



研究与开发

# HSM：支持6G密集部署和高速移动性场景的新型网络架构

李国庆<sup>1</sup>, 王培博<sup>2</sup>, 谌丽<sup>3</sup>, 胡博<sup>2</sup>, 陈山枝<sup>1</sup>

(1. 中国信息通信科技集团有限公司无线移动通信全国重点实验室, 北京 100083;

2. 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室, 北京 100876;

3. 中信科移动通信技术股份有限公司, 北京 100083)

**摘要:** 5G超密集网络 (ultra-dense network, UDN) 的引入是为了提升吞吐量, 特别是针对静态和低速场景, 因此, 无法同时满足高吞吐量和高移动速度的需求。对于未来需要同时支持高容量和高速移动的6G新场景, 提出一种同心圆模型 (homocentric sphere model, HSM) 的网络架构, 采用控制面/用户面数据分离、多发送接收节点 (transmission and reception point, TRP) 协同传输的方法来处理密集部署网络中多普勒效应影响大和TRP频繁切换的问题, 使得该模型成为密集部署网络下提升网络容量、应对高速移动的有效方法。数据结果证明, 所提的HSM有效减小了密集组网高速移动场景下多普勒频移效应, 同时能够提供更高的网络遍历频谱效率。

**关键词:** 超密集组网; 高速移动; 6G; 多普勒频移; 发送接收节点切换; 控制面/用户面数据分离

**中图分类号:** TN195.02

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-0801.2025015

## Homocentric sphere model: a novel network architecture supporting 6G dense deployment and high-speed mobility scenarios

LI Guoqing<sup>1</sup>, WANG Peibo<sup>2</sup>, CHEN Li<sup>3</sup>, HU Bo<sup>2</sup>, CHEN Shanzhi<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Wireless Mobile Communication, China Information and Communication Technologies Group Co., Ltd., Beijing 100083, China

2. State Key Laboratory of Network and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

3. China Information and Communication Technology Mobile Communication Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China

**Abstract:** 5G ultra-dense network (UDN) was introduced to improve throughput, especially for static and low-speed scenarios, and thus cannot meet the demands that require high throughput and high mobile speed at the same time. For

收稿日期: 2024-10-17; 修回日期: 2024-12-10

通信作者: 王培博, wangpeibo@bupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61931005)

**Foundation Item:** The National Natural Science Foundation of China (No. 61931005)



the new 6G scenarios that need to support both high-capacity and high-speed mobility in the future, a homocentric sphere model (HSM) network architecture was proposed, which adopted the control-plane/user-plane data separation and multiple transmission and reception point (TRP) cooperative transmission method to deal with the problem in densely deployed networks. The HSM was an effective method to improve the network capacity and cope with high-speed mobility in dense deployment networks by adopting control-plane/user-plane data separation and multiple TRP co-transmission to deal with the problems of high Doppler frequency shift effect and frequent switching of TRP in the dense deployment networks. The results demonstrate that the proposed homocentric sphere model can effectively reduce the Doppler shift effect in the high-speed mobility scenario of a densely organized network, and can provide higher network traversal spectrum efficiency.

**Key words:** UDN, high-speed mobility, 6G, Doppler frequency shift, TRP switch, control-plane/user-plane data separation

## 0 引言

5G场景特点可以概括为广覆盖、连续覆盖、大容量热点、海量连接、低功耗、低时延和高可靠性<sup>[1-3]</sup>。为了支撑5G场景的上述特点,文献[4-5]表明增加接入点的密度是提高系统吞吐量最有效的途径。因此,业界在5G时代引入了超密集组网(ultra-dense network, UDN)的概念<sup>[6-8]</sup>,这种网络通过增加基站密度等方式,极大地提高了信号覆盖范围和数据传输速率,尤其针对静态和低速场景有更显著的效果。此外,UDN及其进一步演进的以用户为中心的超密集组网<sup>[9]</sup>(user-centric ultra dense network, UUDN)以减少切换频率、提高吞吐量等特征,成为提高5G系统容量的关键技术。随着通信系统的不断迭代,在6G中有许多新的场景,这些场景需要同时支持高吞吐量/数据速率和高速移动,如高速铁路、滑雪比赛的现场表演、自动驾驶中的增强现实/虚拟现实(augmented reality/virtual reality, AR/VR)等<sup>[10]</sup>。高速列车上的乘客服务场景中,有直接连接列车外发送接收节点(transmission and reception point, TRP)和通过中继节点接入2种方案,采用中继设备在物理层传输性能和群组切换方面更具优势,该场景对移动速度、用户密度、下行吞吐量和端到端时延等也有相应要求;滑雪比赛高

清直播场景中,运动员移动速度快,需要密集部署TRP以提高吞吐量,但同时会导致覆盖范围减小、频繁切换等问题,对传输性能要求严格;公共交通、高速公路应用及自动驾驶场景中,车辆上的高数据速率服务不断涌现,地铁、公交车乘客会产生大量数据需求,且移动速度和用户密度各异,不同场景对下行吞吐量、端到端时延等有不同的要求。因此,同时支持高速和密集部署已成为现实中的迫切需求。

在上述场景中,需要同时支持高速移动和密集部署(high speed and dense deployment, HS&DD)的特性,这对无线网络的设计提出了新的挑战。

(1)在高速运动过程中,多普勒效应叠加在多径效应上,快速衰落变得更加严重,使得码间干扰进一步恶化。通常需要降低符号传输速率来对抗较差的符号间干扰(inter-symbol interference, ISI),然而,这与高数据速率/吞吐量的要求相矛盾。

(2)高数据速率/吞吐量的需求要求使用多载波传输技术。多普勒效应会导致载波间正交性的恶化,并引入严重的载波间干扰,从而降低接收性能。

(3)在HS&DD场景下,乒乓切换、切换失败、频繁切换造成的信令开销等问题将更加严重。吞吐量提高和移动性管理之间的矛盾将成为

重要的问题。

面对上述挑战,已有学者研究了一种以用户为中心接入网的形式<sup>[11-12]</sup>,这种网络架构的优势在于可以动态组织 TRP 组同时为用户设备 (user equipment, UE) 服务,也减少了切换效应。另外,在多天线技术的设计上,也有学者提出了一种以用户为中心的无蜂窝大规模多输入多输出 (multiple input multiple output, MIMO) 的概念<sup>[13]</sup>,旨在利用多点协同传输的方式提升系统容量。但实际上,这些研究可能涉及一些多点协同传输的特征,但并未对基于多普勒频移效应的切换进行分析,这在密集组网的高速移动场景是十分重要的。另外,已有标准采用导频估计的方法,获取导频的信道响应信息后,采取插值方法来获取数据位置的信道信息<sup>[14]</sup>。在高铁场景下,有研究借助历史数据,通过深度学习的方法,进行频偏估计,从而在发射端进行多普勒频偏补偿<sup>[15]</sup>。除了地面高速移动性场景,卫星的高速移动同样也会产生严重的多普勒频移效应,有学者针对卫星的多普勒频移与补偿进行了研究<sup>[16-18]</sup>。但是,这些研究忽略了多点协同传输时的多普勒频移效应分析。因此,同时结合密集组网场景下的高速移动性和多点协同传输特征分析多普勒频移效应,是亟待分析的。

