



# 面向 B5G/6G 大规模机器通信系统新型多址技术研究进展

戴基明, 马国玉\*, 马毅琰, 薛珍, 艾渤

北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京 100044

\* 通信作者. E-mail: magy@bjtu.edu.cn

收稿日期: 2021-11-29; 修回日期: 2021-12-31; 接受日期: 2022-01-26; 网络出版日期: 2022-03-29

中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: 2021RC205, 2021JBM438)、国家自然科学基金 (批准号: 62101024, 61725101, U1834210, 6196113039) 和轨道交通控制与安全国家重点实验室 (北京交通大学) 自主研究课题 (批准号: RCS2020ZT010, RCS2019ZZ007, RCS2022ZT012) 资助

**摘要** 大规模机器通信作为第五代移动通信系统的三大应用场景之一, 也是支撑未来第四次工业革命的关键技术. 其主要通过部署大量的机器设备, 以实现智能型社会. 由于低功耗要求, 人们引入了免授权随机接入来减少设备与基站间的信令交互过程. 加之无线电资源的匮乏, 如何实现大规模机器设备的免授权随机接入成为挑战. 在 B5G 以及 6G 中, 这一挑战将变得尤为显著. 因此有必要研究出一种行之有效的多址接入技术. 串联扩频多址技术是一种实现大规模机器设备高效连接的新型非正交多址接入技术, 并且能够以较低的复杂度实现高连接性和高可靠性. 本文首先综述了大规模机器通信的特点及多址技术的研究现状. 然后, 介绍了串联扩频多址技术的收发机设计和性能权衡性分析. 最后, 介绍了串联扩频多址技术的研究进展和应用进展.

**关键词** 大规模机器通信, 非正交多址, 串联扩频多址, B5G, 6G

## 1 引言

随着世界上许多国家都将步入老龄化社会, 将逐渐给社会生产力的提高带来了挑战, 为了应对该挑战, 世界各国纷纷提出了利用大量智能化机器设备来替代未来不足的劳动力人口的战略, 而物联网 (Internet of Things, IoT) 将成为连接大量机器设备, 实现生产制造智能化的关键<sup>[1,2]</sup>. 第五代移动通信系统 (the 5th generation mobile communication system, 5G) 也提出了大规模机器通信 (massive machine-type communications, mMTC) 场景来应对未来大规模物联网的应用<sup>[3]</sup>. 随着 5G 在垂直行业应用的探索与发展, B5G 以及下一代移动通信 6G 网络中对大规模物联网的应用需求将会进一步提升<sup>[4,5]</sup>.

**引用格式:** 戴基明, 马国玉, 马毅琰, 等. 面向 B5G/6G 大规模机器通信系统新型多址技术研究进展. 中国科学: 信息科学, 2022, 52: 639–657, doi: 10.1360/SSI-2021-0394  
Dai J M, Ma G Y, Ma Y Y, et al. Research progress of new multiple access technique for B5G/6G massive machine-type communication systems (in Chinese). Sci Sin Inform, 2022, 52: 639–657, doi: 10.1360/SSI-2021-0394

与人与人通信不同, mMTC 系统具有如下 4 个特点. 第 1 个为 mMTC 系统同时具有海量的机器设备接入数量和广覆盖特点, 随着设备连接规模的快速扩大, 设备的连接数的增加将会成为 mMTC 系统最首要的特点. 国际电信联盟 (International Telecommunication Union, ITU) 与第三代合作伙伴计划 (3rd generation partnership project, 3GPP) 在规划中指出, mMTC 系统应能支持大约每平方公里 10 万~100 万个设备的连接密度<sup>[6,7]</sup>. 另外, 在报告中 ITU 还指出基站或接入点一般以每平方公里 0.1 个的密度覆盖. 第 2 个特点为 mMTC 系统通常传输短数据包, mMTC 系统中的终端主要为传感器和作动器等机器设备, 这些设备传输的信息一般由小尺寸数据包构成<sup>[8]</sup>. 第 3 个特点为 mMTC 系统中终端的功耗较低, ITU 在报告中指出用户端应能在不更换电池的情况下工作 15 年. 第 4 个特点为 mMTC 系统一般为零星传输, 传感器或者作动器通常为间歇突发性进行数据传输, 且以上行通信占主导, 在一段时间内通常只有少量的设备被激活并进行数据的传输, 而大部分的设备都处于非激活的睡眠状态<sup>[9]</sup>.

面向 mMTC 系统的随机接入过程包含了基于授权的随机接入和免授权的随机接入, 在基于授权的随机接入中, 机器设备需要与基站事先建立协作进而获取授权, 随后进行接入. 然而, 在 mMTC 系统中设备通常传输的是短数据包, 基于授权的随机接入中机器设备与基站之间的信令交互过程将导致相对巨大的控制信令开销和过长的传输时延, 还会造成频谱资源的浪费. 另外, 由于许多方案中的前导码资源有限, 将会加剧 mMTC 系统的冲突, 进而使得传输效率下降. 研究人员为减少协作过程<sup>[10]</sup>, 在 mMTC 系统中引入了免授权随机接入过程, 以减少信令开销和传输延迟. 然而, 由于免授权随机接入的引入, 用户与基站之间缺乏信令交互的协作过程, 基站难以将收到的多个数据包与用户相对应, 因而这些数据包对于基站都是匿名的, 基站难以基于匿名数据包识别出激活用户并进行数据恢复, 进而造成传输失败. 因此有必要研究一种新型的免授权随机接入多址方法.

另外, 日益稀缺的无线电资源与大规模机器设备之间存在矛盾, 传统的正交多址接入 (orthogonal multiple access, OMA) 方式如频分多址、时分多址, 以及码分多址, 均是将无线电资源从频谱、时间、码字等方面以正交的方式划分给连接用户, 其带来的碰撞可能性非常高, 难以支持海量的用户连接. 而非正交多址 (non-orthogonal multiple access, NOMA) 技术能够允许多个用户共享同一信道<sup>[11]</sup>, 进而能够获得更高的频谱利用率和更高的连接过载率<sup>[12]</sup>, 从而更好地应对未来大规模机器设备的连接.

综上所述, 面向 B5G 以及 6G 中大规模机器通信系统需要一种新型的免授权随机接入多址技术和实现方法. 本文首先综述了多址技术的研究现状, 然后, 分析了现有多址技术存在的问题, 并针对这些问题给出了一种新的多址接入方案及相应的研究进展. 最后, 对该多址接入方案的一些应用进展进行介绍.

## 2 研究现状

如前文所述, 在 mMTC 场景低功耗和大规模特性的驱动下, 免授权 NOMA 成为适合应用在该场景的接入方案. 目前, 面向 B5G 及 6G 中大规模机器通信系统存在若干免授权 NOMA 技术, 这些 NOMA 技术主要是在功率域和码域上实现. 功率域 NOMA 将不同用户的信号以不同的发射功率在同一时频资源上进行叠加以实现多路复用, 在接收端通过串行干扰消除方法对抗多址干扰问题<sup>[13,14]</sup>. 面向大规模机器通信系统的 NOMA 技术更加倾向于在码域上实现, 码域 NOMA 又能够进一步分为 3 种形式: 基于交织的多址技术、基于码本的多址技术, 以及基于扩频序列的多址技术.

基于交织的多址技术有 Li 等<sup>[15]</sup>提出的交织分多址 (interleaved-division multiple access, IDMA) 技术和三星公司提出的交织网格多址 (interleaved grid multiple access, IGMA) 技术<sup>[16]</sup>. 在 IDMA 中, 不

同用户使用不同的交织器对数据进行交织,以达到降低数据码片相关性的目的,进而接收端可以将用户数据从接收到的码片中检测出来.在 IGMA 中,与 IDMA 类似,在发射端不同用户也使用不同的交织器对数据进行交织,或者使用网格映射图样对用户进行区分,不同的是,在接收端运用最大后验概率及消息传递算法检测器提高数据检测性能.

基于码本的多址技术有华为公司提出的稀疏码分多址 (sparse code multiple access, SCMA) 技术<sup>[17]</sup>和大唐公司提出的图样分多址 (pattern division multiple access, PDMA) 技术<sup>[18]</sup>.在 SCMA 中,应用基于多维星座图调制和稀疏码扩频,为每个用户生成独特的码本,在接收端采用消息传递算法识别激活用户并解决碰撞问题.在 PDMA 中,为每个用户分配不同的图样矩阵,用户依照图样矩阵选择与之对应的时频资源,在接收端利用串行干扰消除对用户进行识别和解决碰撞问题.

基于扩频序列的多址技术有中兴公司提的多用户共享接入 (multi-user shared access, MUSA) 技术<sup>[19]</sup>和 Bockelmann 等<sup>[20]</sup>提出的基于压缩感知的多用户检测 (compressive sensing based multi-user detection, CSMUD) 技术.在 MUSA 中,利用不同的非正交序列对用户数据扩频,这些序列由短复数序列构成,全部的非正交扩频序列则构成一个序列池,在接收端,采用串行干扰消除对用户进行识别.与 MUSA 相类似,CSMUD 也采用了非正交扩频序列对用户的数据进行扩频,在接收端并没有使用 MUSA 中串行干扰消除的方式,而是借助前文所述的大规模物联网中零星传输特点形成的稀疏特性实现对用户的识别和相应数据的恢复.

然而,前文所述的几种多址技术存在一些不足,例如:大部分多址方案在接收端对碰撞的解决所使用的方法为置信传播或者干扰消除,这两种迭代式方法会造成硬件的计算复杂度提升以及相应的处理时延,进而对硬件要求较高<sup>[21,22]</sup>.另外,大部分多址方案只考虑系统支持的连接用户数量的提升,却少有考虑其他的性能需求,然而,在 B5G 以及未来 6G 中大规模机器通信系统中,应用种类将进一步增多,现有技术将难以满足未来多样化的需求.

最近,研究者提出一种新型的 NOMA 技术串联扩频多址 (tandem spreading multiple access, TSMA)<sup>[23,24]</sup>.与传统的基于迭代式方法解决碰撞不同,TSMA 采用的是一种复杂度较低的非迭代式解决方案.同时,TSMA 能够灵活地兼顾未来大规模机器通信的多种性能需求,从而更好地应对 B5G 以及 6G 中大规模机器通信场景.

