

面向低轨卫星的NTN随机接入技术

宋艳军^{1,2}, 孙晨华¹, 谢文轩², 徐 军², 张志丽¹, 张 静¹

(1. 中国电子科技集团公司第五十四研究所, 河北 石家庄 050081;

2. 电子科技大学, 四川 成都 611731)

摘 要: 通过比较非地面网络 (NTN) 通信与地面 5G 通信在通信场景、接入架构、终端类型、传输特性等方面的差异, 总结出低轨卫星 NTN 的随机接入应重点研究, 并深入分析 NTN 随机接入面临的问题和关键技术的突破情况。针对高动态信号的多普勒频偏问题, 提出简单、易实现的卫星波束指向感知的频偏补偿方法; 面对低轨卫星接入波束控制难题, 提出一种多点波束分区域覆盖的实时调度方法; 同时为解决低轨 NTN 场景下的随机接入拥塞问题, 提出利用强化学习方法设计接入类别禁止因子的新思路。

关键词: 非地面网络; 随机接入; 低轨卫星

中图分类号: TN393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2024035

Random Access Technology of NTN Network for Low Orbit Satellite

SONG Yanjun^{1,2}, SUN Chenhua¹, XIE Wenxuan², XU Jun², ZHANG Zhili¹, ZHANG Jing¹

1. The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China

2. University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China

Abstract: By comparing the differences between NTN communication and ground-based 5G communication, this paper concluded that the random access of low-orbit satellite NTN should be studied. The problems and key technologies of NTN random access were deeply analyzed. A simple and easy to implement frequency offset compensation method for satellite beam-pointing sensing was proposed to solve the Doppler frequency offset problem of high dynamic signals. A real-time scheduling method of multi-point beam sub-region coverage was proposed to solve the problem of beam control for low orbit satellite access. A new idea of using reinforcement learning method to design access class barring factors was proposed to solve the random access congestion problem in low orbit NTN scenario.

Keywords: non-terrestrial network, random access, low orbit satellite

0 引言

移动通信发展到 4G/5G 阶段, 已经实现了利用移动终端享受互联网服务, 但在沙漠、森林、海洋和一些偏远地区, 由于高昂的成本无法建设地面网络, 移动通信也无法利用地面网络实现更广域的全球覆盖。第三代合作伙伴计划 (3rd Generation Partnership Project, 3GPP) 在研究地面 5G 通信的 Release 15 (R15) 之初, 就着重讨论建立一个非地面网络 (Non-Terrestrial Network,

NTN)^[1], 计划与地面网络融合实现全球覆盖的互联网服务。面对手机直连卫星技术的快速进步及应用的迅速推广, NTN 技术作为手机直连卫星最全面的技术路线^[2], 得到了更多的关注, 间接地推动了技术快速发展。

NTN 由卫星通信网络、高空平台网络组成, 在地面 5G 通信体制协议的基础上进行优化和改进, 实现移动通信系统向天空的延伸, 与地面移动通信一起将空间、空中和地面组成一个立体化移动宽带通信网络, 预期可实

现全天候、全时段、全地域的语音和互联网服务。当前 NTN 的研究重点是基于卫星通信的场景展开的, 由于高空平台与地面移动通信环境条件类似, 其协议标准可以沿用地面 5G 的协议标准, 也可适用 NTN 的协议标准。

本文比较 NTN 与地面 5G 通信在通信场景、接入架构、终端类型等方面的差异, 针对低轨卫星场景总结 NTN 随机接入面临的问题, 重点分析星地下行信号初始同步、响应时间调整、接入波束调度等随机接入过程中需要解决的关键技术, 借助强化学习算法优化 ACB 拥塞控制机制, 提高随机接入成功率。

1 NTN 与地面 5G 通信的差异

NTN 在地面移动通信的基础上向前发展, 其网络架构、体制协议均继承地面移动通信, 但它们的使用环境不同, 造成了两个系统之间存在不小的差异, 主要表现在通信场景、接入架构、终端类型和传输特性等方面。

