (8)$$

由于各 X_j 独立同分布， $\text{Var}(I_{\text{fixed}}) =$

$$\sum_{j \neq i} \text{Var}(X_j) = (N-1) \cdot \text{Var}(X_j)$$

$$\text{Var}(X_j) = P^2 \cdot \text{Var}(|h|^2) = P^2 \cdot \left(\mathbb{E}[|h|^4] - \left(\mathbb{E}[|h|^2] \right)^2 \right)$$

$$\left(\mathbb{E}[|h|^2] \right)^2 = P^2 \cdot (2-1) = P^2$$

$$\mathbb{E}[I_{\text{fixed}}^2] = \mathbb{E}\left[\left(\sum_{j \neq i} X_j \right)^2 \right] = \sum_{j \neq i} \mathbb{E}[X_j^2] +$$

$$\sum_{j \neq k, j, k \neq i} \mathbb{E}[X_j] \mathbb{E}[X_k]$$

$$= (N-1) \cdot 2P^2 + (N-1)(N-2) \cdot P^2$$

$$\left(\mathbb{E}[I_{\text{fixed}}] \right)^2 = \left((N-1) \mathbb{E}[X] \right)^2 = (N-1)^2 P^2$$

利用方差与期望的关系 $\text{Var}(I_{\text{fixed}}) = \mathbb{E}[I_{\text{fixed}}^2] - \left(\mathbb{E}[I_{\text{fixed}}] \right)^2$ ，带入后化简得到如下公式：

$$\text{Var}(I_{\text{fixed}}) = (N-1)^2 \cdot P^2 \cdot \text{Var}(|h|^2) + (N-1) \cdot P^2 \cdot$$

$$\mathbb{E}[|h|^4] \quad (9)$$

随机化分配将干扰方差从 $O(N^2)$ 降低到 $O(Np)$ 。对于独立Bernoulli变量， $\text{Var}(a_{j,m} \cdot X_j) = p \cdot \text{Var}(X_j) + p(1-p) \cdot (\mathbb{E}[X_j])^2$ ，由于 $p = K/M \ll 1$ （典型负载），方差显著降低。在干扰受限的区域（即高SNR区域），N小区M个RBG系统的容量上界为：

$$C_{\text{sum}}^{\text{upper}} = M \cdot \sum_{i=1}^N \mathbb{E} \left[\log_2 \left(1 + \frac{P |h_{ii}|^2}{\sum_{j \neq i} a_{j,m} P |h_{ji}|^2} \right) \right] \quad (10)$$

利用Jensen不等式^[14]和对数函数的凹性：

$$C_{\text{sum}} \leq M \cdot \sum_{i=1}^N \log_2 \left(1 + \frac{P \cdot \mathbb{E}[|h_{ii}|^2]}{\mathbb{E} \left[\sum_{j \neq i} a_{j,m} P |h_{ji}|^2 \right]} \right) \quad (11)$$

计算分母的期望：

$$\mathbb{E}\left[\sum_{j \neq i} a_{j,m} P |h_{ji}|^2\right] = (N-1) \cdot p \cdot P \cdot \mathbb{E}[|h|^2] = (N-1) \cdot \frac{K}{M} \cdot P, \text{因此:}$$

$$C_{\text{sum}}^{\text{upper}} \leq M \cdot N \cdot \log_2 \left(1 + \frac{1}{(N-1) \cdot \frac{K}{M} \cdot \mathbb{E}[|h_{\text{inter}}|^2] / \mathbb{E}[|h_{\text{intra}}|^2]} \right) \quad (12)$$

如果存在理想的协作调度，可以完全消除小区间干扰，则和容量上界为：

$$C_{\text{sum}}^{\text{ideal}} = M \cdot N \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P \cdot \mathbb{E}[|h_{ii}|^2]}{\sigma^2} \right) \quad (13)$$

定义随机化分配与理想方案的差距为干扰消除效率 $\eta = \frac{C_{\text{sum}}^{\text{random}}}{C_{\text{sum}}^{\text{ideal}}}$ 。在高 SNR 区域 ($\sigma^2 \rightarrow 0$) 时

$$\eta \approx \frac{\log_2 \left(1 + \frac{M}{(N-1)K \cdot \alpha} \right)}{\log_2(\text{SNR})}, \quad \text{其中} \quad \alpha =$$