本文针对 HS&DD 场景提出了一种新的设计思路,并在第 2 节提出了同心圆网络架构模型。该模型具有如下两大特征。

(1) 控制面 (control plane, CP) / 用户面 (user plane, UP) 分离。这种分离方式具有灵活性、高效性、可靠性和开放性等特点。这使得网络部署和功能扩展更加灵活,资源利用和业务处理更加高效,故障隔离性好且易于实现冗余备份,接口标准化便于集成第三方服务,为用户提供个性化服务,同时也便于运营商管理。

(2) 多点协同传输。这种传输方式通过快速切换与协作以及动态跟踪与调整,确保用户设备

在高速移动中保持稳定连接,同时可以有效地对抗多普勒效应。基于多点协同传输的资源动态分配和联合传输与接收满足高数据速率需求,还可凭借冗余备份与容错以及快速恢复与重连机制等提高系统可靠性。因此,本文提出的同心圆模型 (homocentric sphere model, HSM) 为 6G UDN 和高速移动场景提供了更好的解决方案。

本文的数学符号定义见表 1。

表 1 本文的数学符号定义

| 数学符号                | 释义                             |
|---------------------|--------------------------------|
| $ \cdot $           | 绝对值                            |
| $\ \cdot\ $         | 欧几里得范数/L2 范数                   |
| $C_r$               | 复数实部                           |
| $CN(\mu, \sigma^2)$ | 期望 $\mu$ 、方差 $\sigma^2$ 的复高斯分布 |
| $\overline{ab}$     | 从 $a$ 到 $b$ 坐标的向量              |
| $E$                 | 数学期望                           |

## 1 高速移动&密集部署系统模型

考虑一个下行链路高速移动场景,具体可以表示为有一辆运动速度为  $v$  的高铁,轨道的两侧均匀分布着  $M$  个 TRP,所有 TRP 到铁轨的距离相同。TRP 和铁轨之间可能会被某些障碍物阻挡,包括建筑物和树木。在列车顶部建立移动中继,可以避免较大的信号穿透损失,列车内的 UE 与移动中继建立连接。UE 与移动中继之间的链路几乎是稳定的,对于下行传输而言,移动中继仅做链路中继使用。本文考虑下行信号传输的接收点对于移动中继和 UE 是等效的,单天线的 TRP 和 UE 具有各向同性的特征。

笛卡儿坐标系的原点为  $S_O=[0,0,0]^T$ ,第  $m$  个 TRP 的位置为  $S_{TRP}^m=[x_{TRP}^m, y_{TRP}^m, z_{TRP}^m]^T$ ,因此,铁轨沿线所有 TRP 的位置为  $S_{TRP}=[S_{TRP}^1, S_{TRP}^2, \dots, S_{TRP}^m]^T$ 。UE 的位置为  $S_{UE}(t)=[x_0+v \cdot t, y_{UE}, z_{UE}]^T$ 。另外,假设可以使用预测信息提前获取信道状态信息,于是通信信道主要为直射链路  $h_d(t)$ ,表示 TRP 与 UE 之间的信道,包括直射径 (line of



sight, LoS) 和非直射径 (non-line of sight, NLoS) 部分。此外, 本文假设所提出的信道会经历块衰落。

### 1.1 从TRP到UE的直连链路

首先, 考虑直射链路  $h_d(t)$  的LoS部分。  $h_d(t)$  的信道增益可以表示为:

$$G(t) = \frac{\lambda}{4\pi d(t)} \quad (1)$$

其中,  $d(t) = \|\mathbf{S}_{\text{UE}}(t) - \mathbf{S}_{\text{TRP}}^m\|$ ,  $\lambda$  为载波波长。

考虑在时隙  $t \in \{1, \dots, T\}$  期间, TRP发射的宽带信号为:

$$s(t) = \sqrt{2} C_r \{x(t) \cdot e^{j2\pi f_c t}\} \quad (2)$$

其中,  $x(t) = x_r(t) + jx_i(t)$ ,  $E\{|s(t)|^2\} = 1$ ,  $f_c$  为载波频率。  $x_r(t)$  和  $x_i(t)$  表示带宽为  $\frac{B}{2}$  的基带信号, 其中,  $B \ll f_c$ ,  $j$  表示虚数单位。

另外, 定义直射链路的传播时延  $\tau(t)$  为:

$$\tau(t) = \frac{d(t)}{c} \quad (3)$$

其中,  $c$  为光速。于是, UE的接收信号可以表示为  $s(t - \tau(t))$ 。  $h_d(t)$  的LoS部分相位  $\varphi_d^{\text{LoS}}(t)$  可以表示为

$$\varphi_d^{\text{LoS}}(t) = e^{-j2\pi(f_c + f_{\text{DS}}(t))\tau} \quad (4)$$

其中,  $f_{\text{DS}}(t)$  为多普勒频移, 在第1.2节中将给出其表达式的推导。

将  $h_d(t)$  的NLoS部分  $\varphi_d^{\text{NLoS}}(t)$  考虑成一个遵循高斯分布  $\text{CN}(0, 1)$  的随机变量。按照文献[19]的规定, 可以为LoS和NLoS的部分配置瑞利系数  $Y_d(t)$ 。

$$Y_d(t) = 10^{0.1(\xi - \rho \cdot d(t))} \quad (5)$$

其中,  $\xi > 0$  和  $0 < \rho < 1$  为环境参数, 这种瑞利系数的配置需要视具体场景而定。对于NLoS情况, 参数  $\xi$  和参数  $\rho$  均可设置为0, 此时信道衰落需要由其他模型进行描述; 对于存在LoS的情况, 文献[19]建议配置的参考值为  $\xi = 13$ ,  $\rho = 0.03$ 。因