1.1 通信场景的差异

在地面移动通信中, 手机与基站间传输的信号易被建筑物遮挡, 主要以非视距 (Non Line of Sight, NLOS) 传输为主, 通信双方可能相互“看不见”, 通过直射、反射、绕射、穿透等多种路径传输信号。NTN 的通信场景主要有 3 类: 一是用户终端通过高轨卫星实现与地面基站通信; 二是用户终端与低轨卫星上的基站通信; 三是用户终端与高空平台上的基站通信。这 3 类通信场景均以视距 (Line of Sight, LOS) 传输为主, 通信场景的差异决定了两个系统处理信号的方法不同。

1.2 接入架构的差异

NTN 以地面移动通信为基础定义了 3 种接入架构: 一是“透明处理”的接入架构, 基站功能部署在地面信关站内, 卫星作为透明通道, 将用户终端和地面信关站 (含基站功能) 之间的信号连通; 二是 CU/DU 分离“再生处理”的接入架构, 基站的 CU 功能部署在地面信关站内, DU 功能部署在星载载荷内, 星载的 DU 负责业务面数据处理, 地面信关站的 CU 负责控制面数据处理; 三是

CU/DU 不分离“再生处理”的接入架构, 原有基站的 CU/DU 功能均部署在星载基站内, 卫星完成基站的全部功能。考虑 NTN 的各种通信场景特点, 高轨卫星场景适合选择“透明处理”的接入架构, 低轨卫星场景均可以选择两种“再生处理”的接入架构, 高空平台场景与地面移动通信场景相近, 最好选择 CU/DU 不分离“再生处理”的接入架构。

1.3 终端类型的差异

地面移动通信的终端类型主要以手机为主, NTN 除了支持手机外, 还支持甚小孔径终端。NTN 的两种类型的终端在高轨卫星、低轨卫星和高空平台等通信场景中均有使用, 但具体的工作模式不同。手机主要用于低轨卫星 S 频段移动通信, 处理信号带宽 30 MHz; 甚小孔径终端主要用于高低卫星 Ka 频段/C 频段的宽带通信, 处理信号带宽 400 MHz。甚小孔径终端拥有高增益功放和天线 (等效直径 60 cm), 收发增益至少比手机高 50 dB, 因此通信能力也比手机高很多, 但其使用固定波束, 处理过程相对简单。

1.4 传输特性的差异

NTN 与地面移动通信的空间衰减、传输时延、多普勒频移等传输特性有很大的不同。地面移动通信中基站与手机用户间距离有 3 种典型值: 0.5 km (城市部署)、1.50 km (郊区部署) 和 5 km (农村部署)。基于低轨卫星的 NTN 通信场景, 其通信距离在 1 000~2 700 km (假设轨道高度 1 000 km), 通信距离相差数百倍, 空间衰减多数十分贝。低轨卫星 NTN 的往返传输时延在 6.7~18 ms, 比地面移动通信高数百倍。低轨卫星由于高速运动产生的多普勒频移在几十 kHz~数百 kHz, 而地面移动通信只有在高铁场景下有 1 kHz 的频移, 其他低速场景几乎无频移。表 1 以传输 2 GHz 信号为例, 比较了 NTN 与地面 5G 通信在空间衰减、传输往返时延、多普勒频移等方面的差异。由表 1 可知, NTN 的 3 种通信场景中, 低轨卫星场景在空间衰减、传输往返时延、多普勒频移方面均与地面 5G 通信有较大差别, 应重点研究, 而 NTN 随机接入技术又是重点中的重点。

表 1 NTN 与地面 5G 通信传输特性比较

名称	地面 5G 通信 (郊区)	NTN 通信		
		高轨卫星	低轨卫星 (轨道高度 1 000 km)	高空平台 (轨道高度 20 km)
空间衰减/dB	约 98	约 189	158~167	约 124
传输往返时延/ms	约 0.006	约 238	6.7~18	约 0.13
多普勒频移/kHz	小于 1	小于 1	小于 45	小于 1