$\mathbb{E}[|h_{\text{inter}}|^2] / \mathbb{E}[|h_{\text{intra}}|^2]$ 为路损因子。

定理2 最优负载因子

利用凸优化理论^[17]，可以证明存在最优的每小区 RBG 分配数 K^* 使得和容量最大化（受 $N \cdot K \leq M$ 的资源约束）。

$$K^* = \arg \max_K N \cdot K \cdot \mathbb{E} \left[\log_2 \left(1 + \frac{P |h_{ii}|^2}{\sigma^2 + \sum_{j \neq i} a_{j,m} P |h_{ji}|^2} \right) \right] \quad (14)$$

本文中的随机索引公式式 (1) 实际上实现了一个确定性的伪随机置换，其统计特性近似于

均匀随机分配。不同 PCI 的小区通过 n_{PCI} 项实现初始偏移，降低邻区相关性。选择大质数 PN （如 991/997）是为了：

- 确保置换的周期足够长（ PN 是周期），
- 最大化 $\text{gcd}(PN, N_{\text{RBG}}) = 1$ ，保证满射性，
- 使序列 $\{k \cdot PN \bmod N\}$ 在 $k = 1, 2, \dots$ 时均匀分布。

若 PN 为质数且 $PN > N_{\text{RBG}}$ ，则映射 $k \rightarrow k \cdot PN \bmod N_{\text{RBG}}$ 为 $\{0, 1, \dots, N_{\text{RBG}} - 1\}$ 上的双射，确保每个 RBG 被等概率访问。若选取更大质数会引发一系列工程实现难题：gNB 需维护更长的历史分配记录，导致内存开销显著增加；UE 难以预测远距离未来的资源位置，影响调度延迟感知与实时性保障；同时，过长的周期使碰撞检测与冲突分析趋于复杂，降低系统可控性。

2 仿真环境及 VoNR 业务模型

2.1 仿真环境

为了验证前文提及的 PDSCH RBG 随机化分配机制带来的系统性能的影响，在诺基亚的内部仿真系统（该仿真系统遵循 3GPP 的网络标准）中设计了如图 3 的网络拓扑结构。该网络包含 7 个 gNB（如图 3 中的小三角形所示），每个 gNB 覆盖 120 度的 3 个小区（如图 3 中的正六边形所示），因此在仿真中总共有 21 个小区。图 3 中正六边形内的数字代表小区的 PCI 号 n_{PCI} 。相邻小区的 PCI 号 n_{PCI} 模 3 以后的数值是不同的，用来减小小区间的同频干扰。gNB 间的站间距（inter site distance, ISD）被设置为 500 米，以模拟典型的都市密集小区环境。

表 2 给出了系统仿真中采用的关键配置参数。除非另有说明，第 3 章中展示的仿真结果均是基于这些配置参数得出的。仿真中的无线环境设置为典型的都市宏小区（urban macro, UMa）场景。UMa 的信道模型详细描述于 3GPP TR 38.901 标

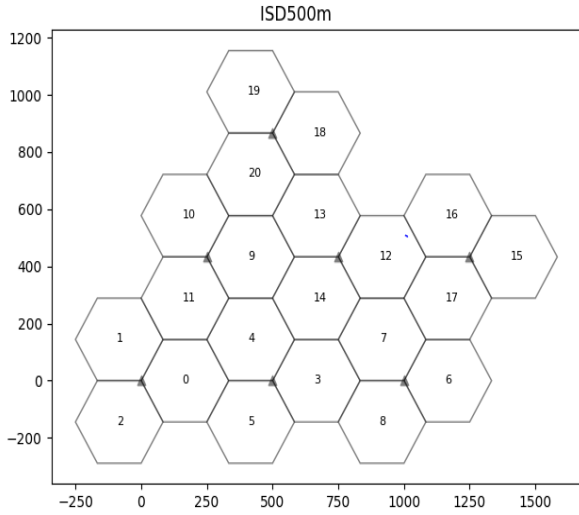


图3 仿真环境中的网络拓扑

Fig.3 Network topology in the simulation environment

准^[18]。无建筑物模型的干扰主要来自视距路径，路径损耗规律性强；而建筑物遮挡将导致大量非视距传播，干扰具有突发性和空间不均匀性，某些RBG上的干扰可能被结构性阻断，随机化分配的边际效益将降低。

表2 仿真环境中的关键配置参数

Tab.2 Key configurable parameters in the simulation environment

配置参数	具体数值	
无线环境	城市宏小区	
街区模式	无建筑物模型	
调制模式	256QAM	
仿真时长	300秒	
UE速度	3 km/h	
双工模式	FDD	TDD
中心频点	2.1 GHz	3.5 GHz
系统带宽	20 MHz	100 MHz