此, 参数  $\xi$  和参数  $\rho$  仅代表了LoS和NLoS存在的概率, 其具体取值取决于各种环境因素。于是,

LoS部分信道的归一化系数为  $\sqrt{\frac{Y_d(t)}{Y_d(t)+1}}$ , NLoS部分信道的归一化系数为  $\sqrt{\frac{1}{Y_d(t)+1}}$ 。因此,  $h_d(t)$  可以表示为:

$$h_d(t) = G(t) \left( \sqrt{\frac{Y_d(t)}{Y_d(t)+1}} \varphi_d^{\text{LoS}}(t) + \sqrt{\frac{1}{Y_d(t)+1}} \varphi_d^{\text{NLoS}}(t) \right) \quad (6)$$

因此, UE的接收信号  $y(t)$  可以表示为:

$$y(t) = \sqrt{P_{\text{TRP}}} (h_d(t) s(t - \tau(t))) + \omega(t) \quad (7)$$

其中,  $P_{\text{TRP}}$  是TRP传输功率,  $\omega(t)$  表示在时隙  $t$  中的加性白高斯噪声, 满足  $\omega(t) \sim \text{CN}(0, \sigma^2)$ 。

### 1.2 多普勒频移

假设UE的运动轨迹与TRP和UE连线的夹角为  $\theta$ , 且  $\theta$  随UE移动而变化, UE的移动轨迹与  $x$  轴平行,  $t_1$  时刻UE的坐标为  $\mathbf{S}_{\text{UE}}(t_1) = [x_0 + v \cdot t_1, y_{\text{UE}}, z_{\text{UE}}]^T$ ,  $t_2$  时刻UE的坐标为  $\mathbf{S}_{\text{UE}}(t_2) = [x_0 + v \cdot t_2, y_{\text{UE}}, z_{\text{UE}}]^T$ ,  $t_2 > t_1$ , 因此, 在  $t_1$  时刻  $\theta$  的余弦值可以表示为:

$$\cos\theta(t_1) = \frac{\overrightarrow{\mathbf{S}_{\text{UE}}(t_1)\mathbf{S}_{\text{TRP}}^m} \cdot \overrightarrow{\mathbf{S}_{\text{UE}}(t_1)\mathbf{S}_{\text{UE}}(t_2)}}{\left| \overrightarrow{\mathbf{S}_{\text{UE}}(t_1)\mathbf{S}_{\text{TRP}}^m} \right| \cdot \left| \overrightarrow{\mathbf{S}_{\text{UE}}(t_1)\mathbf{S}_{\text{UE}}(t_2)} \right|} = \frac{x_{\text{TRP}}^m - (x_0 + v \cdot t_1)}{\left\| \mathbf{S}_{\text{UE}}(t_1) - \mathbf{S}_{\text{TRP}}^m \right\|} \quad (8)$$

因此, 在任意  $t$  时隙内,  $\cos\theta$  可以表示为:

$$\cos\theta(t) = \frac{x_{\text{TRP}}^m - (x_0 + v \cdot t)}{\left\| \mathbf{S}_{\text{UE}}(t) - \mathbf{S}_{\text{TRP}}^m \right\|} \quad (9)$$

根据多普勒频移的定义, 波源在TRP处的发射频率  $f_c = \frac{c}{\lambda}$ ,  $c$  为光速,  $\lambda$  为载波波长。UE发生

移动时接收到的频率为  $f_r(t) = \frac{c + v \cdot \cos\theta(t)}{\lambda}$ ，因此，多普勒频移  $f_{DS}(t)$  表示为：

$$f_{DS}(t) = f_r(t) - f_c = \frac{v \cdot \cos\theta(t)}{\lambda} = \frac{v(x_{TRP}^m - x_0 - v \cdot t)}{\lambda \| \mathbf{S}_{UE}(t) - \mathbf{S}_{TRP}^m \|} \quad (10)$$

假设当  $\theta \in (\theta_T, \pi - \theta_T)$ ， $\theta_T < \frac{\pi}{2}$  时，多普勒效应是可以接受的。这里的“可接受”是指对抗或补偿多普勒效应引起的通信性能下降的成本是可接受的。因此，TRP 作为顶点，其与 UE 运动轨迹在夹角  $\theta_T$  和  $\pi - \theta_T$  的连线围成的区域被称作多普勒频移可接受区域 (acceptable areas of Doppler shift, AAoDS)，AAoDS 示意图如图 1 所示。

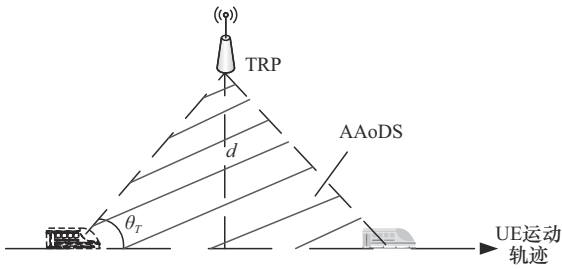


图 1 AAoDS 示意图

在 AAoDS 中，UE 对通信性能的影响足够小。当脱离 AAoDS，即  $\theta < \theta_T$  或  $\theta > \pi - \theta_T$  时，影响将变得不可接受，UE 需要切换到新的 TRP。在这种情况下，新 TRP 与 UE 的相对位置也应该满足  $\theta \in (\theta_T, \pi - \theta_T)$ ， $\theta_T < \frac{\pi}{2}$ ，即在新 TRP 的 AAoDS 中。基于该准则选择 TRP 可以避免多普勒效应导致的通信性能下降。

由于 AAoDS 通常是小面积高速的，为了保持 UE 的通信性能，UE 需要不断切换到下一个新 TRP 的 AAoDS。TRP 的部署越密集，UE 能够无缝切换到下一个 AAoDS 的可能性就越高，UE 与 TRP 之间在 AAoDS 内通信的概率就越大。当 TRP 密度以均匀方式部署超过一定

阈值时，UE 始终可以无缝切换到下一个 TRP 的 AAoDS。

在 AAoDS 的概念下，密集部署和高速移动不再是相互矛盾的。密集部署不仅可以提高通信吞吐量，而且可以有效地对抗多普勒效应带来的性能下降。

### 1.3 遍历频谱效率

考虑 TRP 传输功率为  $P_{TRP}$ ， $\sigma^2$  为附加噪声功率， $h_d(t)$  为所考虑的信道。因此，本文所提系统在时隙  $t$  的遍历频谱效率上界，根据 Jensen 不等式，受限子：

$$SE(t) = E \left\{ \text{lb} \left( 1 + \frac{P_{TRP}}{\sigma^2} |h_d(t)|^2 \right) \right\} \leq SE_{upper}(t) = \text{lb} \left( 1 + \frac{P_{TRP}}{\sigma^2} E \left\{ |h_d(t)|^2 \right\} \right) \quad (11)$$