### 3 串联扩频多址技术

TSMA 技术通过在发射端引入段编码和串联扩频两个独特的步骤来解决用户的碰撞问题,在串联扩频中,所有串联扩频组合构成的码本包含了每个连接用户独特的身份信息,通过串联扩频码本能够实现碰撞位置的定位,再利用段编码生成的冗余数据段实现对碰撞的解决,以保证大规模用户的可靠接入.在本节中,首先介绍 TSMA 技术的收发机设计,再对 TSMA 技术在大规模机器通信系统中各性能需求下进行权衡分析.

#### 3.1 串联扩频多址技术收发机设计

大规模机器通信单小区免授权随机接入系统如图 1 所示,该小区内共有 1 个基站和  $K$  个连接用户,基站与所有用户均装有单根天线,用户基于时隙并以扩频的方式进行上行传输,并假设所有激活用户的信号到达基站端是同步的.由于大规模特性,用户的数量  $K$  比系统的扩频因子  $q$  要大得多.由于用户是否被激活存在不确定性, $K$  个用户都可能在每个上行时隙内被激活进行数据传输.这里为了简化问题,假定每个用户被激活的概率均为  $p_a$ ,由于大规模物联网的零星传输特性, $p_a$  会远小于 1,进而

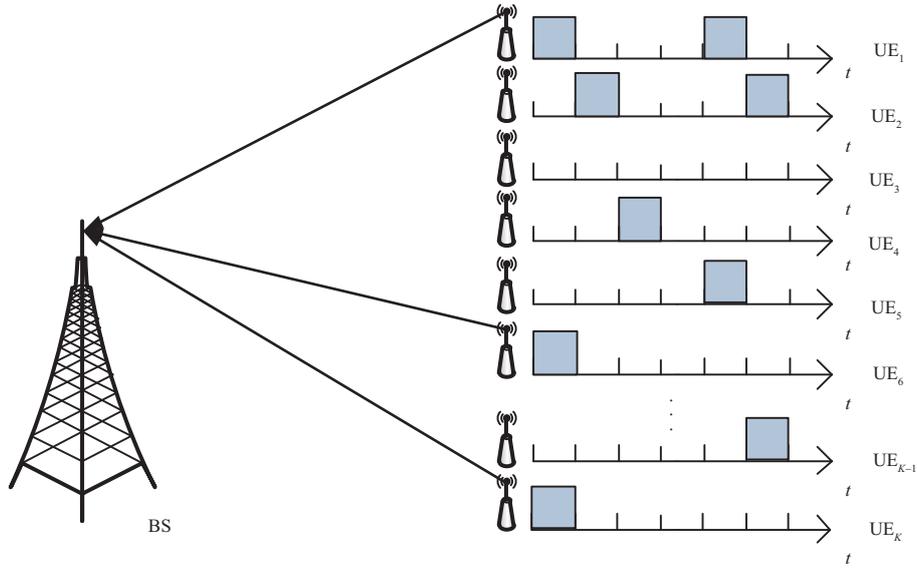


图 1 (网络版彩图) 大规模免授权随机接入系统  
 Figure 1 (Color online) Massive grant-free random access system

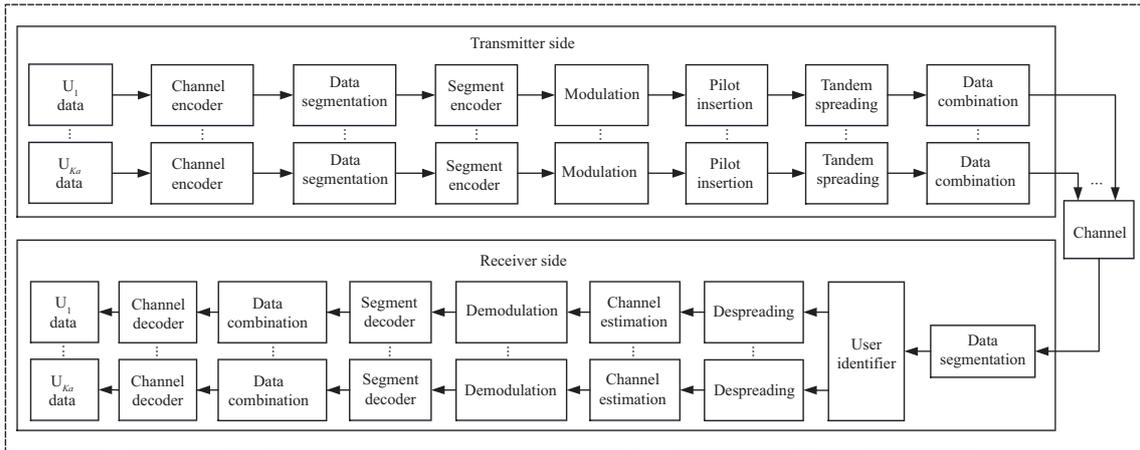


图 2 TSMA 收发机框图  
 Figure 2 Block diagram of the TSMA transceiver

在单个上行时隙内被激活的用户数量  $K_a$  将远小于  $K$ 。从前文描述可以得出,  $K_a$  的值服从离散二项分布, 所以  $K_a$  的概率可以表示为

$$\Pr(K_a) = C_K^{K_a} p_a^{K_a} (1 - p_a)^{K - K_a}. \quad (1)$$

图 2 为 TSMA 收发机框图, 在发射机端, 某激活用户  $k$  经过信道编码后的信息比特通过数据分段将其分成  $m$  段, 如果经信道编码后的数据长度无法被  $m$  整除, 则需要在末尾添加一定的 0 比特, 使其能够被  $m$  整除, 并将分段后的数据段称为消息数据段, 表示为  $\mathbf{D}_k^m = [\mathbf{d}_{k,1}, \mathbf{d}_{k,2}, \dots, \mathbf{d}_{k,m}]$ , 其中每段数据长度为  $b_m$ , 对于  $i = 1, 2, \dots, m$ , 表述为  $\mathbf{d}_{k,i} \in \{0, 1\}^{b_m \times 1}$ 。

在段编码中,利用了删余码在分布式存储中的运用<sup>[25]</sup>,对  $m$  个消息数据段  $\mathbf{D}_k^m$  进行编码以生成  $n$  个编码数据段,进而获得  $n - m$  冗余段,这里采用里德所罗门 (Reed Solomon, RS) 码作为删余码,与其他的删余码相比,RS 码对于任意的  $m$  和  $n$  均可生成  $n - m$  个冗余段.具体地,首先将用户  $k$  第  $i$  段的数据比特  $\mathbf{d}_{k,i}$  转换成有限域  $\text{GF}(2^{b_m})$  中的单个元素  $\Lambda_k(i)$ ,进而所有消息数据段  $\mathbf{D}_k^m$  则转换成基于有限域  $\text{GF}(2^{b_m})$  的  $1 \times m$  行向量  $\Lambda_k^m = [\Lambda_k(1), \Lambda_k(2), \dots, \Lambda_k(m)]$ .随后,利用 RS 码进行段编码,进而获得编码数据段.段编码过程表示为

$$\Lambda_k^n = \Lambda_k^m \mathbf{M} \text{ in } \text{GF}(2^{b_m}), \quad (2)$$

这里  $\Lambda_k^n \in \text{GF}(2^{b_m})^{1 \times n}$  包含了  $n$  个编码数据段的有限域元素,随后进一步转化为  $n$  个编码数据段中编码数据比特  $\mathbf{D}_k^n = [\mathbf{d}_{k,1}, \mathbf{d}_{k,2}, \dots, \mathbf{d}_{k,n}]$ .另外,生成矩阵  $\mathbf{M} \in \text{GF}(2^{b_m})^{m \times n}$  采用的是范德蒙德 (Vandermonde) 矩阵,表示为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 \\ \beta_0 & \beta_1 & \cdots & \beta_{n-2} & \beta_{n-1} \\ \beta_0^2 & \beta_1^2 & \cdots & \beta_{n-2}^2 & \beta_{n-1}^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \beta_0^{m-1} & \beta_1^{m-1} & \cdots & \beta_{n-2}^{m-1} & \beta_{n-1}^{m-1} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中,相应的元素  $\{\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{n-1}\}$  均来源于有限域  $\text{GF}(2^{b_m})$  中不用元素,由此可见  $n$  的值不能超过  $2^{b_m}$ .在复杂度方面,可以看到式 (2) 均为有限域运算,有限域  $\text{GF}(2^{b_m})$  中加法和乘法对应的复杂度分别是  $O(b_m)$  和  $O(b_m^2)$ <sup>[26]</sup>,因此段编码的复杂度为  $O((b_m^2 + b_m)nm)$ .通过段编码生成的  $\mathbf{D}_k^n$  含有  $n - m$  个冗余段,可用来克服后面串联扩频中所用到的不同串联扩频组合之间所发生的碰撞问题.

段编码之后,将  $\mathbf{D}_k^n$  调制成数据符号,为了简单起见,在这里采用的是二进制移相键控 (binary phase shift keying, BPSK) 调制,随后在每段数据符号前插入  $b_p$  个导频符号用于信道估计,进而得到符号  $\mathbf{x}_k^n = [\mathbf{x}_{k,1}, \mathbf{x}_{k,2}, \dots, \mathbf{x}_{k,n}]$ ,其中  $\mathbf{x}_k^n \in \mathbb{C}^{b \times n}$ ,  $b = b_p + b_m$ .这里,如果用户  $k$  为激活用户,导频符号则选用 1;如果用户  $k$  没有激活,则其导频符号和数据符号都为 0.