2.2 仿真中的业务模型

5G网络采用VoNR解决方案来承载对传输时延和丢包率非常敏感的语音业务^[19]。仿真实现了包含活跃状态和非活跃状态的VoNR业务模型，如图4所示。这种双态模型可精确刻画语音信号的间歇性特点，即语音信号在活跃状态与非活跃

状态之间的交替。在活跃状态下，用户处于通话状态，系统以固定速率发送语音数据包；而在非活跃状态下，用户处于静默期，系统暂停语音数据传输，仅发送静默指示数据包（silence indication, SID）以保持会话的持续性。表3给出了VoNR业务模型的具体配置参数。

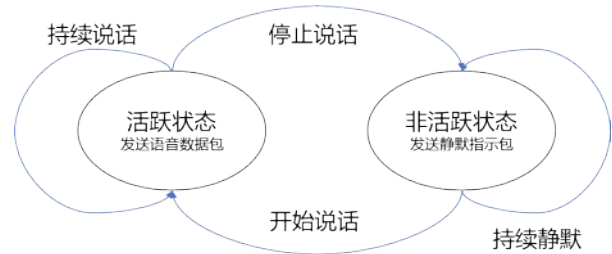


图4 仿真环境中的VoNR业务模型

Fig.4 Traffic model of VoNR in the simulation environment

表3 仿真中VoNR的配置参数及数值

Tab.3 Configuration parameters and their values of VoNR in the simulation

配置参数	具体数值
活跃状态包传输间隔	20毫秒
非活跃状态包传输间隔	160毫秒
语音数据包大小	30字节
静默数据包大小	5字节
数据包的头大小	6字节
语音活动因子	50%

现网中的数据业务包括文件传输、网页浏览、电子邮件收发等。此类业务通常对数据完整性和传输速率有较高要求，但对实时性要求相对较低。仿真系统构建了文件传输协议（File Transfer Protocol, FTP）业务模型，其大部分参数与3GPP 36.814标准A.2.1.3.1章节定义的FTP业务模型^[20]保持一致。区别在于仿真采用了满负荷FTP业务，即持续下载10 KB大小文件，以简化模型实现。

3 仿真结果分析

3.1 单激活BWP下的PDSCH RBG随机分配仿

真结果

单激活BWP场景下，分别针对FDD与TDD网络仿真验证了PDSCH RBG随机分配机制。FDD网络中每小区配置10个VoNR用户和10个FTP用户；TDD网络中每小区配置15个VoNR用户和35个FTP用户。TDD网络配置更多用户的原因在于其系统带宽为100 MHz，而FDD网络仅为20 MHz。此外，与现网负载相比，仿真负载配置相对较低，因高负载场景下随机分配的选择空间受限，相应增益亦受到制约。

图5仿真结果表明，相对于传统的Type 0机制，TDD与FDD网络的平均吞吐量均获得一定提升，边缘吞吐量提升尤为显著。这是由于该策略将相邻小区间的确定性同频干扰转化为概率性随机冲突，使边缘用户获得更多低干扰传输机会；同时实现频域资源的均匀散布，有效规避频率选择性衰落的影响，提升频率分集增益。同时，随机化调度打破了中心用户对优质资源的垄断，改善了调度公平性。此外，仿真日志显示平均PRB占用率下降：FDD网络降低9%，TDD网络降低19%。PRB占用率的下降显著改善了边缘用户吞吐量，原因在于PDSCH RBG随机分配使资源更均匀地分布于整个系统带宽，从而减小相

邻小区同频干扰，带来更大吞吐量增益。进一步分析仿真日志可知，吞吐量提升主要源于FTP用户，VoNR用户性能几乎无变化，无论FDD或TDD，无论小区中心或边缘。主要原因是VoNR采用双态业务模型，活跃期包传输间隔仅20毫秒，数据包大小仅30字节，资源需求极低；加之语音活动因子50%，实际占用RBG数量稀少，频域资源冲突概率本就处于较低水平，随机化分配的干扰规避收益有限。同时，VoNR对时延敏感而速率要求宽松，其性能瓶颈主要在于调度时延与丢包率，而非频谱效率或干扰水平，故随机化带来的频率分集增益与干扰随机化对其核心指标影响甚微。同时仿真日志显示VoNR用户的丢包率和时延几乎没有变化，这是由于VoNR业务是GBR业务，调度时是得到保证的。