其中：

$$E \left\{ |h_d(t)|^2 \right\} = (R_1^2(t) + R_2^2(t)) G^2(t) \quad (12)$$

$$\text{其中，} R_1(t) = \sqrt{\frac{Y_d(t)}{Y_d(t) + 1}}, R_2(t) = \sqrt{\frac{1}{Y_d(t) + 1}}。$$

## 2 HSM

基于 AAoDS 的 TRP 选择规则，AAoDS 中 UE 的持续时间将决定当前 TRP 在 TRP 合作集中的停留时间。AAoDS 的大小也会影响 TRP 切换频率，特别是当 UE 速率恒定时。当 AAoDS 较小或 UE 速率较高时，需要在很短的时间内完成 TRP 切换，这会导致信令开销、通信可靠性下降等问题。因此，为了解决这些问题，可以同时采用 CP/UP 分离和多 TRP 联合传输机制。这 2 种方式在理论上等效地将 AAoDS 的范围扩大化，从而提升了系统性能。

基于上述考虑，本文构建了一种支持高速密集组网的同心圆网络架构模型，HSM 示意图如图 2 所示。

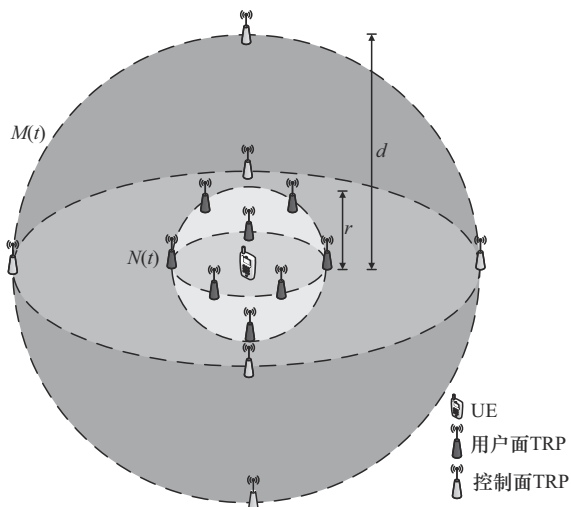


图2 HSM示意图

假设UE行动在一个自由空间， $N(t)$ 表示在时隙 $t$ 内可以提供UP数据服务的TRP组合， $M(t)$ 表示在时隙 $t$ 内可以提供CP数据服务的TRP组合。其中， $M(t)$ 构成HSM的外球体， $N(t)$ 构成内球体。在时隙 $t$ 内， $M(t)$ 和 $N(t)$ 共同为UE提供AAoDS，使得多普勒频移的影响最小化。当UE移动到新位置时， $M(t)$ 和 $N(t)$ 会被更新。 $N(t)$ 的半径为 $r$ ， $M(t)$ 的半径为 $d$ 。

## 2.1 CP/UP分离

UP数据是指由用户生成或最终呈现给用户的数据，可以认为是通过网络传输的有效载荷。CP数据是指网络自身产生的信令，如链路建立、维护、释放等信令，因此，可看作通信过程中的一种开销。在5G NR系统中，CP数据包括链路建立请求包、邻居小区测量配置包等内容，链路建立请求包大小通常为150~300 byte，邻居小区测量配置包大小一般为250~400 byte。因此，相较UP数据包要传递的大量音/视频流、文件下载数据等海量内容而言，其体量较小。另外，在稳定通信状态下，CP数据包传输间隔长达20~60 s，例如，在用户静置室内畅享高清视频流时，每隔约40 s接收基站广播的系统信息更新包（包含网络参数微调、新业务提示，约200 byte），或每60 s

发送维持链路存活的轻量级状态报告包（50 byte）。而UP数据包发送间隔需要依据具体业务进行灵活配置，在大部分大通量的业务场景中，发送间隔要远远小于CP数据包的发送间隔。例如，在720P分辨率、30帧率H.264编码视频通话场景下，为维持画面流畅连贯性，每33 ms发送一帧视频数据封装的UP数据包。所以，CP数据具有小而稀疏的特点，这要求CP数据的高优先级和高可靠性，特别是要求广播类型的信令覆盖范围广泛。UP数据依赖于业务和应用，在数据到达模式、传输速率、时延预算、可靠性等方面具有多样性和高弹性的特点。在点对点通信的模式中，不需要广泛的覆盖。

与HSM相对应，一般 $N(t)$ 的半径 $r$ 小于 $M(t)$ 的半径 $d$ ，且 $N(t)$ 的数量要大于 $M(t)$ ，形成2层球体的嵌套结构。在这种结构下，一个或者多个UP TRP与某个CP TRP通过光纤相连接，当UE发送上行搜索信号时，CP TRP负责接收，并向其管理的UP TRP发送用户数据传输请求，UP TRP接收到其对应的CP TRP的数据传输指令，向UE发送下行数据符号，因此，UE的切换过程只发生在CP TRP需要更新的时候，而CP TRP的覆盖范围要比UP TRP更广，所以，这种结构降低了TRP的切换频率，同时扩大了AAoDS的范围，从而减弱了多普勒频移对UP数据传输稳定性的影响。

实际部署HSM示意图如图3所示，传统的TRP部署模型中，CP、UP功能部署在同一个TRP上，这导致在计算多普勒频移 $f_{Ds}(t)$ 时， $\cos\theta(t)$ 的变化范围较大，AAoDS偏小，因此，不仅会导致 $f_{Ds}(t)$ 经历更频繁的变化，同时也会导致UE经历的 $f_{Ds}(t)$ 值在某一时刻偏大。在采用HSM之后，CP TRP和UP TRP进行功能拆分，而UE此时可只由CP TRP进行统一的多普勒频移管理，这就等效地将 $\cos\theta(t)$ 经历的变化范围变小，

AAoDS 也等效增大，同时 CP TRP 比 UP TRP 部署密度更小，从而既延长了多普勒频移  $f_{Ds}(t)$  的变化周期，又降低了移动性导致的多普勒频移  $f_{Ds}(t)$  的最大值。

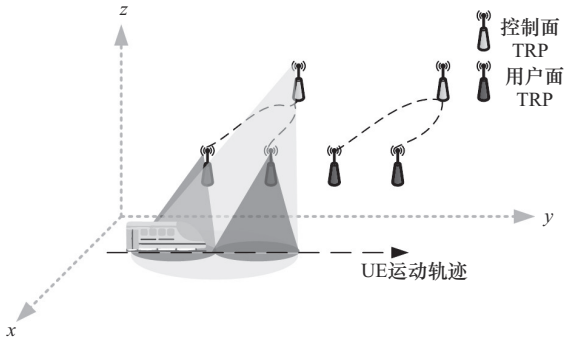


图3 实际部署HSM示意图

虽然  $M(t)$  的半径  $d$  比较大，但是在密集部署场景中，为了获得密集部署带来的速率和容量增益，UP TRP 与 UE 之间的距离必须比较小，即  $N(t)$  的半径比较小，这导致了 UP TRP 的频繁切换。因此，需要考虑利用多个 UP TRP 联合传输机制来解决这个问题。