2 低轨卫星 NTN 随机接入面临的问题

NTN 随机接入与地面 5G 随机接入在流程上并无本质区别。随机接入开始前, 基站广播同步信号块 (Synchronization Signal Block, SSB), 用户终端正确接收之后进入随机接入过程, 如图 1 所示。随机接入过程分为 4 步, 第 1 步是用户终端发送随机接入请求, 第 2 步是基站回复随机接入响应, 第 3 步是用户终端发送控制信息, 第 4 步是基站发送竞争解决信号。由于低轨卫星运动速度快、星地传输时延长、星地电平变化大, 因此需要解决星载基站广播 SSB 信号同步、多终端定时提前、消息响应延迟、用户终端频繁跨星切换等影响随机接入的难点问题。

2.1 SSB 信号同步问题

相比地面移动的固定基站, 低轨卫星星载基站具有运动快、时延大、覆盖广、高动态等特点, 用户终端在接收星载基站广播的 SSB 时, 需要适应卫星高速运动带来的多普勒频移影响。在地面移动通信系统中, 基站与高速运动的用户终端之间产生多普勒效应引起的最大频移不超过 1 kHz, SSB 信号中 M 序列和正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 符号中循环前缀完全可以适应这个频移。低轨卫星通信系

统由于卫星的高速运动, 多普勒效应产生的频移最小也有几十 kHz, 巨大的频移给信号解调带来挑战。图 2 给出卫星轨道高度在 1 000 km 时不同频率信号的多普勒频移变化规律, 2 GHz 信号产生的多普勒频移不超过 45 kHz, 30 GHz 信号产生的多普勒频移不超过 650 kHz。

2.2 多终端定时提前问题

同一小区内不同用户终端发送随机接入请求 (前导序列) 后, 星载基站何时接收到各个用户终端的随机接入请求存在不确定性。不确定性的范围取决于小区面积的大小, 对于面积在几千平方米的小区, 不确定程度为百微秒量级; 对于比较大的小区, 不确定程度可以到毫秒级。为了保证不同用户终端之间载波信号正交性和避免信号冲突, 需要对用户终端信号进行定时提前补偿, 同时留出足够的保护时间。多终端定时提前补偿示意如图 3 所示。在卫星场景下, 用户终端通过导航授时与星载基站、其他用户终端统一时间基准, 根据星、地位置关系进行定时提前补偿。星载基站需要考虑各个用户终端前导码接收定时的不确定性, 设置足够的接收保护时间长度, 确保在可能接收前导码的上行资源内没有其他传输, NTN 标准中没有规定保护时间长度, 需要星载基站根据不同场景需求进行匹配。