为验证算法对信道快速时变的适应性，将UE移动速度从基准的3 km/h分别提升至30 km/h、60 km/h及120 km/h。对应多普勒频移为58 Hz、117 Hz及233 Hz (@2.1 GHz) 或97 Hz、194 Hz及389 Hz (@3.5 GHz)。如图6所示，两种载频下边缘用户吞吐量增益随速度提升呈现差异化趋势：对于2.1 GHz，30 km/h时增益达到峰值25%，60 km/h及以上增益稳定在18%，表明

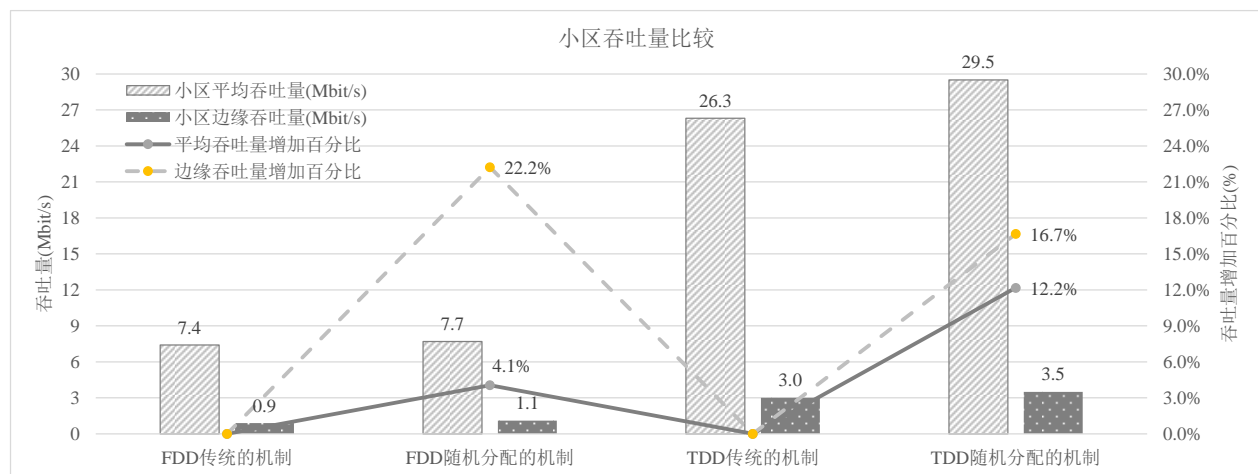


图5 单激活BWP下的PDSCH RBG随机分配仿真结果

Fig.5 The simulation results of randomized RBG allocation for PDSCH with single active BWP



该频段在中低速场景即可充分获取频率分集增益；对于3.5 GHz，由于多普勒频移更高，30 km/h已接近快衰落边界，增益峰值略降至22%，且随速度进一步提升增益衰减更为明显，120 km/h时降至5%左右。上述差异源于3.5 GHz在相同速度下信道相干时间更短，随机化分配的频域跟踪能力面临更大挑战。值得注意的是，当速度超过120 km/h时，3.5 GHz场景下VoNR业务因多普勒扩展加剧出现零星丢包，故高频段高速场景需结合波束跟踪与更精细的时域更新机制来保障时敏业务的质量。

3.2 多激活BWP下的PDSCH RBG随机分配仿真结果

现网中通常仅TDD网络配置多激活BWP，故仿真仅针对TDD网络多激活BWP场景展开。每TDD小区配置3个BWP：BWP 1承载15个FTP用户（273个PRB），BWP 2承载10个VoNR用户（在273个PRB与52个PRB间切换），BWP 3承载10个FTP用户（106个PRB）。图7仿真结果表明，与单激活BWP场景类似，相对于传统的Type 0机制，小区平均吞吐量提升7.1%，含FTP用户的BWP 1与BWP 3边缘性能显著改善，分别为26.7%和34.7%，而BWP 2因承载VoNR用户几乎无变化。

3.3 理论性能边界验证

3.3.1 定理1 RBG冲突概率验证

通过仿真统计不同负载条件下相邻小区的RBG冲突次数，验证定理1的预测。在仿真中我们固定 $M=100$ 个RBG，变化每小区分配RBG数 $K=5,10,15,20,25$ ，统计 10^5 个时隙的冲突频率。图8仿真结果表明冲突概率与理论值 $(K/M)^2$ 的相对误差小于9%，验证了随机化分配的有效性。实际冲突概率高于理论值的原因有实际调度非完全随机，存在由约束而导致的调度开销，资源分配信息非瞬时同步导致的信令延迟以及信道估计不完美导致的测量误差。在高负载条件下，每小区占用RBG比例升高导致冲突概率显著增加，随机化空间受限，干扰抑制收益递减，同时资源碎片化加剧可能反而损害频谱效率，故高负载场景下的性能边界需进一步评估。