### 2.2 多 TRP 协作传输

在 UE 高速移动场景中，如果 TRP 只由一个 TRP 进行数据传输服务，难以避免 TRP 频繁切换的问题，从而导致增加信令开销和中断概率，降低了通信的可靠性。多 TRP 联合传输可以有效地解决这个问题，即由 2 个或多个 TRP 同时向 UE 传输数据。UE 在切换到目的 TRP 的过程中可以保持与源 TRP 的连接，避免了切换 TRP 过程中的传输中断。当向 UE 发送数据时，参与联合传输的 TRP 可以进行相干传输，即使其中一个 TRP 传输解码失败，UE 也可以从另一个 TRP 接收到相同的数据。UE 也可以从多个 TRP 处分集接收数据。因此，多 TRP 联合传输可以有效地解决 TRP 频繁切换带来的问题，提高通信链路的可靠性和稳定性。网络中的密集部署也将有利于提高多 TRP 联合传输的利用率，以降低高移动性带来的负面影响。

与 HSM 相对应，多 TRP 联合传输可以同时应用于 CP TRP 和 UP TRP，特别是切换更为频繁的 UP TRP。本文考虑一种下行多 UP TRP 联合传输的场景，这些 UP TRP 由一个 CP TRP 统一管理，暂不考虑多 CP TRP 联合传输的场景。UE 由  $N(t)$  集合内所有 TRP 同时服务，此时 UE 的接收信号  $y(t)$  可重新表示为：

$$y(t) = \sqrt{P_{\text{TRP}}} \sum_{i=1}^{|N(t)|} (h_{d,i}(t) s_i(t - \tau_i(t))) + \omega(t) \quad (13)$$

### 2.3 HSM 与其他模型相比的优势

HSM 在高速移动场景下对多普勒频偏补偿具有显著优势。与以用户为中心接入网的方式相比，HSM 不仅通过动态组织 TRP 组减少切换效应，还采用 CP/UP 分离和多点协同传输的方法。其中，CP/UP 分离降低了 TRP 的切换频率，扩大了 AAoDS 的范围，减少了多普勒频移对 UP 数据传输稳定性的影响；多点协同传输提高了通信链路的可靠性和稳定性，解决了 TRP 频繁切换带来的问题<sup>[11-12]</sup>。与以用户为中心的大规模 MIMO 相比，HSM 除利用多点协同传输提升系统容量外，其独特的分层球体结构（由 CP TRP 构成外球体和 UP TRP 构成内球体）以及基于 AAoDS 的动态更新机制，能更好地适应高速移动场景。

同时，HSM 在考虑多普勒频偏补偿时，充分结合了密集组网场景下的特点。与其他一些多普勒频偏补偿模型（如采用导频估计方法的模型<sup>[13]</sup>、在高铁场景下借助历史数据和深度学习进行频偏估计的模型等<sup>[15]</sup>）相比，HSM 没有忽略多点协同传输时的多普勒频移效应分析，且考虑了 TRP 密集部署等因素。例如，在仿真中，HSM 通过合理设置不同 TRP 的半径和数量以及它们之间的连接方式，有效地解决了密集部署网络中的问题，并且在不同的协作 TRP 个数、环境参数、TRP 间距等条件下均表现出良好的性能，能明显降低多普勒频移效应，进而降低切换效应。



## 2.4 HSM 模型实现流程

HSM 实现流程如图4所示, 主要包括了3部分内容:

- (1) 系统初始化。
- (2) UE 移动中的信号处理。
- (3) TRP 协作传输决策。

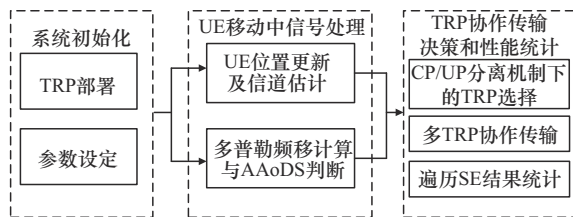


图4 HSM实现流程

在系统初始化部分, 需要依据场景的需求进行载波波长、时隙集合、TRP 传输功率、噪声功率、环境参数等参数设定, 同时将TRP按照一定的站间距和距离UE运动轨迹的距离撒点TRP。然后对移动中的UE进行信号处理, 主要包括UE位置更新及信道估计、多普勒频移计算和AAoDS判断。UE依据速度和初始位置坐标, 按照快照扫描速度更新UE位置坐标, 然后考虑信道状态等信息, 根据式(5)~式(7)计算UE的下行接收信号。根据式(8)~式(10)计算多普勒频移和判断UE与AAoDS的关系。最后, 在TRP协作传输决策部分, 另外, 根据式(11)和式(13)计算系统的遍历频谱效率性能指标, 同时统计TRP切换选择和多TRP协作传输的决策结果。

## 3 仿真结果与分析

在本节中, 提供仿真结果来验证第1节和第2节的分析结果。仿真场景示意图如图5所示, 设置了列车(UE分布在列车上, 在此处可与列车等效)行进轨道两侧有TRP分布, 默认TRP分布的站间距为100 m。为了进行多TRP性能测试, 主要考虑了5个TRP分布的情况, 除了TRP2的物理位置保持不变之外, 其他TRP的具体位置会

随TRP分布的站间距而变化。列车(即UE)沿x轴正向以360 km/h的行进速度匀速前进。另外, TRP的物理高度设置为20 m, 其传输功率设置为20 dBm。仿真场景采用的第三代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)标准的LoS与NLoS相结合的信道模型<sup>[19]</sup>, 收发机噪声设置为-80 dBm, 载波频率设置为2.4 GHz。

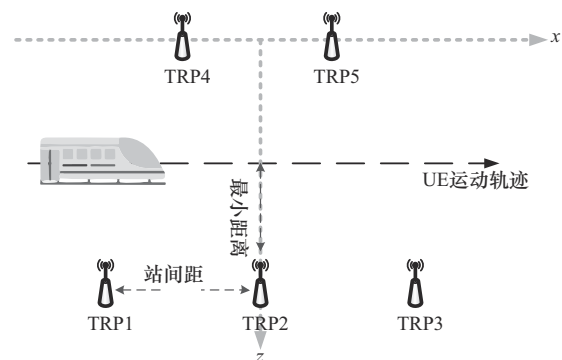


图5 仿真场景示意图

为了避免实验的偶然性, 仿真时采用了蒙特卡洛仿真法, 每次得到的仿真结果都经过了 $5 \times 10^3$ 次迭代计算。仿真参数见表2。除非另有说明, 否则默认情况下所有参数都设置为表2中的值。以下所有结果都基于2.50 GHz Intel i5-7300HQ CPU和16 GB RAM的硬件条件, 仿真环境使用MATLAB R2021a。

