基于EWFRFT变换域的物联网细粒度资源分配方法

沙学军[1, 2]，夏文卓[1, 2]，王鼎[1, 2]

（1. 哈尔滨工业大学电子与信息工程学院，黑龙江 哈尔滨 150000；2. 哈尔滨工业大学通信技术研究所，黑龙江 哈尔滨 150000）

摘 要： 针对 5G 新空口（NR， new radio）中大规模机器类通信（mMTC， massive machine-type communications）场景下物联网小包业务与物理资源块（PRB， physical resource block）承载容量不匹配导致的频谱资源浪费问题，提出了一种基于扩展加权分数阶傅里叶变换（EWFRFT， extended weighted fractional Fourier transform）的物联网细粒度资源分配方法。该方法将用户的调制符号映射至所分配的子载波位置后执行 EWFRFT 变换，将频域信号扩展至整个 PRB 传输，利用 EWFRFT 的酉变换特性保持不同用户因占用不同子载波而天然正交的关系，接收端通过反变换实现用户间信号的无干扰分离，且与现有 5G NR 空口协议保持兼容。在此基础上，设计了基于最佳适应递减（BFD， best-fit decreasing）装箱算法的碎片资源管理机制和基于最早截止时间优先（EDF， earliest deadline first）、最小需求优先（SDF， smallest demand first）和加权优先级三种策略的单时隙调度算法。在均匀到达和突发到达两种 3GPP 标准流量模型下的仿真结果表明，相比传统 PRB 级分配方案，所提方法在频谱资源利用率和接入时延两方面均具有显著的性能优势；三种调度策略在不同到达特性下表现出差异化的适用性。

关键词： 物联网；扩展加权分数阶傅里叶变换；细粒度资源分配；mMTC；5G 新空口；调度算法

中图分类号： TN915

文献标志码： A

doi： 10.11959/j.issn.2096−3750.WLW26091

Fine-grained resource allocation method for IoT based on EWFRFT domain

SHA Xuejun[1,2], XIA Wenzhuo[1,2], WANG Ding[1,2]

1. School of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150000, China

2. Communication Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150000, China

Abstract: To address the spectrum waste caused by the mismatch between small-packet IoT services and physical resource block (PRB) capacity in the massive machine-type communications (mMTC) scenario of 5G new radio (NR), a fine-grained resource allocation method based on the extended weighted fractional Fourier transform (EWFRFT) was proposed. In the proposed method, modulation symbols of each user were mapped to the assigned subcarrier positions and then processed by EWFRFT to spread the frequency-domain signal over the entire PRB for transmission. The unitary property of EWFRFT preserves the orthogonality naturally arising from different users occupying different subcarriers, enabling interference-free multi-user signal separation at the receiver via inverse transform while maintaining compatibility with the existing 5G NR air interface protocol. On this basis, a fragment resource management mechanism based on the best-fit decreasing (BFD) bin-packing algorithm and a single-slot scheduling algorithm supporting three priority strategies—earliest deadline first (EDF), smallest demand first (SDF), and weighted priority—were designed. Simulation re-

收稿日期： XXXX−XX−XX；**修回日期：** XXXX−XX−XX

通信作者： 沙学军，shaxuejun@hit.edu.cn

基金项目： 国家自然科学基金区域联合重点项目（No. U23A20278）

Foundation Items: The Regional Joint Key Project of the National Natural Science Foundation of China (No. U23A20278)

sults under two 3GPP standard traffic models, namely uniform arrival and bursty arrival, show that the proposed method achieves significant performance advantages over the conventional PRB-level allocation scheme in terms of both spectrum utilization and access delay; moreover, the three scheduling strategies exhibit differentiated applicability under different arrival characteristics.

Key words: internet of things, extended weighted fractional Fourier transform, fine-grained resource allocation, mMTC, 5G new radio, scheduling algorithm

0　引言

第五代移动通信系统的mMTC场景要求在每平方公里内支持百万级设备的连接，这对无线资源分配机制提出了严峻挑战[1]。在5G NR标准中，PRB是资源调度的基本单位，每个PRB包含12个子载波[2]。传统资源分配策略以PRB为粒度进行分配，即每个用户设备必须占用整个PRB[3]。然而，物联网设备通常具有数据包小、传输频次高等特点，单次传输的数据量往往小于一个PRB的承载容量，系统需为其分配完整PRB，导致该PRB中大部分子载波实际处于空闲状态，造成频谱资源的严重浪费。根据3GPP TS 38.212标准[4]，当物联网设备的业务数据量小于分配PRB的承载容量时，系统通过速率匹配中的重复机制将编码比特循环填充至分配的全部资源单元。这种机制虽然提高了传输可靠性，但大量频谱资源被用于承载冗余信息，而非为更多设备提供接入机会，降低了系统级频谱利用效率。

物联网的快速发展推动了智慧城市、工业物联网、智能交通等应用场景的落地，频谱资源紧缺已成为制约物联网规模化部署的重要瓶颈。针对物联网资源分配效率问题，现有研究大致可归纳为四类。第一类聚焦PRB级资源调度算法的优化，文献[5]提出了基于加权最小均方误差的连续资源调度算法，解决了多用户MIMO传输中的空间域耦合问题；面向mMTC海量接入需求，文献[6]从设备激活检测、信道估计与可达速率等角度系统梳理了海量接入的理论框架与挑战，文献[7]进一步展望了未来无线系统的海量接入需求，文献[8]提出了基于聚类的大规模设备接入算法。第二类引入非正交多址接入以突破正交资源数对接入容量的限制，文献[9]允许多用户在功率域共享相同资源块以提升频谱效率，文献[10]综述了NOMA在5G网络中的研究进展与未来趋势；在码域，稀疏码多址接入通过稀疏码本使多用户共享同一组时频资源[11-12]，文献[13]针对上行免授权场景设计了联合信道估计与数据检测的接收机。第三类围绕免授权随机接入展开，文献[14]提出了队列感知的联合接入控制方案，文献[15]从稀疏信号处理角度提出了面向物联网免授权海量连接的随机接入新范式，文献[16]对面向物联网的免授权非正交多址技术进行了综述。文献[17]进一步面向宽带OFDM系统，研究了频率选择性衰落条件下海量免授权接入中的设备活跃检测问题。第四类以窄带物联网（NB-IoT）为代表，通过资源单元将上行分配粒度细化至单音或多音子载波级别，文献[18]指出对所有设备采用相同资源单元会造成资源浪费并据此设计了自适应选择算法，文献[19]对NB-IoT的无线资源调度性能进行了系统评估。文献[20]进一步针对NB-IoT中的控制信道资源约束研究了偏移感知资源分配方法。