3.3.2 定理2 最优负载因子验证

通过仿真在TDD 100 MHz配置下（ $M=273$ 个RBG），变化每小区用户数（等效变化 K ），测量小区平均吞吐量。图9的仿真结果表明当 $K/M \approx 1/N$ （ $N=21$ 小区）即 $K \approx 13$ 时，系统达到吞吐量峰值，与理论预测 $K^* \approx M/N$ 一致。系统过载时吞吐量下降，验证了理论边界，即存在使和容量最大化的最优负载 K^* 。

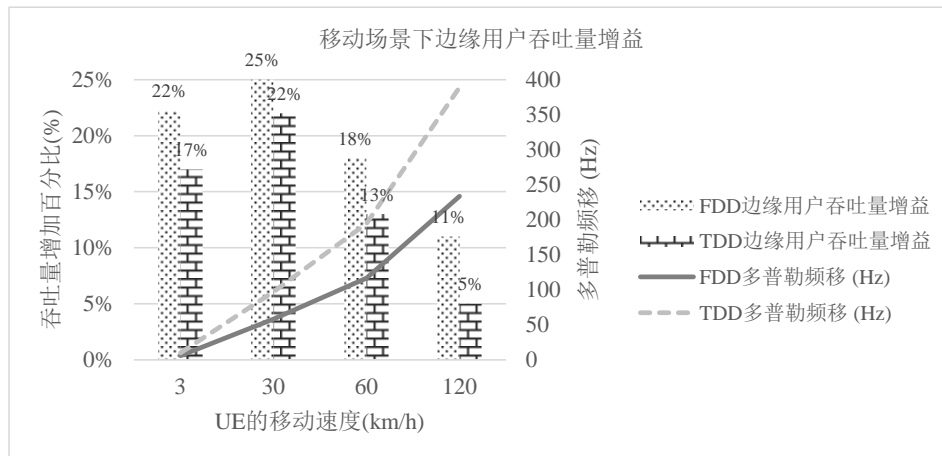


图6 移动场景下边缘用户吞吐量增益仿真结果

Fig.6 The simulation results of edge user throughput gain in mobility scenarios

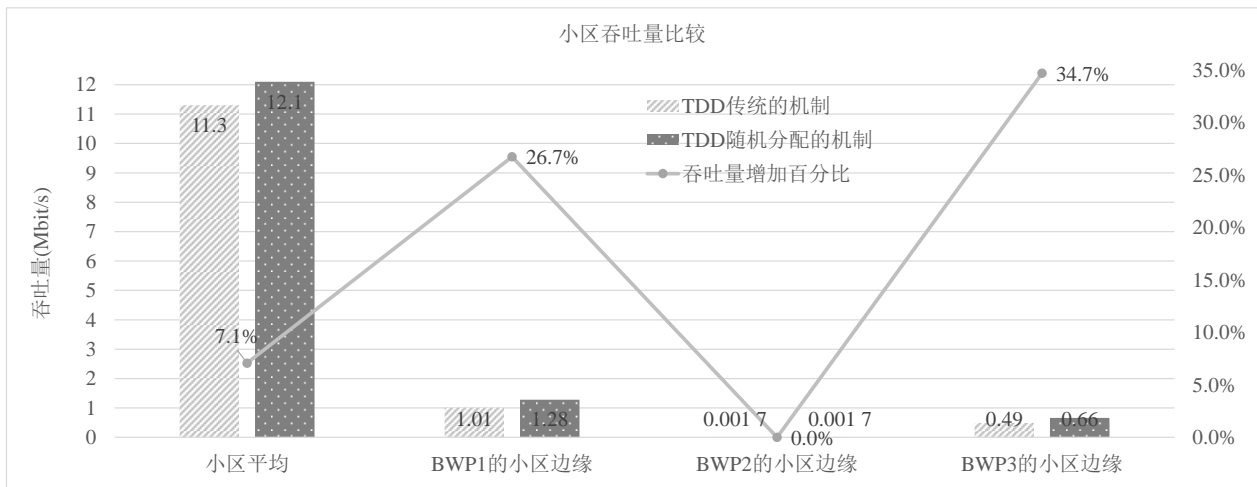


图7 多激活BWP下的PDSCH RBG随机分配仿真结果

Fig.7 The simulation results of randomized RBG allocation for PDSCH with multiple active BWPs