后文中的仿真结果表明了理论分析的正确性, 并证明HSM明显减少了多普勒频移效应,

表2 仿真参数

| 参数                    | 值                      |
|-----------------------|------------------------|
| TRP 间距                | 50 m、100 m、150 m       |
| UE 位置( $S_{UE}(t)$ )  | $[-250+vt, 2, 20]^T$ m |
| TRP 高度                | 20 m                   |
| UE 移动速度( $v$ )        | 360 km/h               |
| TRP 传输功率( $P_{TRP}$ ) | 20 dBm                 |
| 噪声( $\sigma^2$ )      | -80 dBm                |
| 载波频率( $f_c$ )         | 2.4 GHz                |
| 环境参数( $\zeta, \rho$ ) | 13, 0.03               |
| 仿真次数                  | $5 \times 10^3$        |

进而减小了切换效应。同时密集组网部署的协作 TRP 个数、环境参数、TRP 间距等均对 HSM 的性能有影响。

协作 TRP 个数和 TRP 分布随运动轨迹对遍历 SE 的影响（未加切换）如图 6 所示，为了探究参与协作的 TRP 个数以及 TRP 分布对系统性能的影响，绘制了在 UE 运动轨迹上任意时刻的遍历频谱效率。横轴表示 UE 运动距离，纵轴表示 UE 在运动过程中经历的遍历频谱效率。可以看到，UE 运动轨迹两侧协作的结果整体优于不做协作和 UE 运动轨迹同侧做协作的情况，同侧协作提升了边缘处 UE 的谱效，但也降低了峰值谱效。另外，UE 运动轨迹两侧 3TRP 协作性能要优于两侧 2TRP 协作的性能，同侧 3TRP 协作性能也要优于同侧 2TRP 协作的性能，这说明参与协作的 TRP 数量越多，性能越好，参与协作 TRP 数量与性能呈正相关。此处的结果未加在运动轨迹上的 TRP/协作 TRP 组切换。

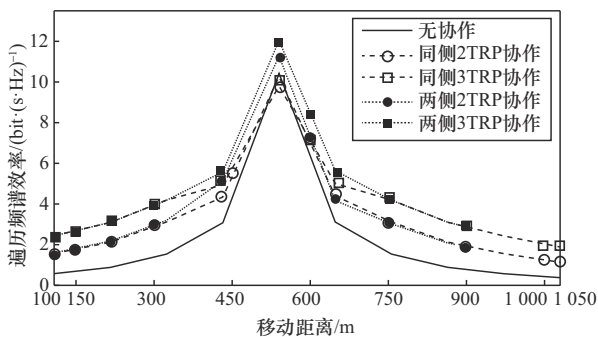


图6 协作 TRP 个数和 TRP 分布随运动轨迹对遍历 SE 的影响(未加切换)

协作 TRP 个数和 TRP 分布随运动轨迹对遍历 SE 的影响（加切换）如图 7 所示，在图 6 的基础上加了切换，并截取了 10 s 观测时间的 UE 运动轨迹。加了切换之后协作的数量不是固定值，而是给出协作 TRP 数量的上限。例如，实线代表无协作的情况，但在 UE 运动轨迹中，服务的 TRP 组合会随 UE 运动位置发生变化，在这里称作切换。同理，其他的曲线也表示了相应的变

化，例如，方块标记点线表示两侧 3TRP 协作情况，当 UE 运动到 [100,300] m 范围时，UE 仅由 TRP1 服务；当 UE 运动到 (300,400] m 范围时，UE 由 TRP1、TRP4 同时服务；当 UE 运动到 (400,450] m 范围时，UE 由 TRP1、TRP2、TRP4 同时服务；当 UE 运动到 (450,550] m 范围时，UE 由 TRP2、TRP4、TRP5 同时服务；当 UE 运动到 (550,600] m 范围时，UE 由 TRP2、TRP3、TRP5 同时服务；当 UE 运动到 (600,800] m 范围时，UE 由 TRP3、TRP5 同时服务；当 UE 运动到 (800,1 000] m 范围时，UE 仅由 TRP3 进行服务。结果显示，图 7 与图 6 得到了类似的趋势，两侧 TRP 协作的性能会相较基线整体提升，其中，UE 运动轨迹两侧 3TRP 协作会比两侧 2TRP 协作能够取得更大的频谱效率。另外，UE 运动轨迹同侧 2TRP 协作能提升 TRP 组边缘处的谱效，但同侧 3TRP 协作导致了部分性能下降。相较图 6 而言，图 7 由于加了切换，明显发现在 UE 运动到进出 TRP 覆盖范围的边缘处具有遍历谱效的连续性。

多普勒频移  $f_{Ds}(t)$  和  $\theta_T$  在观测时间内的变化如图 8 所示。可以发现，在未使用 HSM 时（站间距 100 m，TRP 到 UE 轨迹距离 20 m，可以类比为 HSM 内圆半径  $r$ ）， $\theta_T$  从最小值变化到最大值需要经历 1 s 的时间， $\theta_T$  的变化更频繁，同时导致最大多普勒频移  $f_{Ds}(t)$  为 1 851 Hz；在使用 HSM 之后（站间距 300 m，TRP 到 UE 轨迹距离 150 m，可以类比为外圆半径  $d$ ）， $\theta_T$  从最小值变化到最大值需要经历 3 s 的时间， $\theta_T$  的变化周期明显变长，也就是说 UE 在运动轨迹途中经历了更缓慢的多普勒频移，同时导致的最大多普勒频移  $f_{Ds}(t)$  为 1 409 Hz，相较使用 HSM 之前也有减小。另外仿真时间设置为 10 s，此时 UE 的行进距离已经达到了 1 km，可以发现无论是否使用 HSM，UE 在整个运动过程中经历的多普勒频移是稳定规律性变化的，因此证明