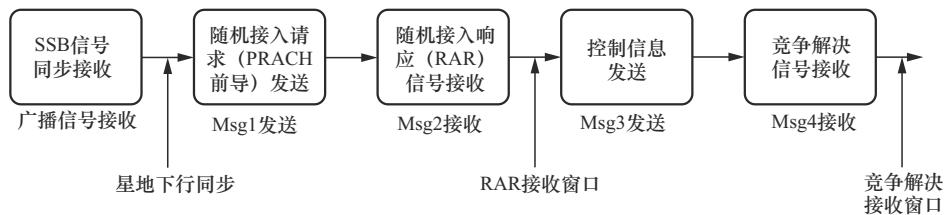


图 1 随机接入过程

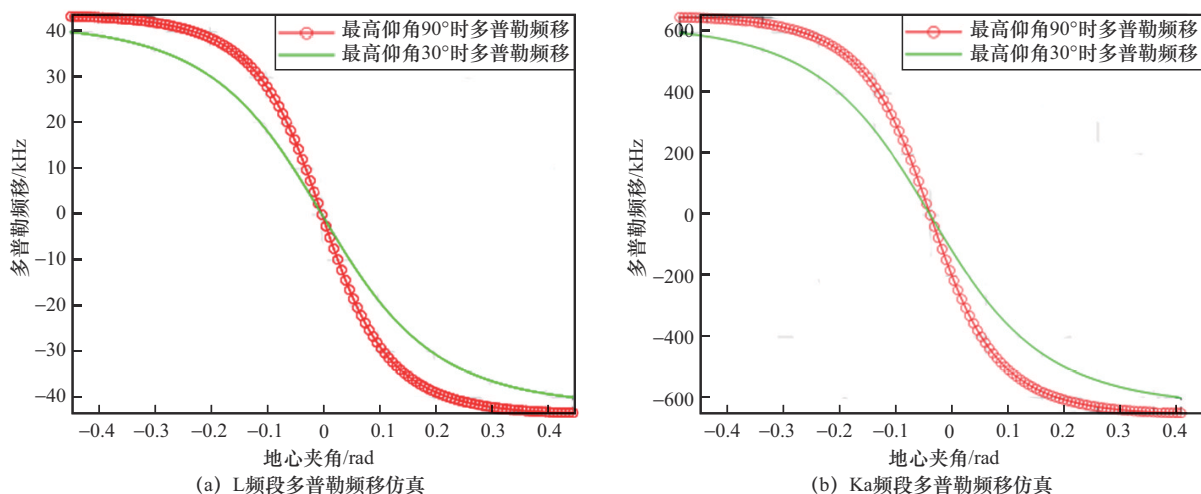


图 2 低轨星载基站产生的多普勒频移

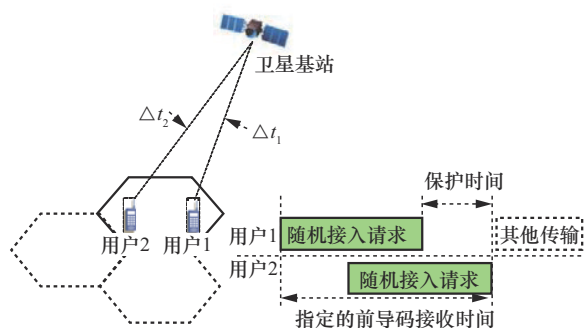


图 3 多终端定时提前补偿示意

2.3 消息响应延迟问题

消息响应延迟问题包括随机接入响应延迟和竞争解决信息延迟。以随机接入响应延迟为例，用户终端在发送随机接入请求后，会等待接收星载基站返回的随机接入应答，为保证不陷入“无限等待”，星载基站会为用户终端配置随机接入响应时间窗长度。随机接入响应时间窗长度与小区大小、是否授权频段有关，如图 4 所示。在地面移动通信系统中，授权频段的随机接入响应接收时间窗最长为 10 ms，而非授权频段考虑到“先听后说”的机制可能导致随机接入应答发送不成功，其随机接入响应时间窗长度最长可达 40 ms。低轨卫星基站考虑工作在授权频段，由于通信弧段内星地往返时延实时变化，其随机接入响应接收时间窗长度也不相同，因此随机接入响应接收时间窗长度不能短于 35 ms。如果使用专用的卫星波束接入，需要考虑接入波束的调度时间，随机接入响应接收时间窗长度可能更长。

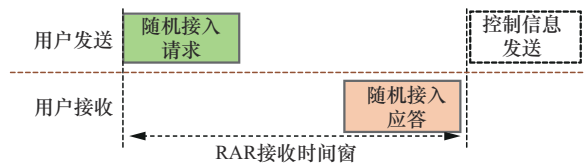


图 4 随机接入响应时间窗示意

2.4 用户终端频繁跨星切换问题

由于低轨卫星的运动速度高达 7.5 km/s，用户终端的运动速度与卫星速度相比，可以忽略不计，因此计算星地通信时长时，仅考虑卫星运动速度即可。根据低轨卫星的运动速度，大致可以计算出其与用户终端的通信时长不超过 15 min；考虑用户终端的工作仰角和工作弧段限制，通信时长可能更短。为保证用户终端通信不中断，当星地之间通信仰角达到一定门限时，用户终端需要选择新的卫星完成跨星切换。用户通信速率越高，其跨星

切换操作越频繁，频繁的跨星切换将会导致系统的资源控制更加复杂。与地面 5G 基站类似，星载基站对用户终端的跨星切换控制有 NG 切换和 XN 切换两种模式：在 NG 切换模式下，用户信息通过核心网在两个星载基站之间进行传递，星地多次往返传输时延将会影响跨星切换的时效性；在 XN 切换模式下，用户信息通过星间链路由源卫星基站传递给目的卫星基站，源卫星基站选择哪颗卫星作为切换的目的卫星，需要源卫星基站知道较多系统信息，并且要求源卫星基站具有较高算力，这些都是跨星切换需要解决的难点问题。用户终端跨星切换示意如图 5 所示。