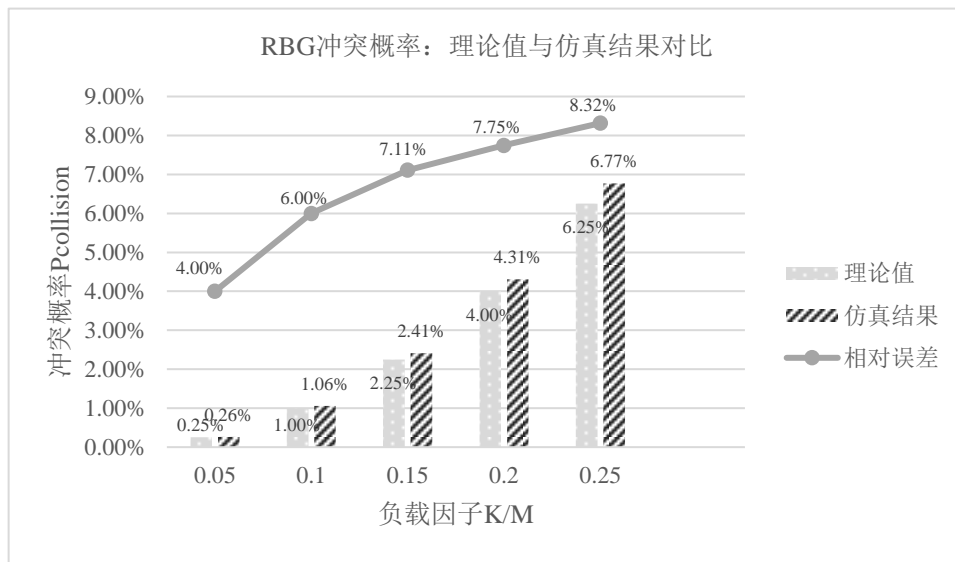


图8 RBG冲突概率仿真结果

Fig.8 The simulation results of RBG collision probability

这一拟凹函数特性可从两个竞争性效应解释：当 $K < K^*$ 时，每小区分配RBG数不足，频谱资源利用率低，系统处于“资源受限”状态，此时增加 K 可提升并行传输的数据量，吞吐量随 K 增加而上升；当 $K > K^*$ 时，各小区占用RBG比例过高，RBG冲突概率显著增加（由定理1， $P_{collision} \propto (K/M)^2$ ），小区间干扰成为主导因素，系统转入“干扰受限”状态，此时继续增加 K 反而导致SINR恶化，吞吐量随 K 增加而下降。 $K^* \approx M/N$ 恰

为资源利用效率与干扰抑制之间的最优平衡点，此时每小区平均占用 $1/N$ 的系统资源，既充分利用频谱，又将冲突概率控制在可接受水平。该仿真结果与定理2中最优负载的结论一致，为实际网络部署中负载门限的设置提供了理论依据。