随后,对  $n$  段符号进行串联扩频.具体地,对于所有用户,同一段内的符号采用同一个序列进行扩频,不同段内的符号允许采用不同的序列进行扩频.TSMA 将这种扩频方式定义为串联扩频,所有段使用的扩频序列构成一个串联扩频组合,每个用户的串联扩频组合是独特的.因此,用户  $k$  的串联扩频组合表示为

$$\mathbf{\Omega}_k = [\mathbf{s}_{k,1}, \mathbf{s}_{k,2}, \dots, \mathbf{s}_{k,n}], \quad (4)$$

其中,  $\mathbf{s}_{k,i} \in \mathbb{C}^q$  是用户  $k$  的第  $i$  段所使用的扩频序列,系统中所有的扩频序列均来源于正交扩频序列集合  $\mathbf{E}$ .为了简单起见,TSMA 采用  $q \times q$  的离散傅里叶变换 (discrete fourier transform, DFT) 矩阵中  $q$  个列向量作为  $q$  个正交扩频序列,DFT 矩阵表示为

$$[\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_q] = \frac{1}{\sqrt{q}} \begin{bmatrix} \omega^0 & \omega^0 & \omega^0 & \cdots & \omega^0 \\ \omega^0 & \omega^1 & \omega^2 & \cdots & \omega^{q-1} \\ \omega^0 & \omega^2 & \omega^4 & \cdots & \omega^{2(q-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \omega^0 & \omega^{q-1} & \omega^{2(q-1)} & \cdots & \omega^{(q-1)^2} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中  $\omega = \exp(\frac{-j2\pi}{q})$ ,  $j$  为虚数符号, 即  $j = \sqrt{-1}$ . 能够发现扩频序列具有很好的互相关性, 但其自相关性不理想, 然而 mMTC 一般为窄带系统, 用户以单载波窄带发送数据, 所以可以假设单抽头平坦衰落信道. 数据符号按照串联扩频组合中的扩频序列进行扩频, 得到扩频码片为

$$\mathbf{c}_{k,i} = \mathbf{S}_{k,i} \mathbf{x}_{k,i}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (6)$$

式中  $\mathbf{S}_{k,i} \in \mathbb{C}^{bq \times b}$  表示为

$$\mathbf{S}_{k,i} = \begin{bmatrix} \mathbf{s}_{k,i} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mathbf{s}_{k,i} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \mathbf{s}_{k,i} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

TSMA 设计了一个串联扩频码本  $\mathcal{C}$ , 包括了系统中所有连接用户的串联扩频组合, 即串联扩频码本指代针对不同用户的扩频序列排列图样, 码本对于基站和用户都是已知的, 由于每个用户的串联扩频组合都是独特的, 因此可以用于接收机对用户身份的识别. 另外, 如果处在多个用户在相同段采用了同一个扩频序列, 则在该段会发生碰撞, 并将其称之为碰撞段. 由此可见, TSMA 将原本考虑整个数据包的碰撞转换为考虑具体的若干碰撞段上. TSMA 采用广义里德所罗门 (generalized Reed Solomon, GRS) 码作为最大距离可分 (maximum distance separable, MDS) 码来生成码本. 具体地, 首先将  $q$  个正交扩频序列表征为  $\text{GF}(q)$  中的  $q$  个  $q$  进制元素, 再利用 GRS 码来生成码本  $\mathcal{C}$  中每一个  $n$  段的串联扩频组合, 可以保证任意两个串联扩频组合之间的最小码距, 且在给定的最小码距下, MDS 码可以实现最大的码本尺寸, 其也表示任意两个串联扩频组合之间的碰撞段数量不超过  $r$ , 进而最大化该系统能够提供的串联扩频组合数量. 码本由  $q^{r+1}$  个不同的 Galois 域组合构成,  $\mathcal{C} \in \text{GF}(q)^{q^{r+1} \times n}$ , 即可以支持  $q^{r+1}$  个用户接入.

在串联扩频之后, 用户  $k$  将  $n$  段码片合并为一路发射信号, 表示为  $\mathbf{c}_k = [\mathbf{c}_{k,1}, \mathbf{c}_{k,2}, \dots, \mathbf{c}_{k,n}]$ .

在 TSMA 的接收机侧, 首先将接收到的合成信号分割成  $n$  段,  $\mathbf{Y} = [\mathbf{Y}_1, \mathbf{Y}_2, \dots, \mathbf{Y}_n]$ , 其中第  $i$  段接收信号  $\mathbf{Y}_i \in \mathbb{C}^{bq}$  可以表示为

$$\mathbf{Y}_i = \sum_{k=1}^K h_k \mathbf{c}_{k,i} + \mathbf{N}_i = \sum_{k=1}^K h_k \mathbf{S}_{k,i} \mathbf{x}_{k,i} + \mathbf{N}_i, \quad (8)$$

这里,  $\mathbf{N}_i \in \mathbb{C}^{bq}$  是第  $i$  段的噪声信号, 其服从复高斯 (Gauss) 分布  $\mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ , 这里  $\sigma^2$  表示噪声的功率.  $h_k$  为连接用户  $k$  的信道衰落.

信号分段后, TSMA 对激活用户进行识别. 准确识别出激活用户是数据检测正确的前提. 由前文所述的串联扩频码本可知, 在一个段上同一个扩频序列可能被多个用户采用, 将在数据段  $i$  上采用扩频序列  $j$  的所有用户归为一个组  $\mathcal{G}_{j,i}$ . 接收机运用能量检测的方法来获得第  $i$  段上存在的扩频序列, 将其表示为

$$r_{j,i} = |\mathbf{E}_j^H \mathbf{Y}_i|, \quad (9)$$

其中,  $\mathbf{E}_j \in \mathbb{C}^{bq \times b}$  与  $\mathbf{S}_{k,i}$  类似, 其为  $\mathbf{e}_j$  的对角矩阵. 通过设置能量检测门限以确定该段是否有使用  $\mathbf{e}_j$  的激活用户, 如果大于门限值, 则用户组  $\mathcal{G}_{j,i}$  包含的用户中至少有一个用户被激活以传输数据. 因此, 将第  $i$  段的潜在用户集  $\hat{\mathcal{U}}_i$  表示为

$$\hat{\mathcal{U}}_i = \bigcup_{j \in \hat{\mathcal{J}}_i} \mathcal{G}_{j,i}, \quad (10)$$

这里  $\hat{\mathcal{J}}_i$  表示在该段上获得的扩频序列所对应的索引集合. 在对全部段的潜在用户集都确定完成后, 再将所有段的潜在用户集求交集即得出识别用户集  $\hat{\mathcal{U}}_a$ .

在用户识别后, 接收机首先把  $\hat{\mathcal{U}}_a$  对应的串联扩频组合从码本中提取出来, 随后利用这些串联扩频组合进行解扩, 将第  $i$  段的解扩过程表示为

$$\hat{\mathbf{X}}_{\hat{\mathcal{U}}_a, i} = (\mathbf{S}_{\hat{\mathcal{U}}_a, i})^\dagger \mathbf{Y}_i, \quad (11)$$

这里

$$\mathbf{S}_{\hat{\mathcal{U}}_a, i} = [\mathbf{S}_{\hat{\mathcal{U}}_a(1), i}, \mathbf{S}_{\hat{\mathcal{U}}_a(2), i}, \dots, \mathbf{S}_{\hat{\mathcal{U}}_a(\hat{K}_a), i}], \quad (12)$$

$$\hat{\mathbf{X}}_{\hat{\mathcal{U}}_a, i} = [(\hat{\mathbf{x}}_{\hat{\mathcal{U}}_a(1), i})^\top, (\hat{\mathbf{x}}_{\hat{\mathcal{U}}_a(2), i})^\top, \dots, (\hat{\mathbf{x}}_{\hat{\mathcal{U}}_a(\hat{K}_a), i})^\top]^\top, \quad (13)$$

其中,  $\hat{K}_a$  指  $\hat{\mathcal{U}}_a$  中所包含的用户数量.

在解扩完成后, 利用导频符号对识别用户进行信道衰落估计, 由提取出来的串联扩频组合可知每个用户未发生碰撞的段, 将用户  $k$  未发生碰撞的所有段用  $\mathcal{I}_k$  表示,  $\text{card}(\mathcal{I}_k)$  表示未发生碰撞的段数量, 则用户  $k$  的信道衰落估计为

$$\hat{h}_k = \frac{1}{\text{card}(\mathcal{I}_k) b_p} \sum_{i \in \mathcal{I}_k} \sum_{\alpha=1}^{b_p} \hat{\mathbf{x}}_{k, i}(\alpha). \quad (14)$$

利用信道估计的结果对用户的数据部分进行信道均衡和解调处理, 对于用户  $k$ , 其解调后的数据比特为  $\hat{\mathbf{D}}_k^n = [\hat{\mathbf{d}}_{k,1}, \hat{\mathbf{d}}_{k,2}, \dots, \hat{\mathbf{d}}_{k,n}]$ . 在解调完成后, 对数据比特进行段解码, 由发射机的段编码可知, 接收机能够对识别用户中碰撞段数量不超过  $n - m$  的用户进行解码, 并放弃其余不可解码的用户. 对于能够被解码的用户  $k$ , 首先接收机舍弃  $n - m$  个数据段, 其中这些数据段包括所有的碰撞段, 剩下的  $m$  个数据段即为未发生碰撞的数据段. 随后, 所有  $m$  个未发生碰撞段中的数据比特表示为  $\bar{\mathbf{D}}_k^m$ , 再将其转换成  $m$  个有限域  $\text{GF}(2^{b_m})$  的元素  $\bar{\mathbf{\Lambda}}_k^m$  以进行段解码, 将其过程表示为

$$\hat{\mathbf{\Lambda}}_k^m = \bar{\mathbf{\Lambda}}_k^m \bar{\mathbf{M}}^{-1} \text{ in } \text{GF}(2^{b_m}), \quad (15)$$

这里,  $\bar{\mathbf{M}} \in \text{GF}(2^{b_m})^{m \times m}$  是由未发生碰撞段对应的发射机中生成矩阵  $\mathbf{M}$  的列构成的子矩阵. 随后将  $\hat{\mathbf{\Lambda}}_k^m$  转换回比特形式即完成段解码过程. 在复杂度方面, 式 (15) 用到了有限域中矩阵求逆运算,  $m \times m$  矩阵的求逆过程需要  $\frac{m(m+1)}{2}$  次除法运算,  $\frac{2m^3+3m^2-5m}{6}$  次乘法运算和  $\frac{2m^3+3m^2-5m}{6}$  次减法运算 [27], 因而段解码的复杂度为  $O((b_m^2 + b_m)m^3 + (b_m^2 + b_m)m^2)$ . 将多段数据进行合并, 最后通过信道译码即可获得用户数据.

### 3.2 串联扩频多址技术性能分析

在未来大规模机器通信的多种需求下, TSMA 可以灵活地调节系统配置以兼顾多种性能需求. 本文从 TSMA 的连接性、可靠性和用户速率 3 个性能需求进行权衡性分析. 连接性表示为系统支持的连接用户数量, 由串联扩频码本的设计过程可以发现, 串联扩频码本的尺寸决定了连接性. TSMA 实现可靠传输需要系统能够成功解决不同串联扩频组合间的碰撞, 因此, 用成功解决碰撞的概率表示可靠性. 用段编码的码率表示用户速率.