然而，上述研究仍存在局限：PRB级调度优化、非正交多址接入和免授权随机接入分别从调度策略、资源复用及接入机制等方面提高系统性能，但这些机制本身并不直接消除小包资源需求按完整PRB分配时产生的取整开销。其中，功率域NOMA通过不同用户信号在相同时频资源上的非正交叠加实现资源复用，其性能与用户分组、功率分配及接收端干扰消除密切相关[9-10]。本文关注的则是通过合并不同用户的碎片资源需求，减少小包业务按完整RB分配时的资源浪费，两者的资源利用效率提升机制有所不同。NB-IoT通过单音或多音资源单元实现细粒度分配，其资源单元由子载波数量与传输时长共同确定；本文则面向NR资源块结构，通过合并不同用户的小包碎片需求，实现同一时隙内的RB共享。两者在资源单元结构及调度与控制机制上存在差异，直接进行数值比较需要进一步统一带宽、传输时长及业务条件。因此，如何在保留NR资源块结构及主要物理层处理流程的基础上，通过资源映射与分配信令的扩展，实现PRB

内面向小包业务的细粒度资源共享，是本文关注的问题。此外，由于PRB级分配粒度的限制，当待服务设备数量超过可用PRB数量时，部分设备必须排队等待后续时隙的调度，导致接入时延增加。

针对上述问题，本文引入EWFRFT作为资源映射中的变换域预处理。EWFRFT具有灵活的变换参数设计能力，通过适当的参数配置可将原本集中在部分子载波上的信号能量扩展至整个RB[22-23]。其酉性能够保持变换前用户信号之间的正交关系，为不同用户共享同一RB提供理论基础。在RB内平坦衰落及理想同步条件下，接收端可通过反变换和用户信道均衡实现用户分离，无需采用串行干扰消除。由此，本文在保留NR资源块结构的基础上，通过细化变换前的资源分配粒度，为不同用户的小包碎片需求提供共享传输的方式。

本文提出基于EWFRFT变换域的物联网细粒度资源分配方法。该方法将用户的子载波需求映射到EWFRFT变换域，使不同用户共同使用同一PRB内的所有子载波，经变换后信号在整个PRB上叠加传输，接收端通过反变换实现多用户信号的无干扰分离。通过子载波级别的资源复用，本方法在相同频谱资源条件下能够接入更多物联网设备，显著提升频谱利用率和系统容量。同时，单时隙设备服务能力的提升也有效降低了调度排队时延。为验证所提方法的有效性，后文以传统5G NR的RB级资源分配方案作为对比基线，在均匀到达和突发到达场景下，对每时隙成功服务用户数、平均等待时延和超时率等性能进行对比分析，并进一步比较EDF、SDF和加权优先级三种调度策略的性能差异。

1　基于EWFRFT的物联网资源分配模型

在5G NR系统中，PRB是无线资源调度的基本单位。根据3GPP TS 38.211标准，每个PRB在频域上包含$N = 12$个连续子载波。本文研究的资源块均指物理资源块，不涉及虚拟资源块等其他类型的资源块，为简化表述，后文统一采用RB（resource block）表示PRB。图1展示了5G NR RB的时频结构。传统5G NR以完整RB为最小分配粒度，导致数据量远小于RB承载容量的物联网小包业务存在严重的子载波级频谱资源浪费。

本文提出的资源分配方法以EWFRFT作为变换域预处理模块，在保持与现有5G NR空口协议及RB结构兼容的前提下，突破了传统"一个用户独占一个RB"的分配模式。具体而言，每个用户仅占用同一RB内的部分子载波，将调制符号映射至所分配的子载波位置后，经EWFRFT变换即可将该用户的频域信号扩展至整个RB的所有子载波上；因此，基站根据各用户的实际数据量需求，在同一RB内为不同用户分配不同数量的子载波，每个用户将调制符号映射到所分配的子载波位置，未分配的子载波位置填充零值，随后通过EWFRFT变换将频域信号扩展至整个RB的时频资源上。在EWFRFT变换前，不同用户占用互不重叠的子载波集合，因此其频域信号天然正交；经过EWFRFT变换后，各用户信号扩展至整个RB进行传输，而EWFRFT的酉性保证了用户信号间正交关系不变。多个用户变换后的信号在空口叠加，形成符合5G NR标准的完整RB信号。这一机制使得单个RB能够同时服务多个物联网设备，在提升频谱利用率的同时，也增强了系统单时隙的设备服务能力，从而有效降低调度排队时延。

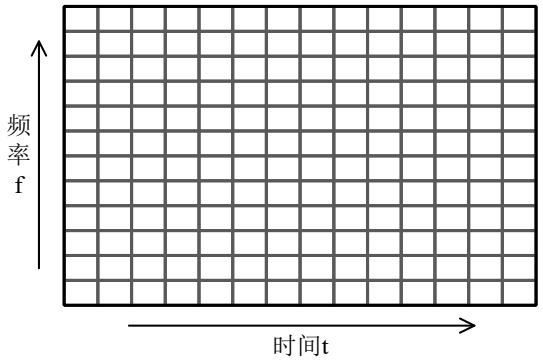


图1　5G NR RB时频结构示意图

图2展示了基于EWFRFT的资源分配原理。在频域子载波分配阶段，用户1和用户2分别被分配同一RB内的3个和7个子载波，另有2个子载波空余；经EWFRFT变换后，各用户原本集中在部分子载波上的信号能量被扩展至整个RB，即每个用户变换后的信号都占用完整的RB进行传输；随后，这些变换后的信号在空口叠加传输。相比之下，若采用传统RB级分配方式，上述两个用户需各自独占1个完整RB，共计消耗2个RB，资源浪费更为显著。

加权分数阶傅里叶变换（WFRFT, weighted fractional Fourier transform）是传统傅里叶变换的

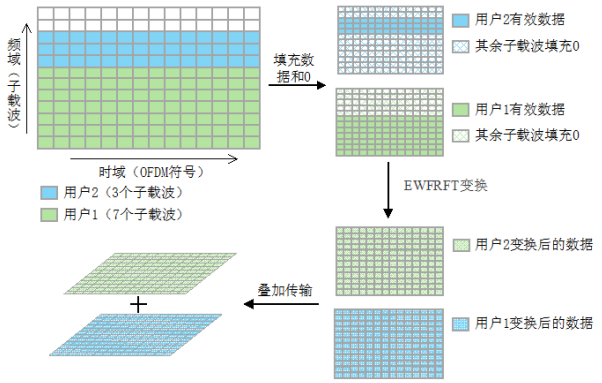


图2　基于EWFRFT的物联网资源分配原理示意图

推广形式，通过对不同阶次的离散傅里叶变换进行加权叠加，实现了信号在时域和频域之间的灵活融合处理[23]。该变换最早被引入通信系统用于实现单载波与多载波体制的融合[24-25]，其在时频平面上均匀的信号能量分布使系统在双选信道下具有良好的鲁棒性，并已在抗窄带干扰[26]、物理层安全[27]、波形预编码[28]等方面得到广泛应用。对于长度为N的复数序列$\mathbf{x}$，其α阶WFRFT可以表示为

$$\mathbf{F}^{\alpha}[\mathbf{x}]=\sum_{l=0}^{3}\omega_l(\alpha)\mathbf{F}^{l}[\mathbf{x}] \tag{1}$$