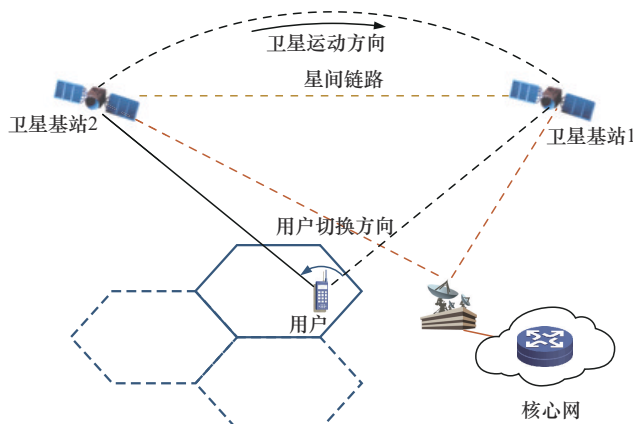


图 5 用户终端跨星切换示意

3 低轨卫星 NTN 随机接入关键技术

3.1 SSB 信号同步技术

用户终端在接入星载基站之前，需要完成星载基站的 SSB 信号同步。SSB 信号由主同步（PSS）信号、辅同步（SSS）信号、物理广播信道 3 部分组成。主同步信号由 M 序列构成，用于完成 OFDM 符号边界同步、粗频率同步和初始频移校正；辅同步信号由 Gold 序列（2 个 M 序列异或）构成，可作为物理广播信道的解调参考信号，同时辅助完成无线链路的测量；物理广播信道经过加扰、编码、调制后生成，用于完成帧定时和系统信息承载。主同步序列和辅同步序列生成过程如图 6 所示。

与 4G-LTE 的主同步信号使用 ZC 序列不同，5G-NR 的主同步信号使用 M 序列完成，主要是因为其较好的抗频移性，但是在低轨卫星通信场景下需要研究频移性能更好的 M 序列检测方法。目前大多数研究是在导航定位授时预补偿的前提下做更精细的频移和定时补偿，如参考文献[5]针对低轨卫星场景的大多普勒频移和星地长传

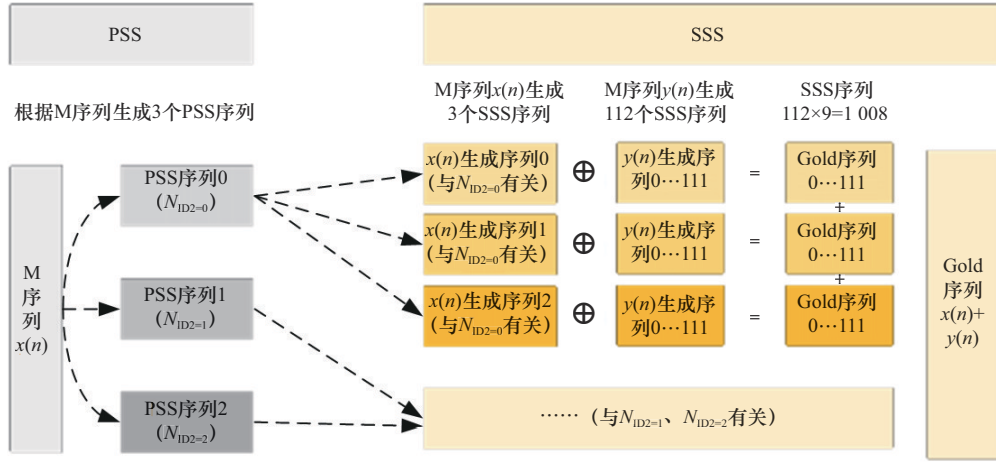


图6 主同步序列和辅同步序列生成过程

输时延,研究时移估计和分数载波频移估计方法。参考文献[6]利用接收到的主同步信号和辅同步信号之间的相关性,在不依赖小区ID信息的情况下,实现整数载波频差检测。参考文献[7]为节省检测时间和星载基站资源,大幅度降低信号检测的工作量与复杂度,设计了主同步信号和辅同步信号降采样分段检测方法。