由码本的设计过程, 系统中能够支持的连接用户是数量不超过  $q^{r+1}$ , 所以在给定用户数量  $K$  和扩频因子  $q$  的情况下, 任意两个串联扩频组合之间的碰撞段数量表示为

$$r = \lceil \log_q K - 1 \rceil, \quad (16)$$

其中  $\lceil \cdot \rceil$  表示向上取整, 另外, 如果  $q$  大于  $K$ , 则所有串联扩频组合间都不会发生碰撞. 如果  $q$  小于  $K$ , 假设某时隙内激活的用户数为  $K_a$ , 那么对于每个用户, 存在的碰撞段数量的最大值为  $(K_a - 1)r$ . 碰撞的解决依靠段编码生成冗余段, 因此所有用户的碰撞都能被解决的条件为

$$n - m \geq (K_a - 1)r. \quad (17)$$

在能量检测完美以及  $K_a r \leq n - 1$  的前提下, 可以对全部的激活用户顺利识别, 因此系统能解决所有激活用户所发生碰撞的条件为

$$K_a \leq \min \left( \frac{n - m}{\lceil \log_q K - 1 \rceil} + 1, \frac{n - 1}{\lceil \log_q K - 1 \rceil} \right). \quad (18)$$

由于码本设计过程中采用了 GRS 码, 所以  $n$  不能超过  $q$ , 因此  $n = q$  可以使得  $K_a$  的值达到最大. 另外, 段编码的码率设置为  $\rho = \frac{m}{n}$ , 所以上式能够重新表示为

$$K_{a,\max} = \min \left( \frac{q(1 - \rho)}{\lceil \log_q K - 1 \rceil} + 1, \frac{q - 1}{\lceil \log_q K - 1 \rceil} \right), \quad (19)$$

其中  $K_{a,\max}$  是系统能解决所有激活用户所发生碰撞的激活用户数最大值. 系统能解决所有激活用户所发生的碰撞以实现可靠传输的概率为

$$\Pr(0 < K_a \leq K_{a,\max}) = \sum_{K_a=1}^{K_{a,\max}} C_K^{K_a} p_a^{K_a} (1 - p_a)^{K - K_a}. \quad (20)$$

综上所述, TSMA 可以通过调节段编码码率来实现不同的连接性和可靠性, 以更好地应对 B5G 以及 6G 中大规模机器通信场景. 图 3 展示了连接性、可靠性和用户速率三者的权衡性, 可以看出, TSMA 能够降低一定的用户速率来实现较高的连接性和可靠性.

图 4 展示了 TSMA 的块误码率 (block error rate, BLER) 性能, 能够发现在信噪比较低的情况下, CSMUD 的性能优于 TSMA, 这是由于 TSMA 不能达到 CSMUD 的信道编码增益, 以及 TSMA 的数据分段降低了能量检测的样本数量, 进而导致用户识别性能的降低. 但随着信噪比的提升, 系统性能主要受碰撞的影响, 由于段编码的存在, TSMA 的性能优于 CSMUD. 同时, 从图中能够发现, TSMA 可以通过降低用户速率使得 BLER 下降.

在过载率方面, mMTC 系统中的大规模并不是指同时传输的设备数量, 而是指所有的连接用户设备数量, 其包括了正在传输的激活用户与处于睡眠状态非激活用户. 由于零星特性, 一段时间内同时在传输的激活用户数量是要远远小于所有连接用户的数量, TSMA 本身并不支持过载传输, 但它支持过载连接. 它可以利用扩频因子为  $q$  的扩频序列支持  $q^{r+1}$  个用户的连接, 因此过载率为  $q^r$ . 图 5 展示了在信噪比为 10 dB 的情况下, 当连接用户数量与扩频因子的比值不同时, 用户识别错误概率的变化情况. 能够看到虚警概率随着用户数量的增大而增大, 这是因为虚警概率主要取决于最大碰撞段数量和激活用户数量. 而漏警概率主要由于基站无法检测到一些经历了信道深衰落的激活数量, 因此变化并不明显.

## 4 串联扩频多址技术研究进展

### 4.1 异步串联扩频多址技术

TSMA 主要集中在所有激活用户信号是同步到达基站端的假设下研究碰撞的解决能力, 然而在实际大规模机器通信系统中, 用户设备处于不同的位置, 使得用户的信号到达基站端需经历不同的传输

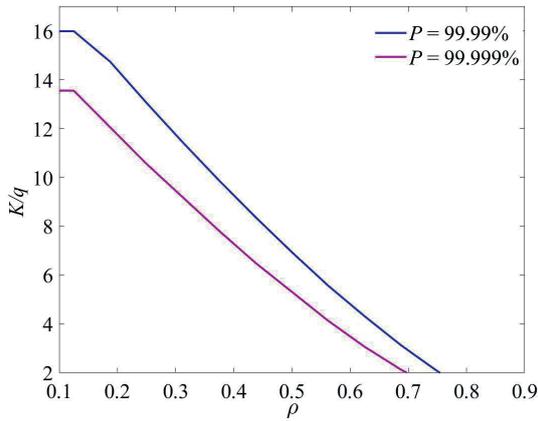


图 3 (网络版彩图) TSMA 连接性、可靠性, 以及用户速率间权衡性

Figure 3 (Color online) Trade-off among the connectivity, the reliability, and the user data rate of TSMA

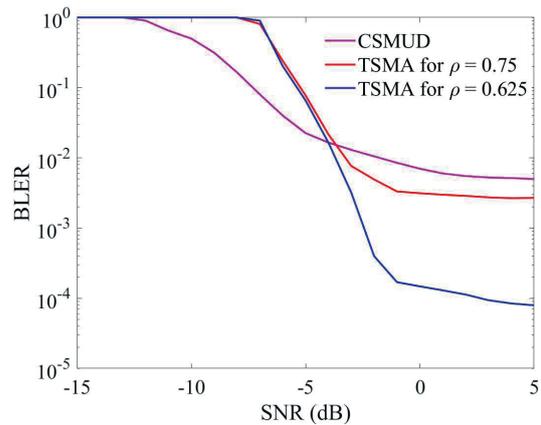


图 4 (网络版彩图) TSMA 与 CSMUD 的系统性能比较

Figure 4 (Color online) Performance comparison between TSMA and CSMUD

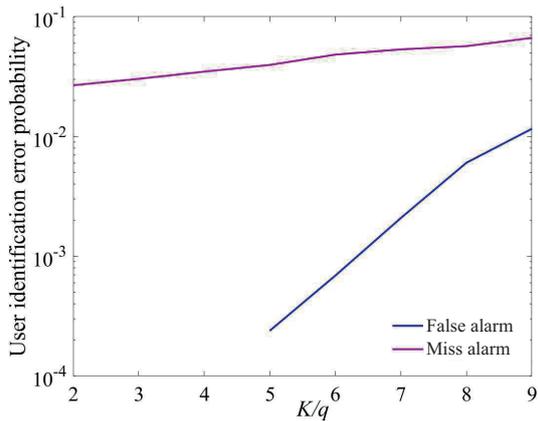


图 5 (网络版彩图) 用户激活概率为 0.05 时 TSMA 的用户识别错误概率

Figure 5 (Color online) User identification error probability of TSMA with  $p_a = 0.05$

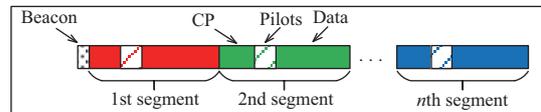


图 6 (网络版彩图) 异步 TSMA 上行传输信号结构

Figure 6 (Color online) Uplink transmission signal structure of asynchronous TSMA

距离, 进而导致不同用户的信号到达接收端的时延不同. 对于免授权随机接入系统, 用户信号异步到达基站端会使扩频序列的正交性不再得到保证, 进而影响用户识别和数据恢复. 因此, 需要研究行之有效的异步解决方案, 从而更好地在实际系统中应用.

目前, 已有相关工作针对异步问题提出了相应的异步串联扩频多址技术, 进而使得 TSMA 在实际免授权随机接入系统中的实现具有可行性<sup>[28]</sup>. 该方案通过对 TSMA 的收发机进行改进, 在发射机部分, 其增加了对扩频后的码片进行交织操作, 并在交织后的每个数据段上加入一定长度的循环前缀 (cyclic prefix, CP)<sup>[29]</sup>, 通过交织操作使得原先要在每个符号上加入循环点缀改为只需在每个数据段上加入循环前缀, 进而降低了开销. 另外, 在整个信号之前加入信标信号用于指示用户信号到达接收端, 上行传输信号结构如图 6 所示. 在接收机部分, 引入了相应的传输时延估计, 当信道时延不大

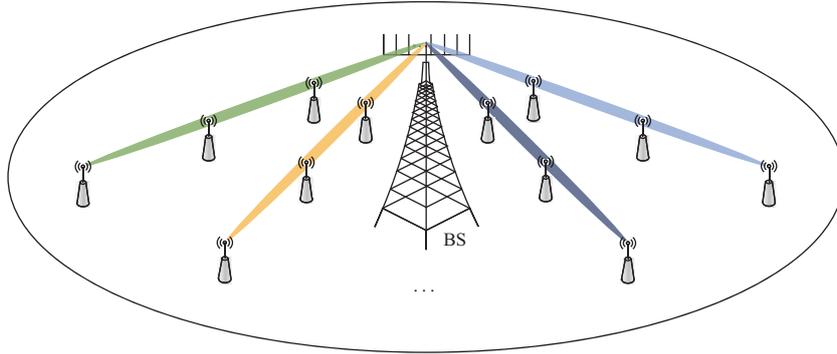


图 7 (网络版彩图) 多天线 TSMA 系统模型

Figure 7 (Color online) Multi-antenna TSMA system model

于发射机端所加入循环前缀的长度时, 可利用循环前缀消除时延, 实现异步下的用户识别及数据检测, 进而有效地降低异步对系统的影响。

#### 4.2 多天线串联扩频多址技术

TSMA 在考虑系统模型时假设基站与所有连接用户均配置单根天线, 尽管在大规模机器通信系统中的用户出于低成本考虑往往配置为单天线, 但是可以将基站配置多根天线. TSMA 缺少对多天线系统的可扩展性进行考虑, 进而没有充分发挥其在大规模机器通信系统中的优势. 而多用户多输入多输出 (multi-user multi input and multi output, MU-MIMO) 技术能够在基站端配置多根天线将空间划分为多个波束, 并在每个波束内叠加多个用户, 可以实现资源的进一步复用, 以获得更高的系统容量<sup>[30]</sup>. 因此将多天线技术应用在 TSMA 中能够进一步缓解频谱资源的短缺问题, 从而更好地应用在 B5G 以及 6G 中大规模机器通信场景. 然而, 多天线技术的加入也带来了新的挑战, 因为它必须有效地协调波束与非正交资源间的利用, 这需要研究应用在多天线串联扩频系统中行之有效的用户识别以及数据检测方案。