其中权重系数$\omega_l(\alpha)$的定义见文献[23]。WFRFT具有酉性（$[\mathbf{F}^{\alpha}]^{H}\mathbf{F}^{\alpha}=\mathbf{I}$）和可加性（$\mathbf{F}^{\alpha+\beta}=\mathbf{F}^{\alpha}\mathbf{F}^{\beta}$）等重要性质。然而，其四分量结构限制了信号能量分布的设计灵活性。为获得更高的设计自由度，Song等人提出了扩展加权分数阶傅里叶变换（EWFRFT），将分量数从4个扩展至N个[22-23, 29]。根据文献[22]，对于N点EWFRFT，其变换矩阵$\mathbf{F}_E$的第(m,n)个元素定义为

$$[\mathbf{F}_E]_{m,n}=\frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1}\exp\left(j\left(\beta_k-\frac{2\pi k(n-m)}{N}\right)\right) \tag{2}$$

其中β_k是第k个变换参数，j为虚数单位。EWFRFT的核心性质在于其变换矩阵满足酉性条件

$$\mathbf{F}_E\mathbf{F}_E^{H}=\mathbf{I} \tag{3}$$

其中$\mathbf{F}_E^{H}$表示$\mathbf{F}_E$的共轭转置，$\mathbf{I}$为单位矩阵。酉性条件保证了变换的可逆性和信号能量的守恒，这是实现无损信号传输的数学基础。

EWFRFT的另一关键性质是正交性保持，文献[22]对此进行了详细的推导与证明。这一性质是实现多用户信号无干扰分离的理论依据。设用户i占用子载波集合$\mathcal{C}_i$，用户j占用子载波集合$\mathcal{C}_j$，两个用户占用的子载波不重叠，即$\mathcal{C}_i\cap\mathcal{C}_j=\varnothing$。用户$i$的频域信号$\mathbf{s}_i$仅在$\mathcal{C}_i$对应的子载波位置有非零值，其余位置填充零值；用户$j$的频域信号$\mathbf{s}_j$同理。经过EWFRFT变换后，用户信号分别表示为$\mathbf{x}_i=\mathbf{F}_E\mathbf{s}_i$和$\mathbf{x}_j=\mathbf{F}_E\mathbf{s}_j$。由于EWFRFT是酉变换，内积运算在变换前后保持不变：

$$<\mathbf{x}_i,\mathbf{x}_j>=<\mathbf{F}_E\mathbf{s}_i,\mathbf{F}_E\mathbf{s}_j>=<\mathbf{s}_i,\mathbf{s}_j> \tag{4}$$

当用户在频域占用不同子载波时，其频域信号在所有子载波位置上的对应元素乘积之和为零，即$<\mathbf{s}_i,\mathbf{s}_j>=0$，因此变换后$<\mathbf{x}_i,\mathbf{x}_j>=0$。这一结果的物理意义在于：即使多用户信号经过EWFRFT变换后各自扩展至整个RB并在空口叠加，它们在变换域中仍保持相互正交，接收端通过反变换即可将各用户信号准确分离而不产生用户间干扰。

为实现信号能量在时频平面的均匀分布，本文采用满足等增益准则的参数设计方法[23]。设$L=\log_2 N$，$\zeta=\lfloor L/2\rfloor$，$\varphi=\lfloor\log_2 k\rfloor$，$\psi=\dfrac{\pi}{2}<L>_2\left\lfloor\dfrac{1}{\varphi-\zeta+1}\right\rfloor$，参数$\beta_k$的生成遵循：

$$\beta_k=\begin{cases}\mu_k\in(0,2\pi], & 0\leqslant k\leqslant 2^{\zeta}-1\\ \beta_{k-2^{\varphi}}-\dfrac{k-2^{\varphi}}{2^{L-1-\varphi}}\pi-\psi, & 2^{\zeta}\leqslant k\leqslant N-1\end{cases} \tag{5}$$

这种递推式的参数生成方法保证了变换矩阵的酉性，同时使变换后的信号功率在各基向量上均匀分布。相应地，逆变换参数设置为$\overline{\beta}_k=-\beta_k$，接收端可通过简单改变参数符号构造逆变换矩阵$\mathbf{F}_E^{H}$，实现对原始频域信号的准确恢复。

基于上述EWFRFT变换理论，本文设计了物联网设备与基站之间的收发信机系统实现方案。本文考虑设备静止或低速移动的工业物联网场景，并假设用户间时间与频率同步理想，各用户信道在单个RB带宽内满足平坦衰落条件，且在一个调度时隙内保持不变；不同用户的信道增益可以不同。本文主要研究资源分配与调度性能，将给定调制编码配置及传输可靠性要求下的单子载波承载能力作为资源需求计算的依据。在频率选择性衰落、信道估计误差等非理想条件下，用户信号的分离与恢复性能可能受到影响，需要进一步考虑信道估计和均衡处理。本文基于子载波需求进行资源分配与调度的思路仍可沿用，非理想信道下的接收处理及系统性能评估将作为后续工作进一步研究。

图3展示了基于EWFRFT的物联网收发端处理

流程框图，整体由发送端处理、空口传输和接收端处理三部分构成。

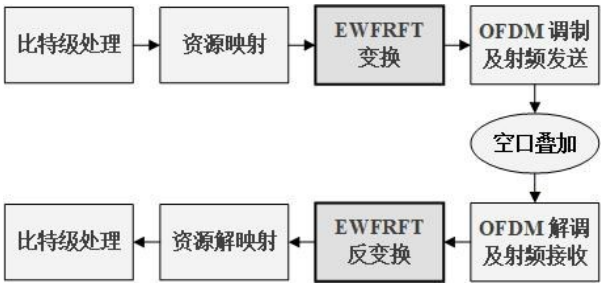


图3　基于EWFRFT的物联网收发端处理流程框图

在发送端，物联网设备接收基站下发的资源分配信息和EWFRFT变换参数后，按以下流程进行信号处理。上层业务数据首先经过CRC附加、信道编码、速率匹配和加扰等比特级处理，随后通过调制映射将比特信息转换为复数符号，这些步骤与标准5G NR物理层流程完全一致。资源映射环节是本方案的关键改进之处：设备根据分配信息将调制符号映射到所分配的子载波位置，构建$N=12$维的频域信号向量$\mathbf{s}_i$，在分配的子载波位置$k\in\mathcal{C}[i,r]$映射调制符号$d_i[m]$，在未分配的子载波位置填充零值，确保信号向量维度与RB子载波数保持一致。频域信号向量的构建可表示为

$$[\mathbf{s}_i]_k=\begin{cases}d_i[m], & k\in\mathcal{C}[i,r]\\ 0, & k\notin\mathcal{C}[i,r]\end{cases} \tag{6}$$

其中$\mathcal{C}[i,r]$为用户i在资源块r中分配到的子载波索引集合。随后对频域信号向量执行EWFRFT变换

$$\mathbf{x}_i=\mathbf{F}_E\cdot\mathbf{s}_i \tag{7}$$

经过变换后，原本集中在部分子载波上的信号能量被扩展至整个RB的时频资源上，即每个用户变换后的信号x_i占用完整的RB进行传输。从系统角度看，变换后的信号符合现有5G NR的资源块定义。变换后的信号通过IFFT生成时域信号，插入循环前缀以对抗多径衰落影响，经数字滤波和射频处理后发送至天线。对于同一RB内的多个用户，由于各用户在频域占用不同的子载波集合，变换后各用户的信号在空口叠加传输，形成该RB的总发送信号。