了本场景本身具有多普勒频移效应变化规律的稳定性，同时HSM对这种稳定性没有影响。所以，可以认为HSM本身即时变系统下稳定的模型。

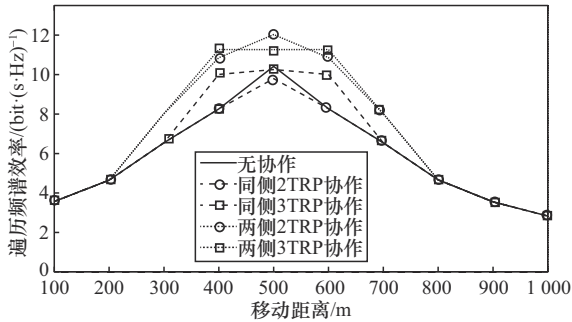
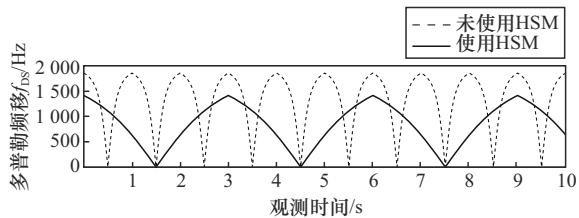
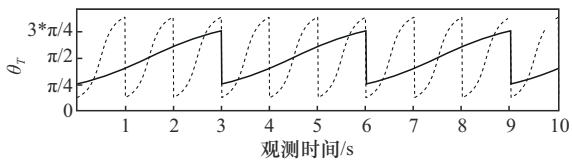


图7 协作TRP个数和TRP分布随运动轨迹对遍历SE的影响 (加切换)



(a) 随着时间变化, UE经历多普勒频移 $f_{Ds}$



(b) 随着时间变化, UE运动轨迹与TRP夹角的变化

图8 多普勒频移 $f_{Ds}(t)$ 和 $\theta_T$ 在观测时间内的变化

不同环境参数对遍历SE的影响如图9所示。在式(5)中已给出解释, 参数 $\zeta$ 和参数 $\rho$ 仅代表了LoS和NLoS存在的概率, 其具体取值取决于各种环境因素, 二者共同用来表征瑞利系数 $Y_d(t)$ 。其中,  $\zeta=13, \rho=0.03$ , 为文献[19]建议的存在LoS径下可参考的配置值,  $\zeta=0, \rho=0$ 则表示NLoS径, 且忽略了更多具体环境因素的情况。可以观察到, 对于同侧3TRP协作而言,  $\zeta=13, \rho=0.03$ 比 $\zeta=0, \rho=0$ 配置在UE在[400,600] m范围移动时具有更高的遍历频谱效率; 对于两侧3TRP协作而言,  $\zeta=13, \rho=0.03$ 比 $\zeta=0,$

$\rho=0$ 配置在UE在[300,700] m范围移动时具有更高的遍历频谱效率。这种结果清楚地展现出距离相关因子与修正瑞利因子之间存在明显差异, 说明车辆在靠近TRP时, 信道与LoS信道几乎相同, 而不是只与距离相关因子( $\zeta=0, \rho=0$ )有关。因此, 未考虑环境因素会低估系统的遍历频谱效率, 这也说明本文的仿真更接近现实情况。

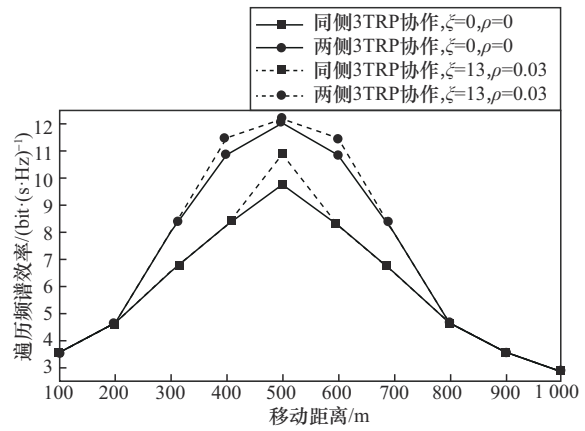


图9 不同环境参数对遍历SE的影响

不同站间距对遍历SE的影响如图10所示, 即在HSM中不同TRP分布间距下, 即站间距为50 m、100 m、150 m时的遍历频谱效率。不同的站间距代表了不同的TRP部署密度, 站间距越小说明场景部署密度越高。从结果来看, 站间距最小为50 m时获得最高的频谱效率, 站间距最大为150 m时获得最低的频谱效率, 这是因为部署密度越高, UE和TRP之间的路径损耗越小。这也直接说明了HSM更适用于提高超密集部署场景的频谱效率。

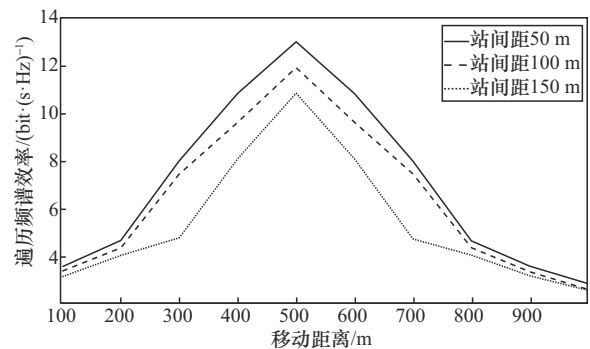


图10 不同站间距对遍历SE的影响

站间距和TRP协作个数对遍历SE的综合影响如图11所示。从图11可以看出,站间距为50 m时,UE经历的遍历频谱效率要整体优于站间距为150 m的情况,这与图9中的结论相符合,站间距越小,TRP部署越密集,得到的性能越好,说明HSM更适用于密集部署场景。另外,站间距为50 m且无TRP协作的情况,与站间距为150 m且3TRP协作的情况得到的UE遍历频谱效率相当,两线只有在UE运动到400 m和600 m位置附近的时候存在交叉,其余均为站间距为50 m且无TRP协作的情况下性能更佳,这说明了在比较站间距和TRP协作个数这2个影响因素时,站间距对UE的遍历频谱效率的影响更大,因此,合理设置站间距可以更好地提升网络性能,在此基础上合理配置TRP的协作个数,有利于网络性能的进一步提升,二者为相辅相成的关系。

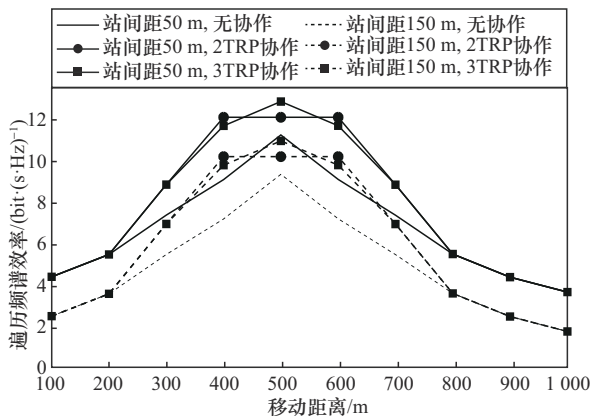


图11 站间距和TRP协作个数对遍历SE的综合影响

## 4 结束语

本文提出了一种支持高速移动和密集部署场景的HSM。通过CP/UP分离和多点协同传输的方式,有效地解决了高速移动场景中多普勒效应、频繁切换等问题,提高了网络的容量和可靠性。本文的贡献如下:首先,提出了面向6G高速移动和密集部署场景的新型网络架构HSM,并总结了其两大技术特点,即CP/UP分离和多点协同传输,