目前, 针对多天线串联扩频多址技术的研究已取得相应的进展. 该方案通过在基站端配置多根天线, 将空间划分为多个波束, 随后将全体用户按照相应波束进行分组, 不同组内的用户共用一套 TSMA 中串联扩频码本, 使得系统在同等的频谱资源下能够支持更多的连接用户, 以进一步提升频谱效率, 多天线 TSMA 的系统模型如图 7 所示. 在多天线 TSMA 中需要额外识别出用户所在的组才可对用户进行有效识别, 因此 TSMA 中通过能量检测的方式进行用户识别将不再适用, 多天线 TSMA 技术采用阵列信号处理与串联扩频码本相联合的方式对用户进行识别. 另外, 多天线 TSMA 需要对使用同一串联扩频组合的不同组的激活用户数据进行区分, 使得用户数据顺利恢复。

## 5 串联扩频多址技术应用进展

### 5.1 面向高速铁路的 TSMA

如前所述, TSMA 技术作为一种基于正交扩频和冗余编码的免授权多址技术, 其三大技术特点为连接用户容量大、数据传输可靠性强、数据传输速率小, 这恰与高速铁路物联网的需求相吻合. 为此, 将 TSMA 技术应用于高速铁路物联网中以使能智慧铁路的全面感知具有较大潜力. 然而, 高速铁路环境具备特有的通信特征, 如由列车快速移动带来的多普勒 (Doppler) 频移明显、信道快变等, 这也

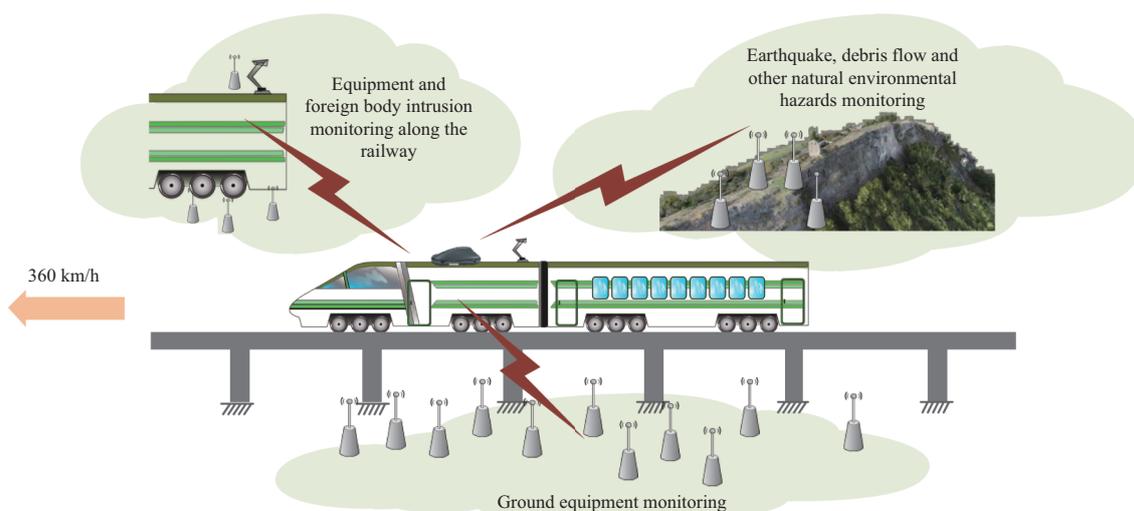


图 8 (网络版彩图) 高速铁路大规模机器类通信场景  
Figure 8 (Color online) mMTC for high speed railway

为 TSMA 技术在该场景中的应用提出了挑战. 在本节中, 笔者分别从服务场景、主要挑战和解决方案等方面对 TSMA 技术在未来高速铁路物联网中的应用进行了讨论和分析.

### 5.1.1 服务场景

在铁路 5G (5G-railway, 5G-R) 等先进通信技术的赋能下, 高速铁路正逐步向智慧铁路演进. 智慧铁路中有 4 大服务场景, 分别为: 铁路安全类服务、铁路非安全类服务、旅客服务和物联网服务<sup>[31]</sup>. 铁路物联网服务的含义为, 通过铁路装备上部署的大量物联网设备使能列车对自然环境、铁路线路和铁路基础设施进行全面感知, 辅助列车开展智能决策. 当前, 基于物联网技术建设智能化铁路正受到国内外科研和工程领域的关注, 这在中国、欧盟、法国、日本等国家和地区的铁路发展规划中均有提及<sup>[32]</sup>. 联想到 5G 中提出的 mMTC 场景, 在 5G-R 中大规模物联网技术可以为智慧铁路提供更大的物联网设备容量、更高的通信可靠性和更强的铁路运营安全保障, 其通信模型如图 8 所示. 下文将进行 TSMA 技术在该场景的应用探讨.

### 5.1.2 主要挑战

- 铁路专网频谱稀缺. 受限于稀缺的频谱资源, 5G-R 无法给大规模的连接用户分配相应的无线电资源使其可以随时激活并接入, 极易导致激活用户的解码失败.
- 列车高速移动产生的多普勒频偏及信道快速时变会对 5G-R 大规模物联网系统的接入可靠性产生影响.
- 基于 TSMA 进行免授权随机接入时基站与用户之间缺乏协作, 因此基站接收到的数据包都是匿名的, 需要在以上两挑战基础上实现可靠的用户识别和数据恢复.

针对以上挑战, 应考虑高速铁路的移动特性和信道特性, 进行多普勒频移和信道快变对系统性能的影响评估, 并根据其改进 TSMA 收发机设计, 以实现 TSMA 在该场景的有效应用.

### 5.1.3 多载波 TSMA 方案

笔者在文献 [33] 中基于正交频分复用 (orthogonal frequency time multiplex, OFDM) 提出了多载

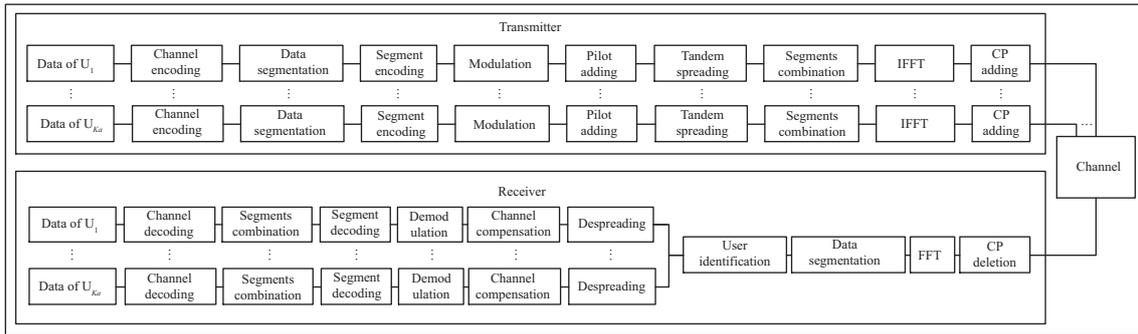


图 9 MC-TSMA 系统架构

Figure 9 System architecture of MC-TSMA

波 TSMA 方案 (multi-carrier TSMA, MC-TSMA), 并研究了 TSMA 的高速适应性. 特别地, 分析了多普勒频移和时变信道的影响对 TSMA 方案的影响, 并分别对资源映射、用户识别等模块进行了改进设计. MC-TSMA 方案的系统架构如图 9 所示.

#### (1) TSMA 方案高速适应性改进.

(i) 资源映射方案. MC-TSMA 利用多载波进一步提升了系统用户容量, 并在每个子载波中进行串联扩频码本的复用, 多个用户可以在同一时间复用同一子载波, 即每个子载波可以服务  $C$  个用户,  $N$  个子载波便可支持  $NC$  个用户的连接数. 接下来用户在各自所分配的子载波上执行 TSMA 方案, 其在其余子载波上的映射值均为 0.

(ii) 信道特性和数据设计. MC-TSMA 基于瑞利 (Rayleigh) 信道模型进行方案设计. 此外, 为保证串联扩频/解扩的有效性, MC-TSMA 对于一个扩频后的数据段来说, 其中各码片所经历的信道衰落是近似相同的. 为此, MC-TSMA 根据该场景的相干时间长度进行了数据结构设计. 此外, 为在免授权接入模式下实现有效的数据接收, MC-TSMA 在各数据段前分别放置了导频序列, 接收端可利用其进行信道估计和信道均衡. 与此同时, 为了实现有效的频域均衡, 各用户在最终发射的数据段前添加循环前缀, 循环前缀的长度大于系统中各用户接入的最大时延.

(iii) 多普勒频移的影响与子载波间干扰估计. 列车高速移动带来的多普勒频移会影响图 9 中接收机的 FFT 采样准确性, 进而产生子载波间干扰 (inter carrier interference, ICI). 基于上述的资源映射方案, 此时 ICI 呈现的特征为某一子载波受到的干扰主要来自相邻子载波, 其余子载波对该子载波的影响可以忽略. 为此, MC-TSMA 根据列车移动速度和载频大小、各个子载波上用户激活数目和信道的统计特性确定这一干扰的能量均值, 以进行接收机方案改进.

(iv) 用户识别改进方案. 在用户识别中, 接收机根据所推知的子载波间干扰上界, 修改能量检测时的判决门限, 以降低系统的漏检概率. 此外, 由于各段均有可能遭遇深衰落, 基于全部数据段进行用户识别易导致用户识别失败. MC-TSMA 根据 TSMA 的编码原理, 提出了利用少数几段进行用户识别的接受策略, 亦可进一步降低系统漏检概率. 然而, 当用户激活概率较大时, 利用少数几段进行用户识别也将产生较大的虚警概率, 这可以通过增加冗余段数加以解决.