在接收端，基站接收来自多个用户在空口叠加后的信号，经射频前端处理、模数转换和去除循环前缀，再通过FFT变换得到变换域信号。对于每个RB，基站根据预存的变换参数执行EWFRFT反变换

$$\hat{\mathbf{s}}=\mathbf{F}_E^H\cdot\mathbf{y} \tag{8}$$

其中，$\mathbf{y}$为接收叠加信号，$\hat{\mathbf{s}}$为反变换输出。在前述RB内平坦衰落及理想同步假设下，设共享该RB的用户集合为$\mathcal{U}_r$，用户i的信道增益为h_i，则

$$\mathbf{y}=\sum_{i\in\mathcal{U}_r}h_i\mathbf{F}_E\mathbf{s}_i+\mathbf{n},\ \hat{\mathbf{s}}=\mathbf{F}_E^H\mathbf{y}=\sum_{i\in\mathcal{U}_r}h_i\mathbf{s}_i+\mathbf{F}_E^H\mathbf{n} \tag{9}$$

其中，$\mathbf{n}$为接收噪声。由于不同用户的$\mathbf{s}_i$仅在各自分配的位置具有非零值，反变换后各用户数据仍位于互不重叠的位置，因此不同用户的信道增益不会引入用户间干扰。基站按分配位置提取各用户数据，再根据各用户的信道估计进行均衡，最后经解调、解扰、信道解码和CRC校验恢复业务数据。

基于EWFRFT变换域预处理的细粒度资源分配方法在保持与5G NR标准高度兼容的同时，仅需对现有协议进行最小化扩展即可实现部署。从空口协议角度，尽管多个用户在物理上共享同一RB的不同子载波，但经EWFRFT变换后每个用户的信号均占用完整RB，从系统层面看不改变RB作为资源调度基本单位的定义。由于本方案仅改变物理层的资源映射方式，不改变上层数据处理流程，因此缓冲状态报告（BSR）机制、PDCP、SDAP及核心网功能无需修改，移动性管理等高层功能同样保持不变。从物理层处理角度，本方案仅在发送端资源映射后增加EWFRFT变换模块、接收端FFT后增加反变换模块，其他包括信道编码、速率匹配、调制、IFFT、循环前缀插入在内的所有处理模块完全遵循3GPP TS 38.211和TS 38.212标准规范，具有良好的兼容性。

EWFRFT变换参数具有小区级统一性和长期稳定性的特点，其本质上作为波形预编码矩阵与IDFT级联，将用户的频域子载波信号扩展至整个RB的时频资源，实现空口层面的RB级信号扩展。所有接入设备使用相同的变换参数，适合采用半静态配置方式，因此本方案涉及的协议扩展主要体现在信令传输层面，根据3GPP TS 38.331标准[30]，RRC Reconfiguration消息支持携带物理层配置参数，可在该消息中新增EWFRFT配置信息元素，包含EWFRFT变换参数生成规则及参数索引等字段；设备在初始接入或RRC连接重配置过程中获取变换参数后持续使用，无需频繁更新，使得信令开销被分摊到连接建立阶段而不影响数据传输时

延。每个时隙的子载波分配信息则需要通过下行控制信息（DCI）实时下发。在现有 5G NR 标准中，DCI 格式 0_0 和 0_1 的频域资源分配字段仅支持 RB 级别的资源指示；为支持子载波级分配，需要对 DCI 格式进行扩展，增加子载波位图字段用于指示 RB 内的具体子载波分配，以 12 子载波的 RB 为例，子载波位图需要 12 比特，相比传统 DCI 增加的开销在可接受范围内。需要指出的是，当前 3GPP Release 18 及之前版本的 DCI 格式中尚未预留子载波级分配字段，该功能的标准化需要在后续版本演进中推进。

2　资源分配优化与调度算法

物联网业务与传统移动宽带业务存在显著差异。典型物联网应用如环境监测、体域网、工业设备状态上报等，根据 3GPP TR 45.820 技术报告中蜂窝 IoT 业务流量模型的定义，单次传输的应用层数据量通常为数十至数百字节，但设备数量可达每平方公里百万级别，且对时延具有一定敏感性[31]。这种业务特征对无线资源分配方法提出了新的要求。

本文采用二元组 $(D_i, W_i^{\max})$ 描述用户 i 的业务特征，其中 D_i 表示数据包大小，$W_i^{\max}$ 表示最大容忍时延，即数据包从到达系统到完成传输所允许的最大等待时间，超过该约束未能完成传输的数据包将被视为超时。根据 3GPP TR 45.820 技术报告，物联网数据包大小服从截断 Pareto 分布，其概率密度函数为

$$f_D(x) = \frac{\alpha D_{\min}^{\alpha}}{1 - (D_{\min}/D_{\max})^{\alpha}} \cdot x^{-(\alpha+1)}, \quad x \in [D_{\min}, D_{\max}] \tag{10}$$

其中 $\alpha > 0$ 为形状参数，$D_{\min}$ 和 $D_{\max}$ 分别为数据包大小的下界和上界。Pareto 分布具有重尾特性，能够刻画物联网业务中大量小数据包与少量大数据包并存的现象。前文以资源需求小于一个 RB 的数据包为例说明多用户共享同一 RB 时的信号正交性，实际系统中用户的数据包资源需求既可能小于一个 RB，也可能超过一个 RB。

设单个子载波在一个时隙内的传输能力为 c 字节，则用户 i 所需的子载波数量为 $K_i = \lceil D_i/c \rceil$。由于每个 RB 包含 $N = 12$ 个子载波，当用户需求不是 N 的整数倍时，会产生碎片。将用户的子载波需求分解为完整 RB 需求与碎片子载波需求两部分：

$$K_i = \left\lfloor \frac{K_i}{N} \right\rfloor \cdot N + K_{i'} \tag{11}$$

$$K_{i'} = K_i \bmod N \tag{12}$$

其中 $\left\lfloor \frac{K_i}{N} \right\rfloor$ 为用户需要的完整 RB 数量，$K_i' \in \{0,1,...,N-1\}$ 表示碎片子载波需求。当 $K_i' = 0$ 时用户需求恰为 N 的整数倍，无碎片；当 $K_i' > 0$ 时存在碎片需求。在传统 5G NR 资源分配方式下，即使用户仅需 K_i' 个子载波，也必须为其分配一个完整 RB，造成 $N - K_i'$ 个子载波的浪费。这正是本文所提 EWFRFT 方案的优化空间所在。

物联网设备的业务到达特性对系统性能有重要影响。3GPP TR 37.868 针对机器类通信定义了两种典型流量模型[32]。流量模型 1 描述周期性上报场景，适用于智能抄表、环境监测等应用，N_{total} 个设备在周期 T 内均匀分散到达，单个设备到达时刻的概率密度函数为

$$f_1(t) = \frac{1}{T}, \quad 0 \leqslant t \leqslant T \tag{13}$$

流量模型 2 描述突发到达场景，适用于断电恢复、告警触发等应用，大量设备在短时间内集中激活。单个设备到达时刻服从 Beta 分布：

$$f_2(t) = \frac{t^{\alpha-1}(T-t)^{\beta-1}}{T^{\alpha+\beta-1}B(\alpha,\beta)}, \quad 0 \leqslant t \leqslant T \tag{14}$$