4 结束语

本文针对5G网络小区间同频干扰及信道条件快速变化导致的系统吞吐量下降问题，提出了



最优负载验证：和容量随RBG分配数变化曲线

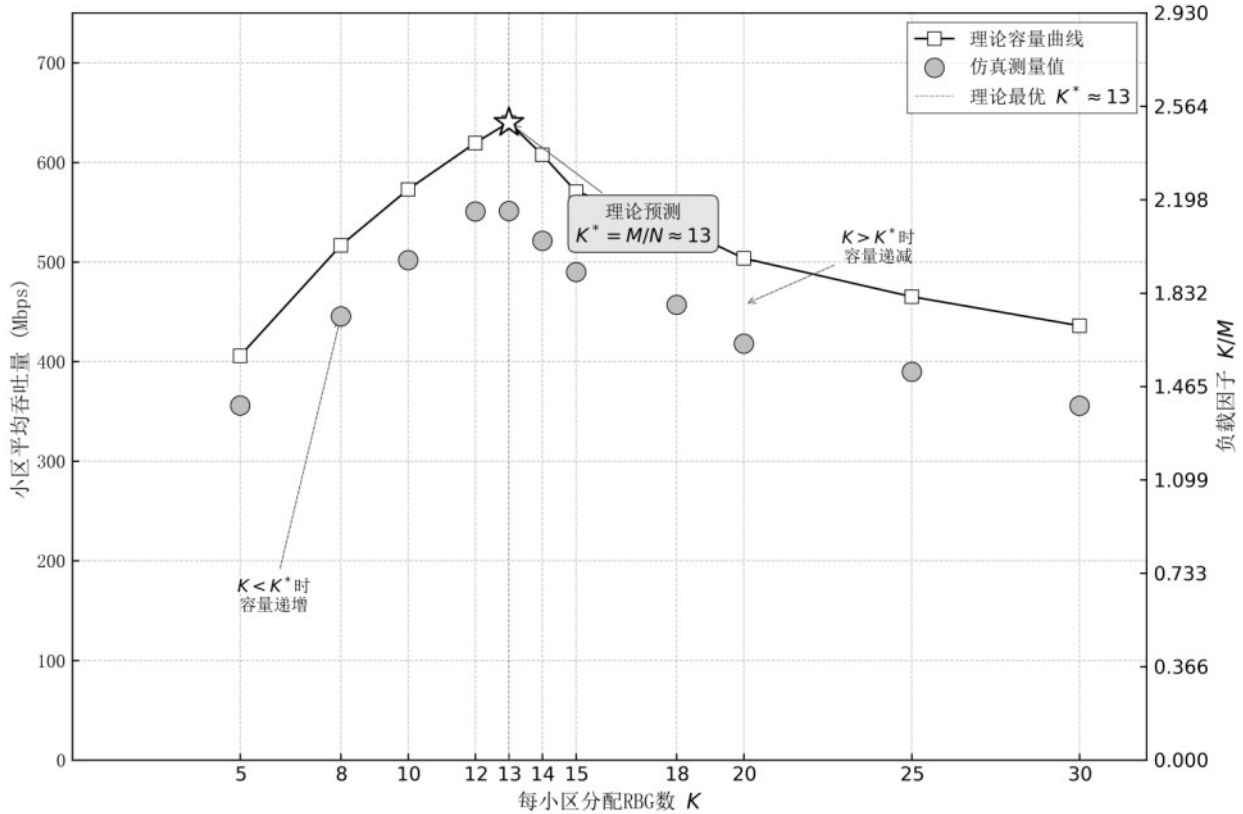


图9 RBG最优负载因子仿真结果

Fig.9 The simulation results of the most optimized RBG load factor

基于PDSCH的RBG随机化分配方案。主要贡献包括：(1) 设计了RBG随机索引生成机制，建立了基于质数散列的伪随机置换模型，并从信息论和概率论角度证明了其均匀性及最优负载的存在性；(2) 给出了单激活BWP与多激活BWP两种场景下的具体实现方案，以FDD 5 MHz系统为例验证了方案的可行性；(3) 构建了包含21个小区的大规模系统级仿真平台，评估结果表明：在中低负载条件下，相对于传统的Type 0机制，随机化分配方案能使小区平均吞吐量提升4%，且边缘用户吞吐量提升显著，达到16%以上，其中FTP业务获益明显而VoNR业务性能保持稳定。

未来研究工作可从以下三个方向展开：(1) 引入深度学习算法实现用户行为预测与网络负载的智能感知，进一步优化PDSCH资源调度策略；

(2) 结合波束赋形优化与高精度波束跟踪技术，提升动态信道环境下的传输可靠性；(3) 基于随机矩阵理论开展渐近性能分析，推导大规模MIMO场景下的容量闭合表达式，完善理论框架。

参考文献：

- [1] 高德金. 基于5G网络的无线通信资源分配技术的应用[J]. 数字技术与应用, 2023, 41(1): 40-42.
GAO D J. Application of wireless communication resource allocation technology based on 5G network[J]. Digital Technology and Application, 2023, 41(1): 40-42.
- [2] 3GPP. NR; Physical layer; General description: TS 38.201[S]. 2025.
- [3] 李姣军, 左迅, 喻涛, 等. 面向软件无线电的物理下行共享信道优化与实现[J]. 电讯技术, 2024, 64(5): 765-771.
LI J J, ZUO X, YU T, et al. Optimization and implementation