(2) MC-TSMA 方案的不足. 所提的 MC-TSMA 方案与假设接收端具备完美的信道状态信息 (channel state information, CSI) 的方案相比, 仍有较大的性能差异, 这是因为所提方案仍有以下不足.

(i) 信道均衡准确性不足. 纵使可以通过数据结构设计使得某一数据段扩频后的码片的时间长度处于信道相干时间内, 但若其中各码片经历的信道衰落并不是完全相同的, 为各段仅提供一个用于信

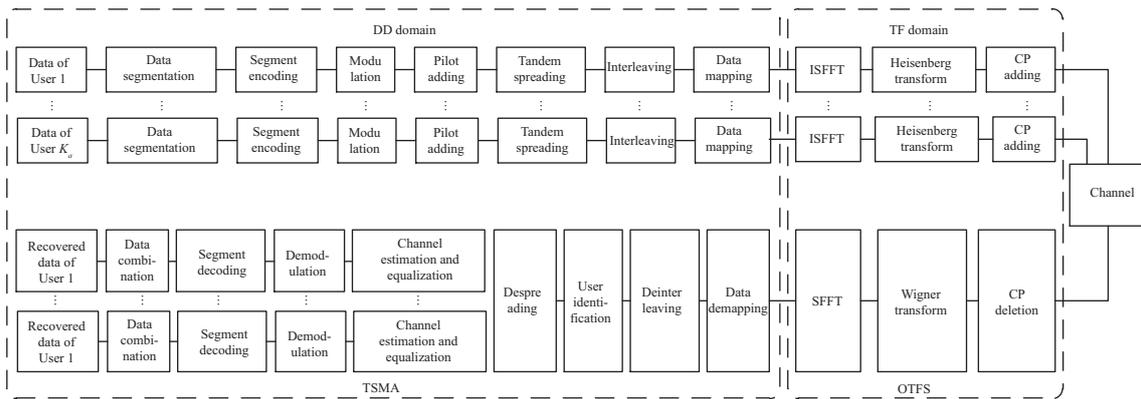


图 10 OTFS-TSMA 系统架构

Figure 10 System architecture of OTFS-TSMA

道均衡的前导序列易导致信道均衡的准确性不足. 这可以通过离散化导频布置加以改进, 但也将带来较大的时间资源开销、产生较大的导频负载.

(ii) 子载波间干扰带来的性能下降仍然存在. 虽然 MC-TSMA 可以利用子载波间干扰的能量值的统计特性改进用户识别的性能, 但并未设计子载波间干扰的消除方案, ICI 对用户数据恢复性能的影响仍然存在, 尤其是当某一子载波激活用户数目较多对相邻子载波产生的干扰较大时. 更深层次的, 在免授权接入模式下匿名用户的识别和数据恢复是依次进行的, 若要接收机补偿某一用户受到的子载波间干扰, 需要利用接收数据估计得到所有用户的多普勒频移值; 对于某一用户来说, 其数据已被来自相邻子载波的用户污染, 难以做到准确的多普勒频移值估计; 一种思路为通过修改资源映射方案来减轻 ICI, 如将用户映射于相隔子载波上, 但这也降低资源利用效率.

为此, 需要设计更为适应高铁场景信道快变和子载波间干扰的 TSMA 方案.

#### 5.1.4 正交时频空 TSMA 方案

近来, 有研究者提出了 OTFS 调制方案, 该方案在时延多普勒 (delay Doppler, DD) 域刻画信道冲激响应 (channel impulse response, CIR) [34]. 通过这一操作, 时频域中快变的信道衰落在 DD 域中呈现出拟时不变特性. 与此同时, DD 域中的 CIR 是对信道散射环境的直观刻画, 在非富散射环境下 DD 域 CIR 还呈现出稀疏特性 [35], 这可以大大简化信道均衡过程, 也为应对高速移动场景中的信道快变提供了新的思路. 然而, DD 域的输出是输入与 CIR 的二维循环移位并受到相应信道衰落的影响, 这为在多用户非正交接入模式下如何实现准确的数据恢复提出了挑战.

已有研究提出了正交时频空 TSMA (orthogonal time frequency space TSMA, OTFS-TSMA) 方案, 其系统架构如图 10 所示. 该方案分别对 TSMA 进行了改进并将其与 OTFS 联合设计. 特别地, OTFS-TSMA 提出了与 DD 域输入输出关系和 TSMA 数据结构相适配的交织与解交织方案, 通过该方案 OTFS 中 DD 域元素的二维循环移位被转换为了多普勒元素、段、符号和码片的循环移位. 方案给出了 4 类循环移位相应的数据恢复方法, 从而减轻了用户干扰, 并实现了有效的用户识别和数据恢复.

(1) OTFS-TSMA 方案创新点.

(i) DD 域资源分配与用户分组. 在时频域中, 假设系统占用的时间资源为  $N$  个时间间隔  $T$ , 频域资源为  $M$  个子载波间隔  $\Delta f$ , 则离散化的时频域资源平面可以表示为  $\Gamma_{\text{TF}} = \{(\alpha T, \beta \Delta f)\}$ ,  $\alpha =$

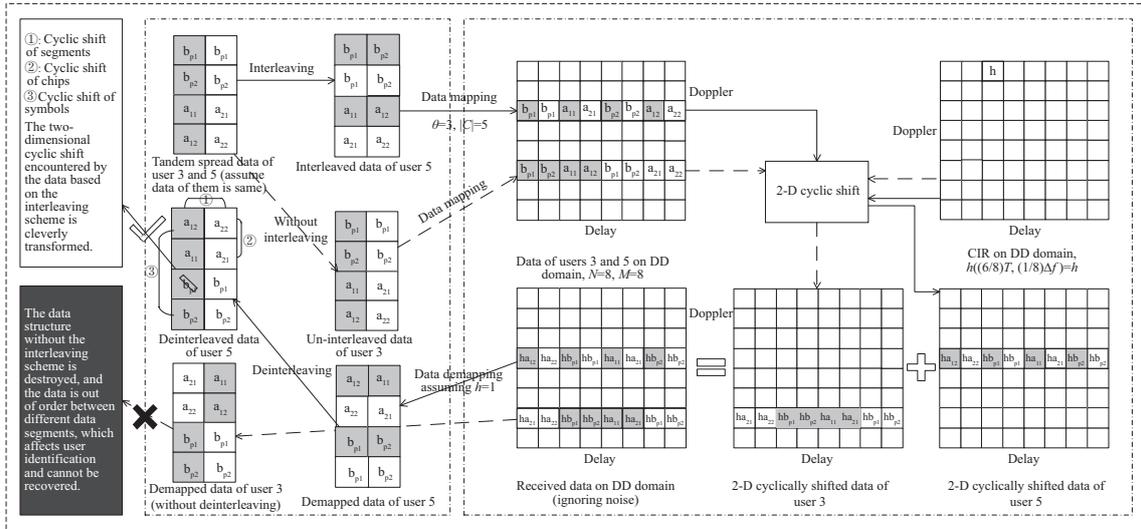


图 11 OTFS-TSMA 交织与解交织方案

Figure 11 Interleaving/de-interleaving scheme of OTFS-TSMA

$0, 1, \dots, N - 1, \beta = 0, 1, \dots, M - 1$ . 假设如图 8 所示的系统中上行链路最大时延小于  $T$ , 最大多普勒频移小于  $\Delta f$ , 则离散化的 DD 域资源平面可以表示为  $\Gamma_{DD} = \{(\frac{\mu}{NT}, \frac{\omega}{M\Delta f})\}$ ,  $\mu = 0, 1, \dots, N - 1, \omega = 0, 1, \dots, M - 1$ . 在如图 8 所示的系统中由于散射体数目有限, 可以假设每个用户的多径均为  $P$  个, 并假设各多径对应的多普勒值和时延值均可准确落在  $\Gamma_{DD}$  格点上. 基于此, OTFS-TSMA 考虑在多普勒域进行用户资源分配, 即用户在图 10 中的“数据映射”环节中将交织后得到的数据映射到其所分配的多普勒域元素上, 映射数据占据  $M$  个时延域元素格点, 如图 11 所示. 由于在 DD 域中 CIR 与 DD 域资源存在二维循环移位关系, 基于此种资源映射方案将使得某一多普勒元素上的用户数据被 CIR 移位至其他多普勒元素上, 即会产生多用户干扰 (multi-user interference, MUI). OTFS-TSMA 根据高速铁路场景中用户的最大多普勒频移  $\frac{\Theta}{NT}$  进行用户分组, 则每个用户组占用  $\frac{2\Theta}{NT}$  个多普勒元素格点, 系统共可支持的用户组数目为  $\lfloor \frac{N}{2\Theta} \rfloor$ . 通过此操作有效避免了组间用户干扰, 代价为一定程度上降低了多普勒域资源利用效率.

(ii) 交织与相应的数据恢复方案. 如图 11 所示, 在用户完成图 10 中的串联扩频环节后, 用户将把各扩频后符号中位次相同的码片依次排列得到交织后的数据, 此后将经过串并变换以进行数据映射. 在信道中, 该 DD 域数据将被 CIR 二维循环移位. 这里假设进行 Heisenberg 和 Wigner 变换时的收发波形满足双正交特性, 即用户的数据在某一 CIR 影响下仅会受到相同的 DD 域信道衰落和二维循环移位的影响 [33]. 注意到交织可使得隶属于同一符号扩频序列的码片的间隔是固定的, 经过循环移位后接收机可按照这一固定间隔把各码片依次摆放至原位置的扩频序列中. 如图 11 所示, 假若没有经过交织/解交织, TSMA 的数据结构将被完全破坏且很难恢复; 而此交织/解交织方案可以把 DD 域数据的二维循环移位转化为了 TSMA 的段、符号和扩频后符号内码片的循环移位.

此后, OTFS-TSMA 针对解交织数据中的段循环移位进行了 TSMA 码本的改进, 以实现不同用户串联扩频序列循环碰撞的段数目最小, 并设计了与段循环相对应的用户识别方案; 针对解交织数据中的符号循环移位进行了导频设计, 使得导频符号与其余符号相比具备更高的能量值以使得接收机能够准确定位导频位置恢复符号循环移位; 针对解交织数据中的码片循环移位, 采取了 DFT 矩阵中的序列进行 TSMA 的串联扩频, 这其中利用了 DFT 矩阵的循环正交特性以保证完美的序列相关检测和用

户识别. 然而码片循环移位也将为解扩后的符号带来额外的相位偏移, OTFS-TSMA 通过利用已经检测得知的段循环移位、符号循环移位的位数, 和码片循环移位的特性, 通过补偿统一了所有解扩后符号的相位偏移. 至此, OTFS-TSMA 通过交织/解交织方案及相应的段、符号、码片循环移位恢复策略, 巧妙地反解了大量激活用户数据的二维循环移位, 完成了用户识别和数据恢复.