其中 $B(\alpha,\beta) = \dfrac{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}{\Gamma(\alpha+\beta)}$ 为 Beta 函数。3GPP 建议参数取值为 $\alpha = 3$、$\beta = 4$，此时分布峰值出现在 $t = 0.4T$ 附近。两种模型分别代表稳态运行和瞬态突发场景，本文将在这两种模型下验证所提方法的性能。

在传统 5G NR 方式下，用户 i 需占用 $R_i^{\text{trad}} = \lceil K_i/N \rceil$ 个完整 RB。当存在碎片需求 $K_i' > 0$ 时，资源利用率为

$$\eta_i = \frac{K_i}{\lceil K_i/N \rceil \cdot N} < 1 \tag{15}$$

特别地，当 $K_i = 1$ 时，$\eta_i = 1/12 \approx 8.3\%$，意味着超过 90% 的分配资源被浪费。本文所提 EWFRFT 方案将用户需求分为两部分处理：完整 RB 部分由用户独占，碎片部分通过装箱算法实现多用户子载波级共享。设时隙 t 的服务用户集合为 $\mathcal{S}_t$，存在碎片需求的用户集合为 $\mathcal{S}_{t'} = \{ i \in \mathcal{S}_t : K_{i'} > 0 \}$，则两种方案所需 RB 数分别为

$$R^{\mathrm{trad}}(\mathcal{S}_t)=\sum_{i\in\mathcal{S}_t}\lceil K_i/N\rceil \tag{16}$$

$$R^{\mathrm{EW}}(\mathcal{S}_t)=\sum_{i\in\mathcal{S}_t}\lfloor K_i/N\rfloor+R_{\mathrm{frag}}(\mathcal{S}_{t'}) \tag{17}$$

其中$R_{\mathrm{frag}}(\mathcal{S}_{t'})$为容纳集合$S_t'$中所有碎片需求所需的最少RB数。两者之差为

$$\Delta R=R^{\mathrm{trad}}(\mathcal{S}_t)-R^{\mathrm{EW}}(\mathcal{S}_t)=|\mathcal{S}_{t'}|-R_{\mathrm{frag}}(\mathcal{S}_{t'})\geqslant 0 \tag{18}$$

由于$R_{\mathrm{frag}}(\mathcal{S}_{t'})\leqslant|\mathcal{S}_{t'}|$，EWFRFT方案所需RB数不超过传统方案。由式(18)可知，节省的RB数为$\Delta R=|\mathcal{S}_{t'}|-R_{\mathrm{frag}}(\mathcal{S}_{t'})$。当碎片需求均满足$K_{i'}>\frac{N}{2}$时，每个RB至多容纳一个碎片，此时$R_{\mathrm{frag}}(S_{t'})=|S_{t'}|$，无法获得额外资源增益；当碎片需求较小时，多个碎片可共享同一RB，使$R_{\mathrm{frag}}(S_{t'})<|S_{t'}|$，当碎片用户较多且碎片需求较小时，通常具有更多的合并机会，资源节省效果更为显著。

在实际系统中，用户业务到达具有随机性，而系统每时隙的服务能力受限于可用频谱资源。当到达负载超过服务能力时，部分用户需要等待后续时隙调度。为描述这一动态过程，建立基于时隙的排队模型。系统维护等待队列$\mathcal{Q}_t$存储已到达但尚未服务的用户。在每个时隙t起始时刻，到达集合$\mathcal{A}_t$中的新用户加入队列，调度器从当前队列中选择用户进行服务，随后更新队列状态。

对于队列中用户i，定义等待时间$w_i(t)=t-t_i^{arr}$，其中t_i^{arr}为到达时隙。当$w_i(t)>W_i^{\max}$时用户发生超时，将被从队列中移除。设时隙t内服务用户集合为$\mathcal{S}_t$，超时用户集合为$\mathcal{O}_t=\{i\in\mathcal{Q}_t\cup\mathcal{A}_t:w_i(t)>W_i^{\max}\}$，则队列状态更新为

$$\mathcal{Q}_{t+1}=(\mathcal{Q}_t\cup\mathcal{A}_t)\setminus(\mathcal{S}_t\cup\mathcal{O}_t) \tag{19}$$

基于排队模型定义系统性能指标。设观测周期内共N_{total}个用户到达，N_{served}个成功服务，$N_{timeout}$个超时移除，则超时率为$P_{\mathrm{timeout}}=\frac{N_{\mathrm{timeout}}}{N_{\mathrm{total}}}$，平均等待时延为$\bar{W}=\frac{\sum_{i\in\mathcal{U}_{\mathrm{served}}}w_i}{N_{\mathrm{served}}}$。

基于上述模型，将每个时隙内的资源分配决策形式化为优化问题。调度器需在满足资源约束的前提下，从当前队列中选择一组用户进行服务。设时隙t开始时待调度用户集合为$\mathcal{Q}_t\cup\mathcal{A}_t$，需确定服务集合$\mathcal{S}_t$。本文考虑两种优化目标。

第一种是最大化服务用户数，旨在每时隙服务尽可能多的用户以降低队列长度和超时概率：

$$\max_{\mathcal{S}_t}|\mathcal{S}_t| \tag{20}$$

第二种是最小化平均等待时延，旨在使用户尽快完成传输：

$$\min_{\mathcal{S}_t}\frac{1}{|\mathcal{S}_t|}\sum_{i\in\mathcal{S}_t}w_i(t) \tag{21}$$

上述目标需满足资源约束。对于EWFRFT方式，约束条件为

$$\sum_{i\in\mathcal{S}_t}\lfloor K_i/N\rfloor+R_{\mathrm{frag}}(\mathcal{S}_{t'})\leqslant R \tag{22}$$

$$\mathcal{S}_t\subseteq\mathcal{Q}_t\cup\mathcal{A}_t \tag{23}$$

其中R为系统每时隙可用RB总数。此外，调度还需考虑紧急用户，即$w_i(t)=W_i^{\max}$的用户，若本时隙不服务则下一时隙将超时。定义紧急用户集合为$\mathcal{E}_t=\{i\in\mathcal{Q}_t\cup\mathcal{A}_t:w_i(t)=W_i^{\max}\}$，调度决策应尽可能将其纳入服务集合。

该问题本质上是组合优化问题，复杂度随候选用户数指数增长。在EWFRFT方式下，碎片资源装箱计算涉及NP-hard问题，求解更为复杂。因此采用贪心策略结合装箱算法获得近似解。

为此，本文设计两个相互配合的算法：算法1专门处理碎片资源的装箱问题，即在给定一组用户碎片子载波需求的条件下，求将所有碎片装入最少RB的方案，目标是最大化碎片部分的频谱利用率；算法2处理单时隙用户调度问题，即在每个时隙从等待队列中选择服务用户集合，在满足RB资源约束的前提下，根据不同优先级策略实现时延控制或接入能力最大化。算法2在每次尝试接纳新用户时调用算法1，以动态判断当前碎片需求是否满足资源约束。