有效地解决了高速移动场景下的多普勒效应和TRP频繁切换问题;其次,理论分析了高速移动和密集部署场景,同时针对该场景提出了AAoDS的理论概念,为HSM的性能分析提供理论指导;最后,通过大量仿真实验全方位验证了HSM卓越性能。

通过对系统模型的分析 and 数值模拟结果的展示,得出以下结论:HSM中的CP/UP分离能够降低TRP的切换频率,扩大AAoDS的范围,减弱多普勒频移对UP数据传输稳定性的影响;多点协同传输,特别是多TRP联合传输,能够提高通信链路的可靠性和稳定性,解决TRP频繁切换带来的问题;参与协作的TRP数量越多,性能越好,两侧协作的性能整体优于不做协作和同侧协作的情况;HSM更适于提高超密集部署场景的频谱效率,部署密度越高,频谱效率越高。另外通过综合考虑TRP协作个数和站间距双因素,发现站间距对性能的影响更大,同时设置合理的TRP站间距和TRP协作数量对网络性能具有重要意义。

在本文中,考虑的仿真场景主要集中在地面多UP TRP传输场景,对CP TRP传输和其他场景并未进行拓展。在未来的工作中,可以进一步优化HSM的性能。例如,深入研究多CP TRP联合传输的场景,以进一步提高网络的性能和可靠性;考虑引入更先进的信号处理技术,如大规模MIMO、波束成形等,以更好地应对高速移动场景中的挑战;结合人工智能技术,实现网络的智能优化和管理,提高网络的自适应能力;另外可以结合CP/UP TRP的承载形式,如CP TRP是空中无人机,UP TRP是地面TRP的场景,进行HSM的扩展分析;进一步开展实际场景的测试和验证,以确保模型在实际应用中的有效性和可行性。

## 参考文献:

- [1] ITU-R. Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond[R]. 2023.
- [2] 3GPP TR 38.913. Study on Scenarios and Requirements for



- Next Generation Access Technologies[S]. 2018.
- [3] IMT 2030(6G)推进组. 6G典型场景和关键能力白皮书[R]. 2022  
IMT 2030(6G) Promtion Group. 6G white paper on typical scenarios and key capabilities[R]. 2022.
- [4] CHANDRASEKHAR V, ANDREWS J G, GATHERER A. Femtocell networks: a survey[J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(9): 59-67.
- [5] CHEN S Z, WANG Y M, QIN F, et al. LTE-HI: a new solution to future wireless mobile broadband challenges and requirements[J]. IEEE Wireless Communications, 2014, 21(3): 70-78.
- [6] KAMEL M, HAMOUDA W, YOUSSEF A. Ultra-dense networks: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(4): 2522-2545.
- [7] TENG Y L, LIU M T, YU F R, et al. Resource allocation for ultra-dense networks: a survey, some research issues and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(3): 2134-2168.
- [8] GOTSIS A, STEFANATOS S, ALEXIOU A. UltraDense networks: the new wireless frontier for enabling 5G access[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2016, 11(2): 71-78.
- [9] CHEN S Z, QIN F, HU B, et al. User-centric ultra-dense networks for 5G: challenges, methodologies, and directions[J]. IEEE Wireless Communications, 2016, 23(2): 78-85.
- [10] YOU X H, WANG C X, HUANG J, et al. Towards 6G wireless communication networks: vision, enabling technologies, and new paradigm shifts[J]. Science China Information Sciences, 2020, 64(1): 110301.
- [11] CHEN S Z, CHEN L, HU B, et al. User-centric access network (UCAN) for 6G: motivation, concept, challenges, and key technologies[J]. IEEE Network, 2024, 38(3): 154-162.
- [12] 施建锋, 杨照辉, 黄诺, 等. 面向6G的用户为中心网络研究综述[J]. 电子与信息学报, 2023, 45(5): 1873-1887.  
SHI J F, YANG Z H, HUANG N, et al. A survey on user-centric networks for 6G[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2023, 45(5): 1873-1887.
- [13] BUZZI S, D' ANDREA C. Cell-free massive MIMO: user-centric approach[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2017, 6(6): 706-709.
- [14] 3GPP TR 38.811. Study on NR to support non-terrestrial networks[S]. 2018
- [15] ZHANG Q M, DONG H Z, ZHAO J H. Channel estimation for high-speed railway wireless communications: a generative adversarial network approach[J]. Electronics, 2023, 12(7): 1752.
- [16] PAN M G, HU J L, YUAN J H, et al. An efficient blind Doppler shift estimation and compensation method for LEO satellite communications[C]/Proceedings of the 2020 IEEE 20th International Conference on Communication Technology (ICCT).

Piscataway: IEEE Press, 2020: 643-648.

- [17] AL-HOURANI A, AL HOMSSI B. Doppler shift distribution in satellite constellations[J]. IEEE Communications Letters, 2024, 28(9): 2131-2135.
- [18] GUO F, YANG Y, MA F J, et al. Instantaneous velocity determination and positioning using Doppler shift from a LEO constellation[J]. Satellite Navigation, 2023, 4(1): 9.
- [19] 3GPP TR 25.996. Spatial channel model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) simulations[S]. 2024.

#### [作者简介]



李国庆 (1975- ), 男, 博士, 中国信息通信科技集团有限公司正高级工程师, 主要研究方向为5G和6G标准制定、无线网络架构等。



王培博 (1999- ), 男, 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室博士生, 主要研究方向为6G无线网络架构、智能化资源管理。



谌丽 (1975- ), 女, 中信科移动通信技术股份有限公司高级工程师, 主要研究方向为5G和6G标准制定、无线接入网架构、网络智能化。



胡博 (1978- ), 男, 博士, 北京邮电大学教授, 主要研究方向为宽带无线移动通信系统、5G/6G星地融合通信、网络人工智能。



陈山枝 (1969- ), 男, 博士, 中国信息通信科技集团有限公司无线移动通信全国重点实验室主任, 主要研究方向为5G和6G、车联网、卫星移动通信等。