值得一提的是, 当前反解 DD 域二维循环移位的主流方式为消息传递 (message passing, MP) 算法<sup>[35]</sup>. 对于单用户系统来说, 利用该算法的初衷为 DD 域信道具有稀疏性, 其可以基于迭代捕捉到高能量导频的位置以恢复用户数据, 但复杂度比 OTFS-TSMA 采取的基于序列相关检测的接收方案大的多. 与此同时, 对于类似于 OTFS-TSMA 的非正交多用户场景来说, 单纯利用 MP 算法难以有效区分多用户、多径信息, 需要借助功率域、码域或空域资源开展方案设计. 为此, OTFS-TSMA 亦是提供了一种在 OTFS 框架下额外利用码域开展低复杂度免授权非正交接入的解决方案.

(2) OTFS-TSMA 的不足. OTFS-TSMA 不仅能够服务于高速铁路物联网接入场景, 还利用 DD 域多径分集实现了比 TSMA 更高的可靠性. 然而, 现有的 OTFS-TSMA 方案也存在诸多不足, 例如: 当前的方案是基于收发波形满足双正交性假设的, 需要进一步研究在实际波形如矩形波下的 OTFS-TSMA 资源分配与收发方案; 当前 OTFS-TSMA 的 DD 域多径分集是通过设置固定长度的多普勒元素保护间隔来保证的, 这也造成了一定的资源开销, 接下来需要研究资源与性能间的权衡关系, 以牺牲一定的性能为代价来提高资源利用效率; 此外, 还可探索将 OTFS-TSMA 应用至其他高速场景中.

## 5.2 面向低轨卫星的 TSMA

受到高速铁路物联网场景的启发, 笔者所提出的 OTFS-TSMA 应当也可推广至其他高速移动场景中, 为此笔者开展了面向低轨卫星的 OTFS-TSMA 探索, 并针对其服务场景、主要挑战、研究思路等方面在本节中展开叙述.

如今非地面网络 (non-terrestrial networks, NTN) 在人类社会发挥着重要作用, 尤其是在导航、地面监测和通信服务方面. 近年来, 由于几家公司计划在低地球轨道 (low earth orbit, LEO) 上发射数千颗卫星, 例如 OneWeb 和 SpaceX, NTN 再次受到学界和产业界的关注以构建空天地一体化网络体系<sup>[36]</sup>. 基于 NTN 以使能地面 mMTC 场景及其演进是当前空天地一体化网络中的研究热点之一. 在 NTN 中, 航天器可用的轨道有多种, 包括高椭圆轨道 (high elliptical orbit, HEO) (400~50000 km)、地球静止轨道 (geostationary earth orbit, GEO) (35786 km)、中地球轨道 (medium earth orbit, MEO) (7000~25000 km) 和 LEO (300~1500 km)<sup>[37]</sup> 等, 不同轨道的覆盖和传输特性有所不同. 根据文献<sup>[38]</sup>, 3GPP Release 17 将开展窄带物联网 (narrow band Internet of Things, NB-IoT) 在 NTN 中应用的标准制定. 这将涉及到 NB-IoT 在物理层和更高层的协议修改, 例如降低传输带宽以提高上行信噪比 (signal noise ratio, SNR) 实现设备受限功率下的传输、为 mMTC 设备配备定向天线以获得传输增益等, 基于此可以实现功率等级为 23 dBm 的设备的低数据速率 GEO 卫星通信. 在候选轨道中, 由于 LEO 通信的路径损耗和传输延迟均小于 MEO 和 GEO, 其在连接地面功率受限的 mMTC 设备方面更具竞争力.

### 5.2.1 服务场景

根据 3GPP NTN 标准<sup>[37]</sup>, LEO 卫星使能的 mMTC 系统包括地面海量设备、卫星和地面网关 3 部分, 如图 12 所示.

在该模型中, LEO 卫星和 mMTC 设备之间的链路是服务链路, LEO 卫星和地面网关之间的链路是反馈链路. 卫星可以在透明或再生模式下工作. 在透明模式下, 卫星仅进行频率载波变换、滤波和放

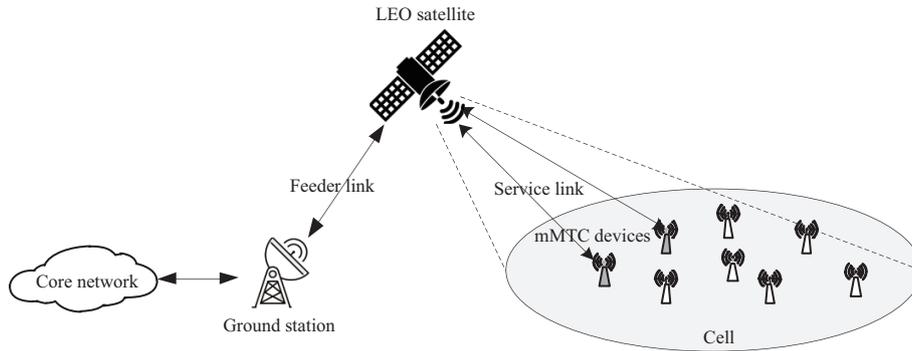


图 12 LEO 卫星使能的 mMTC 系统模型

Figure 12 mMTC over LEO satellite

大. 在再生模式下, 卫星额外对数据进行信号数字化处理, 包括解调/重调制、解码/重编码等. 由于在卫星上应用新型的空口协议难度较大, 本文假设卫星工作在透明模式下. 此外, 本文重点介绍上行接入过程, 即从设备到地面网关的链路. 在该过程中海量 mMTC 终端采用免授权接入模式, 系统的通信过程为: 当卫星靠近小区时将广播接入信令, 小区中有待传数据的用户在收到接入信令后将进入激活模式向 LEO 卫星发送数据; 卫星收到小区中用户的数据后将其转发至地面信关站, 随后管理者可以通过与信关站相连的核心网进行数据恢复和处理.

### 5.2.2 主要挑战

(1) 海量用户可靠接入需求. 当前应用于 NTN 的基于授权的多址技术有时分多址、频分多址、码分多址、物理随机接入信道等, 免授权的多址技术有 ALOHA、竞争解决分集时隙 ALOHA 等. 例如, Thuraya, AceS 和 Iridium 卫星系统采用了频分和时分多址; Odyssey 和 Glonass 系统采用了码分多址. 在 3GPP 5G-NR NTN R16 中仍是采用了 R15 中的物理随机接入信道的格式和前导序列进行随机接入 [37]. 基于授权的多址技术在设备和卫星之间的数据传输前有几轮交互, 这些交互是为设备访问和竞争解决而设计的. 3GPP 定义的 mMTC 场景用户连接密度为  $10^6$  个设备/ $\text{km}^2$ , 由于 LEO 卫星的波束直径大小为  $100\sim 1000$  km, 其内部可能有  $10^8\sim 10^9$  个设备. 面对如此大量的物联网设备, 基于竞争的上行多址接入过程将产生很大的资源开销, 且资源无法正交地分给用户. 为此, 需要在保证接入可靠性的前提下, 研究基于免授权的非正交多址接入技术以增加系统用户容量 [39].

(2) 多普勒频移和传输时延显著. LEO 卫星高速运动带来的多普勒频移效应明显. 根据文献 [40], 对于位于 ( $39^\circ\text{N}$ ,  $77^\circ\text{W}$ ) 的终端, 轨道高度为 1000 km 且倾角为  $53^\circ$  的卫星的最大归一化多普勒约为  $10^{-5}$ . 当载波频率为 2 GHz 时, 所产生的最大多普勒频移为 20 kHz. 由于严重的多普勒频移会引入载波间干扰降低系统性能, 研究者们已提出了各种多普勒估计方案 [41~43]. 多数多普勒估计器是基于地理信息或者前导数据的. 对于能够根据星历跟踪卫星的设备, 例如地面网关等, 其可以根据自身的多普勒频移曲线和位置信息来估计和补偿多普勒频移. 然而对于功率首先的 mMTC 设备来说, 其进行多普勒估计会增加系统复杂性并消耗额外能量 [44]. 因此需要考虑 mMTC 用户侧多普勒频移的共存, 中的多普勒频移可以在地面信关站处理. 此外, 对于小区内的任意两个用户来说, 其传输时延可以达到几十毫秒, 这便需要较长的时隙结构设计. 在 OTFS 调制中由于符号长度和子载波间隔互为倒数, 且符号长度应大于最大时延、子载波间隔应大于最大多普勒频移, 在显著的多普勒频移和传输时延下这二者难以被同时满足.

### 5.2.3 研究思路

OTFS-TSMA 在该系统中的优势有:

- 能够非正交地为海量用户分配资源, 实现稀缺频谱下的海量接入;
- 能够利用 DD 域信道特性, 在 DD 域进行资源分配以减轻时频域中子载波间干扰的影响.

与此同时, OTFS-TSMA 在面向 LEO 的 mMTC 系统中亟待解决的问题为显著多普勒频移和时延下的系统设计. 笔者提出可以利用差分多普勒或差分频移的思想来实现 OTFS 调制在该场景下的可行性. 具体而言, 可以在小区中选取一用户为参考用户, 其自身通信产生的传播时延和多普勒频移可以作为整小区用户的参考值, 随后地面信关站利用该用户的两个数据对整个系统中的用户进行相应的补偿. 如此一来, 绝对值较大的多普勒频移和时延可以被纳入相对较小的范围. 而这一范围的大小可以通过系统参数如小区大小、卫星高度、轨道倾角等进行灵活设置. 随后需要根据用户的地理位置计算其相对多普勒频移和相对时延的大小, 以供进行 DD 域资源分配和在卫星可见窗内特定时刻通信的时隙设计. 有关方案细节与性能分析仍在研究过程中.