碎片资源的装箱问题可描述为：给定一组碎片需求$K_i'\in\{1,2,...,N-1\}$，每个RB容量为N个子载波，求将所有碎片装入最少RB的方案。本文采用最佳适应递减（Best Fit Decreasing, BFD）算法，其近似比为$\frac{11}{9}OPT+\frac{6}{9}$[33]。具体流程如算法1所示。

基于装箱算法，本文设计单时隙调度算法。算法核心思想是根据优先级规则对待调度用户排序，依次尝试将用户加入服务集合直到资源耗尽。本文考虑三种优先级策略：

（1）最早截止时间优先（EDF）：$\pi_i^{EDF}=W_i^{\max}-w_i(t)$，值越小优先级越高，优先服务即将超时

算法 1　最佳适应递减装箱算法（BFD）

输入：碎片需求集合 $\mathcal{K}'=\{K'_1,K'_2,\cdots,K'_m\}$，RB 容量 N

输出：所需 RB 数 R_{frag}，装箱方案 $\mathcal{B}$

将 $\mathcal{K}'$ 按需求大小降序排列，得 $K'_{(1)}\geqslant K'_{(2)}\geqslant\cdots\geqslant K'_{(m)}$

$R_{frag}\leftarrow 0$；剩余容量数组 $r[\,]\leftarrow\varnothing$

For $j=1$ **to** m **do**

在已开启的 RB 中寻找满足 $r[k]\geqslant K'_{(j)}$ 且 $r[k]$ 最小的 RB，记为 k^*

if 存在这样的 k^* **then**

将 $K'_{(j)}$ 放入 RB k^*；$r[k^*]\leftarrow r[k^*]-K'_{(j)}$

else

$R_{frag}\leftarrow R_{frag}+1$；$r[R_{frag}]\leftarrow N$

将 $K'_{(j)}$ 放入 RB R_{frag}；$r[R_{frag}]\leftarrow N-K'_{(j)}$

end if

end for

return R_{frag}，装箱方案 $\mathcal{B}$

用户；

（2）最小需求优先（SDF）：$\pi_i^{SDF}=K_i$，值越小优先级越高，优先服务资源需求小的用户；

（3）加权优先级：

$\pi_i^{WP}=\alpha\cdot w_i(t)/W_i^{\max}+(1-\alpha)\cdot\left(N-K'_i\right)/N$，其中 $\alpha\in[0,1]$ 为权重参数，π_i^{WP} 值越大优先级越高，综合考虑时延公平性和资源效率。基于上述优先级策略，单时隙调度流程如算法 2 所示。

算法 2　单时隙调度算法

输入：待调度用户集合 $\mathcal{U}$，可用 RB 数 R，调度策略类型

输出：服务集合 S_t

按所选策略计算每个用户 $i\in\mathcal{U}$ 的优先级 π_i，并从高到低排序，得有序列表 $\mathcal{L}=(u_1,u_2,\cdots,u_n)$

$S_t\leftarrow\varnothing$；$R_{full}\leftarrow 0$；$\mathcal{K}'\leftarrow\varnothing$；$R_{frag}\leftarrow 0$

for $j=1$ **to** n **do**

$n_{u_j}\leftarrow\left\lfloor K_{u_j}/N\right\rfloor$；$K'_{u_j}\leftarrow K_{u_j}\bmod N$

If $K'_{u_j}>0$ **then** $\mathcal{K}'_{temp}\leftarrow\mathcal{K}'\cup\{K'_{u_j}\}$ **else** $\mathcal{K}'_{temp}\leftarrow\mathcal{K}'$

$R_{frag}^{temp}\leftarrow\mathrm{BFD}(\mathcal{K}'_{temp},N)$

if $R_{full}+n_{u_j}+R_{frag}^{temp}\leqslant R$ **then**

$S_t\leftarrow S_t\cup\{u_j\}$；$R_{full}\leftarrow R_{full}+n_{u_j}$

$\mathcal{K}'\leftarrow\mathcal{K}'_{temp}$；$R_{frag}\leftarrow R_{frag}^{temp}$

end if

end for

return S_t

算法复杂度分析：算法 2 中用户排序的复杂度为 $O(n\log n)$；在用户接纳过程中，每次调用算法 1 的复杂度为 $O(m\log m)$，最多执行 n 次，，因此算法总体复杂度为 $O(n^2\log n)$。在物联网场景的用户规模下完全可接受。

除计算复杂度外，所提方案的资源利用效率也是评估其性能的关键维度。下面从理论角度分析 EWFRFT 方案的资源利用率。

由于每个 RB 包含 $N=12$ 个子载波，所提方案单时隙服务能力增益的理论上界为 12 倍，对应所有用户均为最小粒度需求的极端场景。设碎片总需求为 $\Sigma_{frag}=\sum_{i=1}^{n}K_i$，并以 R_{frag}^{opt} 表示容纳全部碎片所需的最少 RB 数（即最优装箱方案的 RB 数，其下界为 $\left\lceil\Sigma_{frag}/N\right\rceil$）。由 BFD 算法的近似比，本方案实际所用碎片 RB 数满足

$$R_{frag}\leqslant\frac{11}{9}R_{frag}^{opt}+\frac{6}{9}\tag{24}$$

即 BFD 在装箱紧凑度上与最优方案相差常数因子（11/9）以内，达到近似最优水平。EWFRFT 方案的资源利用率为

$$\eta_{EWFRFT}=\frac{R_{full}\cdot N+\Sigma_{frag}}{\left(R_{full}+R_{frag}\right)\cdot N}\tag{25}$$

完整 RB 部分利用率为 100%，碎片部分利用率为 $\Sigma_{frag}/\left(R_{frag}\cdot N\right)$。当完整 RB 占主导时 $\eta_{EWFRFT}\to 1$；碎片部分利用率的绝对取值取决于碎片需求的分布：当各用户碎片需求多样、能够相互拼合填满 RB 时接近 100%；当多个碎片需求均较大（如均超过 $N/2$）而难以两两共置时则受限于需求分布本身。但无论碎片分布如何，本方案都回收了传统方式中随完整 RB 一并浪费的碎片子载波，使整体资源利用率显著高于传统方式（后者单用户利用率最低仅为 $1/N\approx 8.3\%$）。

3　仿真分析

本文仿真侧重于资源分配与调度性能，物理层传输能力通过单子载波承载能力等效体现，因此仿真结果反映给定传输能力条件下不同资源分配方案的服务性能。仿真中，系统采用 QPSK 调制和 1/2 信道编码率作为代表性 MCS 配置。所提方法作用于调制映射后的符号及资源映射过程，其实现不依赖于具体调制阶数；采用其他 MCS 时主要改变单个子载波的传输能力 c，进而影响用户所需的子载波数量 K_i，不改变本文的资源分配机制。子载波间隔为 15 kHz，每个 RB 包含 12 个子载波，每时隙包