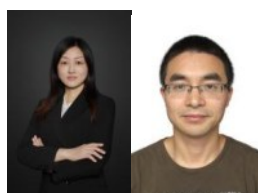
- of physical downlink shared channel for software defined radio [J]. *Telecommunication Engineering*, 2024, 64(5): 765-771.
- [4] 徐俊, 袁弋非. 5G-NR 信道编码[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2019: 17-29.
XU J, YUAN Y F. 5G-NR channel coding[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2019: 17-29.
- [5] 陈惠敏, 裴大容, 刘帅. 基于跨层编码加性复用机制的 5G 信号带宽优化传输算法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2018, 32(7): 157-164.
CHEN H M, PEI D R, LIU S. 5G signal bandwidth optimization transmission algorithm based on cross-layer coding additive multiplexing mechanism[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2018, 32(7): 157-164.
- [6] 杨佳仪, 王千帆, 毕胜, 等. 基于 5G LDPC 码的增强耦合编码及 HARQ 设计[J]. *移动通信*, 2025, 49(2): 58-64.
YANG J Y, WANG Q F, BI S, et al. Design of enhanced concatenated coding and HARQ based on 5G LDPC codes[J]. *Mobile Communications*, 2025, 49(2): 58-64.
- [7] 戈立军, 郭徽, 李月, 等. 大规模 MIMO 系统稀疏度自适应信道估计算法[J]. *通信学报*, 2017, 38(12): 57-62.
GE L J, GUO H, LI Y, et al. Sparsity adaptive channel estimation algorithm for massive MIMO systems[J]. *Journal on Communications*, 2017, 38(12): 57-62.
- [8] 邱友静, 徐勇军, 唐鹏. RIS 辅助反向散射通信信道估计与相移优化算法[J]. *聊城大学学报(自然科学版)*, 2026, 39(02): 217-223.
QIU Y J, XU Y J, TANG P. Channel estimation and phase-shift optimization for RIS-assisted backscatter communication[J]. *Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition)*, 2026, 39(2): 217-223.
- [9] 徐勇军, 田秦语, 陈前斌, 等. RIS 辅助认知反向散射通信网络吞吐量最大化算法[J]. *中国科学: 信息科学*, 2024, 54(08): 1970-1982.
Xu Y J, Tian Q Y, Chen Q B, et al. Throughput maximization algorithm for RIS-aided cognitive backscatter communication networks[J]. *Sci Sin Inform*, 2024, 54: 1970 - 1982.
- [10] 黄盛. 两用户非正交多址接入的最优时延均衡和功率控制方法[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(8): 1902-1909.
HUANG S. Optimal delay equalization and power control method for two-user non-orthogonal multiple access[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(8): 1902-1909.
- [11] 3GPP. NR; Physical layer procedures for data: TS 38.214[S]. 2025.
- [12] 3GPP. NR; Physical channels and modulation: TS 38.211[S]. 2025.
- [13] 仇剑书, 朱子园, 师瑜. 5G 轻量化方法及实现路径研究[J]. *电信科学*, 2024, 40(10): 116-123.
QIU J S, ZHU Z Y, SHI Y. Research on 5G lightweight method and implementation path[J]. *Telecommunications Science*, 2024, 40(10): 116-123.
- [14] 3GPP. NR; Medium Access Control (MAC) protocol specification: TS 38.321[S]. 2025.
- [15] DEMIR O T, BJÖRNSON E, SANGUINETTI L. Cell-free massive MIMO with multi-antenna users under power control and coverage constraints[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2024, 42(12): 3412-3427.
- [16] 匡继昌. 常用不等式[M]. 第 5 版. 济南: 山东科学技术出版社, 2021: 78-85.
KUANG J H. Common inequalities[M]. 5th ed. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 2021: 78-85.
- [17] 华惊宇, 杨乐, 闻建刚, 等. 通用滤波多载波系统原型滤波器的连续凸近似优化设计方法[J]. *电子与信息学报*, 2025, 47(10): 3793-3803.
HUA J Y, YANG L, WEN J G, et al. Continuous convex approximation optimization design method of prototype filter for generalized frequency division multiplexing systems[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2025, 47(10): 3793-3803.
- [18] 3GPP. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz: TR 38.901[S]. 2025.
- [19] 张新超, 李荣琳. VoNR 无线优化策略研究[J]. *电信科学*, 2022, 38(9): 177-186.
ZHANG X C, LI R L. Research on VoNR wireless optimization strategy[J]. *Telecommunications Science*, 2022, 38(9): 177-186.
- [20] 3GPP. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Further advancements for E-UTRA physical layer aspects: TR 36.814 [S]. 2017.

[作者简介]



求钦龙 (1978-), 男, 浙江绍兴人, 高级工程师, 浙江大学计算机专业博士, 绍兴职业技术学院信息工程学院副院长。研究方向: 通信系统性能优化、网络容量规划及高精度定位技术。E-mail: qiuql@sxvtc.edu.cn

李文娟 (1978-), 女, 浙江杭州人, 副教授, 浙江大学计算机专业博士。研究方向: AI 支持的云边



协同计算、可信计算及算网优化。E-mail: liwenjuan@hznu.edu.cn

张启飞（1984-）,男，浙江宁波人，副研究员，浙江大学计算机专业博士。研究方向：视觉语音计



算及情感计算。E-mail: cstzhangqf@zju.edu.cn