## 6 结束语

物联网技术的蓬勃发展, 使得设备的连接数量爆炸式增长. 由于频谱资源的稀缺性, 加上免授权随机接入过程的引入使得接入过程缺乏协作, 容易造成传输失败. 因此, 有必要研究一种高效的多址技术来支撑未来大规模物联网设备接入.

本文系统地介绍了大规模机器通信的特点以及现有多址技术所存在的问题, 引出了一种新型的多址接入方案 TSMA, TSMA 通过引入段编码和串联扩频这两个独特的步骤, 能够以较低的复杂度实现海量的设备接入, 并且详细地介绍了 TSMA 收发机设计以及对其性能进行分析. 随后介绍了 TSMA 技术的一些研究进展, 包含异步 TSMA 技术和多天线的 TSMA 技术. 最后, 结合具体场景介绍了 TSMA 技术的应用进展, 包含面向高速铁路的 TSMA 和面向低轨卫星的 TSMA, 从而为实现未来的海量设备连接提供了有力支撑.

## 参考文献

- 1 Kishiyama Y, Benjebbour A, Nakamura T, et al. Future steps of LTE-A: evolution toward integration of local area and wide area systems. *IEEE Wirel Commun*, 2013, 20: 12–18
- 2 Borkar S, Pande H. Application of 5G next generation network to Internet of Things. In: *Proceedings of International Conference on Internet of Things and Applications (IOTA)*, Pune, 2016. 443–447
- 3 ITU-R. IMT 2020 vision — framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. 2015. [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-1!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-1!!PDF-E.pdf)
- 4 Ejaz W, Anpalagan A, Imran M A, et al. Internet of Things (IoT) in 5G wireless communications. *IEEE Access*, 2016, 4: 10310–10314
- 5 Guo F X, Yu F R, Zhang H L, et al. Enabling massive IoT toward 6G: a comprehensive survey. *IEEE Int Things J*, 2021, 8: 11891–11915
- 6 3GPP. Feasibility Study on New Services and Markets Technology Enablers. TR 22.891, 2016
- 7 ITU. Technical and operational aspects of low-power wide-area networks for machine-type communication and the Internet of Things in frequency ranges harmonised for SRD operation. 2018. [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2423-2018-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2423-2018-PDF-E.pdf)
- 8 TR 103 249. Low throughput network (LTN): use cases and system characteristics. ETSI, 2017. [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_tr/103200\\_103299/103249/01.01.01\\_60/tr\\_103249v010101p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/103200_103299/103249/01.01.01_60/tr_103249v010101p.pdf)

- 9 Bockelmann C, Pratas N, Nikopour H, et al. Massive machine-type communications in 5G: physical and MAC-layer solutions. *IEEE Commun Mag*, 2016, 54: 59–65
- 10 Azari A, Popovski P, Miao G W, et al. Grant-free radio access for short-packet communications over 5G networks. In: *Proceedings of IEEE Global Communications Conference*, Singapore, 2017. 1–7
- 11 Ding Z G, Lei X F, Karagiannidis G K, et al. A survey on non-orthogonal multiple access for 5G networks: research challenges and future trends. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2017, 35: 2181–2195
- 12 Liu X Q, Chen H H, Peng M G, et al. Identical code cyclic shift multiple access — a bridge between CDMA and NOMA. *IEEE Trans Veh Technol*, 2020, 69: 2878–2890
- 13 Dai L L, Wang B C, Yuan Y F, et al. Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends. *IEEE Commun Mag*, 2015, 53: 74–81
- 14 Tao Y Z, Liu L, Liu S, et al. A survey: several technologies of non-orthogonal transmission for 5G. *China Commun*, 2015, 12: 1–15
- 15 Li P, Liu L H, Wu K Y, et al. Interleave division multiple-access. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2006, 5: 938–947
- 16 Hu S, Yu B, Qian C, et al. Nonorthogonal interleave-grid multiple access scheme for industrial Internet of Things in 5G network. *IEEE Trans Ind Inf*, 2018, 14: 5436–5446
- 17 Nikopour H, Baligh H. Sparse code multiple access. In: *Proceedings of the 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, London, 2013. 332–336
- 18 Zeng J, Li B, Su X, et al. Pattern division multiple access (PDMA) for cellular future radio access. In: *Proceedings of International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP)*, Nanjing, 2015. 1–5
- 19 Yuan Z F, Yu G H, Li W M, et al. Multi-user shared access for Internet of Things. In: *Proceedings of the 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Nanjing, 2016. 1–5
- 20 Bockelmann C, Schepker H F, Dekorsy A. Compressive sensing based multi-user detection for machine-to-machine communication. *Trans Emerg Tel Tech*, 2013, 24: 389–400
- 21 Miridakis N I, Vergados D D. A survey on the successive interference cancellation performance for single-antenna and multiple-antenna OFDM systems. *IEEE Commun Surv Tut*, 2013, 15: 312–335
- 22 Arora S, Daskalakis C, Steurer D. Message-passing algorithms and improved LP decoding. *IEEE Trans Inform Theor*, 2012, 58: 7260–7271
- 23 Ma G Y, Ai B, Wang F G, et al. Tandem spreading network-coded division multiple access. *IEEE Trans Ind Inf*, 2017, 13: 390–398
- 24 Ma G Y, Ai B, Wang F G, et al. Coded tandem spreading multiple access for massive machine-type communications. *IEEE Wirel Commun*, 2018, 25: 75–81
- 25 Plank J S, Huang C. Tutorial: erasure coding for storage applications. In: *Proceedings of the 11th Usenix Conference on File and Storage Technologies*, 2013
- 26 Katz J, Menezes A J, van Oorschot P C, et al. *Handbook of Applied Cryptography*. Boca Raton: CRC Press, 1996
- 27 Bell J F, Farebrother R W. Linear least squares computations. *J R Stat Soc Ser (Stat Soc)*, 1989, 152: 261
- 28 Ma G Y, Ai B, Wang F G, et al. Coping with chip-level asynchronicity of coded tandem spreading multiple access for massive machine-type communications. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, Shanghai, 2019. 1–6
- 29 Wang X, Liu X Q, Chen H H, et al. Complementary coded CDMA systems with CP-free OFDM. *IEEE Trans Veh Technol*, 2020, 69: 11515–11528
- 30 Choi L U, Murch R D. A transmit preprocessing technique for multiuser MIMO systems using a decomposition approach. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2004, 3: 20–24
- 31 Ai B, Molisch A F, Rupp M, et al. 5G key technologies for smart railways. *Proc IEEE*, 2020, 108: 856–893
- 32 Li P, Shao S, Xue R, et al. Research on the development trend of digitalization and intelligence of foreign railways. *Chin Railways*, 2019, 2: 25–31 [李平, 邵赛, 薛蕊, 等. 国外铁路数字化与智能化发展趋势研究. *中国铁路*, 2019, 2: 25–31]
- 33 Ma Y Y, Ma G Y, Ai B. Multicarrier tandem spreading multiple access (MC-TSMA) for high-speed railway (HSR) scenario. *IEEE Int Things J*, 2021, 8: 3490–3499
- 34 Hadani R, Rakib S, Tsatsanis M, et al. Orthogonal time frequency space modulation. In: *Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, San Francisco, 2017. 1–6

- 35 Raviteja P, Phan K T, Hong Y. Embedded pilot-aided channel estimation for OTFS in delay-doppler channels. *IEEE Trans Veh Technol*, 2019, 68: 4906–4917
- 36 Shen X M, Cheng N, Zhou H B, et al. Space and space integrated network technology: exploration and prospects. *Chin J Int Things*, 2020, 4: 3–19 [沈学民, 承楠, 周海波, 等. 空天地一体化网络技术: 探索与展望. *物联网学报*, 2020, 4: 3–19]
- 37 3GPP. Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN) (Release 16). TR 38.821 v16.0.0, 2019
- 38 Liberg O, Lowenmark S E, Euler S, et al. Narrowband Internet of Things for non-terrestrial networks. *IEEE Comm Stand Mag*, 2020, 4: 49–55
- 39 Yan X J, An K, Liang T, et al. The application of power-domain non-orthogonal multiple access in satellite communication networks. *IEEE Access*, 2019, 7: 63531–63539
- 40 Ali I, Al-Dhahir N, Hershey J E. Doppler characterization for LEO satellites. *IEEE Trans Commun*, 1998, 46: 309–313
- 41 You M H Y, Lee S P L, Han Y H. Adaptive compensation method using the prediction algorithm for the doppler frequency shift in the LEO orbit mobile satellite communication system. *ETRI J*, 2000, 22: 32–39
- 42 Lin J N, Hou Z W, Zhou Y Q, et al. Map estimation based on doppler characterization in broadband and mobile LEO satellite communications. In: *Proceedings of the 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Nanjing, 2016. 1–5
- 43 Liu Y J, Zhu X, Lim E G, et al. High-robustness and low-complexity joint estimation of TOAs and CFOs for multiuser SIMO OFDM systems. *IEEE Trans Veh Technol*, 2018, 67: 7739–7743
- 44 Kodheli O, Andrenacci S, Maturo N, et al. An uplink UE group-based scheduling technique for 5G mMTC systems over LEO satellite. *IEEE Access*, 2019, 7: 67413–67427

## Research progress of new multiple access technique for B5G/6G massive machine-type communication systems

Jiming DAI, Guoyu MA<sup>\*</sup>, Yiyang MA, Zhen XUE & Bo AI

*State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*

<sup>\*</sup> Corresponding author. E-mail: magy@bjtu.edu.cn

**Abstract** Massive machine-type communication (mMTC) is one of the three major application scenarios of the 5th generation mobile communication system and a significant technique supporting the fourth industrial revolution in the future. It mainly deploys numerous machine-type devices to realize an intelligent society. Due to the low power consumption requirements, people have introduced grant-free random access to reduce the signaling interaction between the device and the base station. Coupled with the lack of radio resources, achieving grant-free random access for massive devices has become a challenge, which will become more significant in B5G and 6G. Therefore, it is necessary to develop an effective multiple access technique. Tandem spreading multiple access (TSMA) is a novel non-orthogonal multiple access technique that realizes the efficient connection of massive machine-type devices and can achieve high connectivity and reliability with low complexity. This article first summarizes the characteristics of mMTC and the research status of multi-access techniques. Then, the transceiver design and the performance trade-off analysis of the TSMA technique are introduced. Finally, the research and application progress of the TSMA technique are discussed.

**Keywords** mMTC, NOMA, TSMA, B5G, 6G