含14个OFDM符号。考虑mMTC场景下运营商为物联网业务划分的频谱资源，系统可用RB数为25个，对应5 MHz带宽。数据包大小服从截断Pareto分布，形状参数$\alpha = 3.5$，下界$D_{\min} = 5$字节，上界$D_{\max} = 30$字节，对应3GPP TR 45.820中小包告警类业务的典型参数取值，符合工业传感器典型小包特征。各用户最大容忍时延$W_i^{\max}$独立服从[5,20]时隙的均匀分布。到达过程分别采用泊松分布（均值λ，对应均匀到达场景）和Beta(3,4)分布（突发周期T=200时隙，对应突发到达场景）。仿真时长为2000时隙，每个负载点进行100次独立蒙特卡洛重复试验取均值。本文所提方法是在标准5G NR RB资源分配机制基础上进行的细粒度改进，因此选取传统5G NR的RB级分配方案作为直接对比基线，在相同业务到达、可用资源和时延约束下，评价细化资源分配粒度带来的性能收益。NOMA和NB-IoT在多址方式、资源结构及空口机制等方面与本文方案存在差异，直接进行数值比较需要进一步统一相应的传输配置和接收处理条件，本文已在引言中对其与所提方法的机制差异进行了定性比较。EWFRFT方案分别采用EDF、SDF和加权优先级（权重系数$\alpha = 0.5$）三种调度策略，分别记为EWFRFT-EDF、EWFRFT-SDF和EWFRFT-Weighted。

图4给出了均匀到达场景下各方案每时隙成功服务用户数随到达率的变化。由图4可以看出，在轻载阶段四种方案曲线重合，成功服务用户数随λ线性增长，表明系统服务能力充裕。随着λ增大，各方案依次达到饱和：传统5G方案首先在$\lambda \approx 25$处饱和，饱和值约为25用户/时隙，这与系统可用RB数以及每用户平均占用1个RB的设定一致；EWFRFT-EDF的饱和点推迟至$\lambda \approx 60$；EWFRFT-SDF和EWFRFT-Weighted由于优先接纳资源需求较小的用户，装箱效率更高，在$\lambda = 120$时仍未完全饱和。由此表明，EWFRFT通过子载波级细粒度资源复用，在相同频谱资源下显著提升了系统单时隙的设备接入能力。

图5给出了均匀到达场景下各方案平均等待时延随到达率的变化。由图5可以看出，时延曲线均呈现先平坦后急剧上升的阶跃特征，这是有限容量排队系统在利用率趋近于1时的典型行为。传统5G在$\lambda \approx 25$附近时延即急剧上升、EWFRFT-EDF与

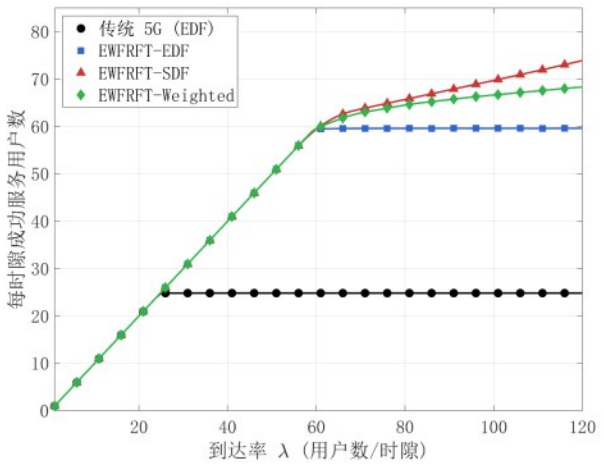


图4　均匀到达场景下各方案每时隙成功服务用户数随到达率的变化

EWFRFT-Weighted在$\lambda \approx 60$附近开始出现明显的排队时延、EWFRFT-SDF由于优先消化小需求用户、单时隙服务能力最强，队列消解最快，其时延上升最为平缓，在所考察的负载范围内始终保持在较低水平。各方案时延开始上升的负载，与图4中其服务能力增长趋缓的位置基本一致——服务能力越强的方案，进入排队拥塞的负载越高、时延上升越平缓。在相同的中等负载下，EWFRFT方案的平均等待时延比传统方案低多个数量级，体现了子载波级资源复用对接入时延的显著改善。

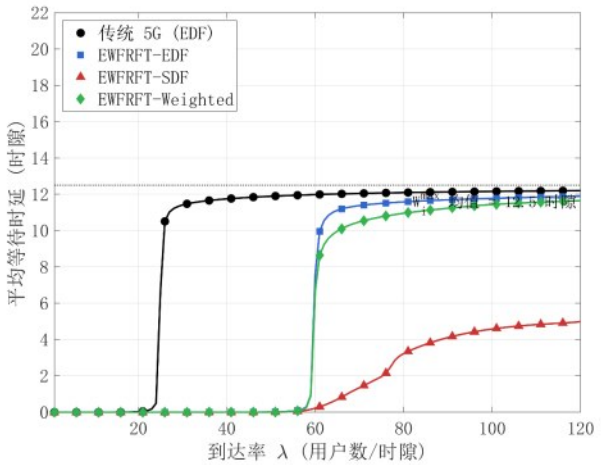


图5　均匀到达场景下各方案平均等待时延随到达率的变化

图6给出了突发到达场景下各方案超时率随等效到达率的变化。在排队模型中，用户等待时间一旦超过$W_i^{\max}$即被判为超时；超时意味着业务信息失效——告警类业务过时后不再具备时效性，周期上报类业务的旧值会被后续新值覆盖，因此即使对

于非实时 mMTC 业务，超时率仍是衡量接入可达性的关键指标。超时率的高低本质上取决于队列消化速度与突发激活速度的相对关系：EWFRFT 方案通过提升单时隙服务能力，使同规模突发队列能在更少的时隙内被消解，从而降低超时率。由图 6 可以看出，传统 5G 方案的超时率在较低的 λ 处即开始迅速上升，这是因为突发峰值时刻的瞬时到达强度显著高于等效 λ，系统在等效 λ 远低于饱和值时已陷入拥塞。EWFRFT 三种方案的超时率显著低于传统方案。值得关注的是，EWFRFT-SDF 和 EWFRFT-Weighted 的超时率低于 EWFRFT-EDF，这与均匀到达场景下的时延排序相反；原因在于突发场景下队列瞬时积压规模远超单时隙服务能力，SDF 和加权策略优先消化小需求用户使单时隙消化用户数更多，从而更快缓解队列长度，而 EDF 在大规模积压时会频繁处理等待时间较长的大需求用户，单时隙消化用户数相对较少。这一差异表明，调度策略的最优选择依赖于到达特性：EDF 适用于均匀到达场景的时延控制，SDF 和加权策略适用于突发场景的超时率控制。

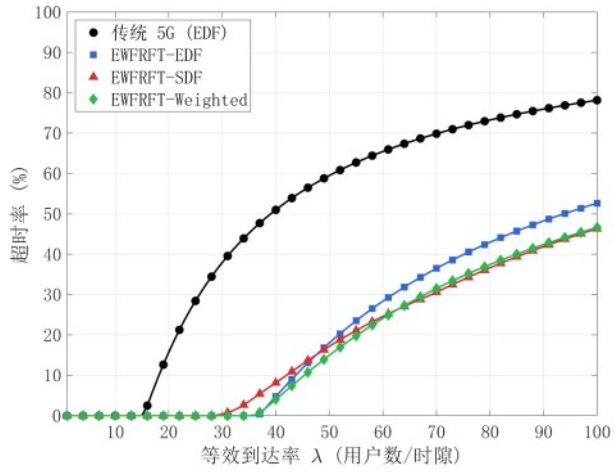


图 6　突发到达场景下各方案超时率随等效到达率的变化

4　结束语

针对物联网业务数据包小、设备密度高、对接入时延敏感的特点，本文提出了一种基于 EWFRFT 变换域的细粒度资源分配方法。该方法利用 EWFRFT 酉变换保持子载波频域正交性的特性，使多个物联网设备可共享同一 RB 内的不同子载波，在与现有 5G NR 空口协议兼容的前提下将资源分配粒度由 RB 级细化至子载波级，从根本上缓解了小包业务与 RB 承载容量不匹配导致的频谱资源浪费。围绕单时隙的资源分配决策，本文设计了两个相互配合的算法：基于 BFD 的碎片资源装箱算法用于最大化碎片部分的频谱利用率，单时隙调度算法通过三种可选优先级策略——EDF、SDF 与加权优先级——实现时延控制或接入能力的差异化优化；后者在每次尝试接纳新用户时调用前者，以动态判断资源约束。仿真结果表明，相比传统 RB 级分配方案，所提方法在频谱资源利用率和接入时延两方面均具有显著的性能优势；三种优先级策略在不同到达特性下呈现差异化的适用性：EDF 以截止时间为优先级，适用于均匀到达、对业务时延上限有明确要求的场景；SDF 与加权策略优先消化小需求用户，在突发场景下的超时率控制更具优势，从而为实际部署中依据业务特征选择调度策略提供了参考。后续工作将进一步考虑频率选择性衰落、信道估计误差等非理想信道条件下的系统性能，以进一步评估所提方法在实际 5G NR 系统中的适用性。

参考文献：

[1] ITU-R. IMT vision—Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond: ITU-R M.2083-0 [S]. 2015.

[2] 3GPP. Study on scenarios and requirements for next generation access technologies: TR 38.913 V14.3.0[R]. 2017.

[3] 3GPP. NR; Physical channels and modulation: TS 38.211 V15.7.0 [S]. 2019.

[4] 3GPP. NR; Multiplexing and channel coding: TS 38.212 V15.7.0 [S]. 2019.

[5] ZHANG L, LIU A, CHEN X. A WMMSE-based contiguous resource scheduling algorithm for 5G-NR uplink[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2024, 13(2): 466-470.

[6] CHEN X, NG D W K, YU W, et al. Massive access for 5G and beyond[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39(3): 615-637.

[7] WU Y, GAO X, ZHOU S, et al. Massive access for future wireless communication systems[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(4): 148-156.

[8] 张子扬，赵军辉，马小婷. 面向 5G 蜂窝物联网的大规模设备接入算法[J]. 应用科学学报, 2023, 41(4): 626-635.
ZHANG Z Y, ZHAO J H, MA X T. Large-scale device access algorithm for 5G cellular Internet of Things[J]. Journal of Applied Sciences, 2023, 41(4): 626-635.

[9] LIU Y, QIN Z, ELKASHLAN M, et al. Nonorthogonal multiple access for 5G and beyond[J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105

(12): 2347-2381.

[10] DING Z, LEI X, KARAGIANNIDIS G K, et al. A survey on non-orthogonal multiple access for 5G networks: Research challenges and future trends[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(10): 2181-2195.

[11] MIUCCIO L, PANNO D, RIOLO S. Joint control of random access and dynamic uplink resource dimensioning for massive MTC in 5G NR based on SCMA[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(6): 5042-5063.

[12] NIKOPOUR H, BALIGH H. Sparse code multiple access[C]//Proceedings of 2013 IEEE 24th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Piscataway: IEEE Press, 2013: 332-336.

[13] WEI F, CHEN W, WU Y, et al. Message-passing receiver design for joint channel estimation and data decoding in uplink grant-free SCMA systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(1): 167-181.

[14] LI J, DU Q, SUN L, et al. Queue-aware joint ACB control and resource allocation for mMTC networks[C]//Proceedings of 2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.

[15] LIU L, LARSSON E G, YU W, et al. Sparse signal processing for grant-free massive connectivity: A future paradigm for random access protocols in the Internet of Things[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2018, 35(5): 88-99.

[16] SHAHAB M B, ABBAS R, SHIRVANIMOGHADDAM M, et al. Grant-free non-orthogonal multiple access for IoT: A survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2020, 22(3): 1805-1838.

[17] JIANG W, JIA Y, CUI Y. Statistical device activity detection for OFDM-based massive grant-free access[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, 22(6): 3805-3820.

[18] YU Y J, WANG J K. Uplink resource allocation for narrowband Internet of Things (NB-IoT) cellular networks[C]//Proceedings of 2018 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 466-471.

[19] HUANG C W, TSENG S C, LIN P, et al. Radio resource scheduling for narrow-band Internet of Things systems: A performance study[J]. IEEE Network, 2019, 33(3): 108-115.

[20] YU Y J, LI L X. Offset-aware resource allocation in NB-IoT networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(23): 23967-23980.

[21] SHIH C C. Fractionalization of Fourier transform[J]. Optics Communications, 1995, 118: 495-498.

[22] SONG G, FANG X J, SHA X J. A robust extended hybrid carrier system for doubly selective channels[J]. IEEE Communications Letters, 2022, 26(5): 1146-1149.

[23] SONG G, FANG X J, SHA X J. A robust extended hybrid carrier system for the next generation wireless communications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(1): 980-994.

[24] MEI L, SHA X J, ZHANG N T. The approach to carrier scheme convergence based on 4-weighted fractional Fourier transform[J]. IEEE Communications Letters, 2010, 14(6): 503-505.

[25] MEI L, SHA X J, RAN Q W, et al. Research on the application of 4-weighted fractional Fourier transform in communication system [J]. Science China Information Sciences, 2010, 53(6): 1251-1260.

[26] MEI L, ZHANG Q Y, SHA X J, et al. WFRFT precoding for narrowband interference suppression in DFT-based block transmission systems[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(10): 1916-1919.

[27] FANG X J, ZHANG N, ZHANG S, et al. On physical layer security: Weighted fractional Fourier transform based user cooperation [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(8): 5498-5510.

[28] WANG Z D, MEI L, SHA X J, et al. BER analysis of WFRFT precoded OFDM and GFDM waveforms with an integer time offset [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(10): 9097-9111.

[29] SONG G, FANG X J, SHA X J. Design and analysis of the EWFRFT-based extended hybrid carrier system[C]//Proceedings of 2021 17th International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1162-1167.

[30] 3GPP. NR; Radio Resource Control (RRC); Protocol specification: TS 38.331 V16.6.0[S]. 2021.

[31] 3GPP. Cellular system support for ultra-low complexity and low throughput Internet of Things: TR 45.820 V13.1.0[R]. 2015.

[32] 3GPP. Study on RAN improvements for machine-type communications: TR 37.868 V11.0.0[R]. 2011.

[33] JOHNSON D S, DEMERS A, ULLMAN J D, et al. Worst-case performance bounds for simple one-dimensional packing algorithms[J]. SIAM Journal on Computing, 1974, 3(4): 299-325.