上述针对M序列的研究均是在依赖定位授时预补偿的前提下完成的,如果用户终端不具备定位及时间同步功能,将很难接入系统。为了用户终端更容易接入系统,同时降低系统和用户终端的复杂度,需要研究一种无导航定位的频移和定时补偿方法,即在星载基站的发射机端采用预补偿措施。本文通过分析低轨卫星星地频移产生规律,结合卫星波束控制特点,提出了卫星波束指向感知的频移补偿方法。该方法的基本原理是将低轨卫星和用户终端看作空间坐标系中的两个点,利用两者相对位置变化和卫星对用户终端的指向变化,找出卫星波束指向变化与频移变化之间的关系;并针对卫星存储资源

有限、计算能力弱、应用场景多变等情况,研究简单易实现的、适合星载的高动态信号频移补偿机制及算法。图7是以Ka频段信号为例,低轨卫星相对于用户终端在不同位置时多普勒频移的仿真结果,S频段信号多普勒频移相对于Ka频段信号多普勒频移等比例缩减即可。

3.2 随机接入过程优化

为提高低轨卫星通信场景的NTN随机接入成功率,随机接入过程需要进行针对性的优化,具体从两方面考虑:一是随机接入请求信号的ZC序列检测能力需要提升;二是随机接入过程中涉及的体制协议需要优化。ZC序列检测能力提升主要从其本身具有恒包络、理想的周期自相关和良好的互相关等特性入手,使用ZC序列作为随机接入请求信号,即可降低小区间干扰,又可区分不同用户终端。研究新的ZC序列和检测估计算法,提高ZC序列的适应范围和检测能力,可增加用户接入数量和成功率。如参考文献[8]通过分析两步定时提前估计流程和前导序列间干扰,增强前导序列设计,显著降低前导

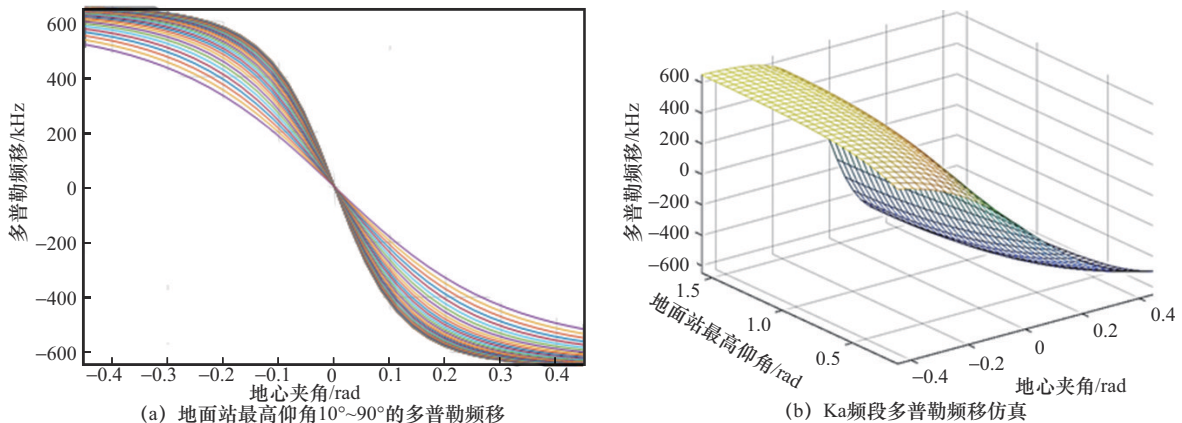


图7 低轨卫星相对于用户终端不同位置的多普勒频移仿真

漏检率和用户随机接入失败的可能性。参考文献[10]利用双共轭 ZC 序列, 构造一种新的随机接入前导消除整数倍频移带来的峰值移位问题。参考文献[11]在定时与频移不确定性条件下, 使用循环前缀与 OFDM 符号之间的时域相关性检测循环前缀长度。参考文献[12]通过研究多个不同 ZC 根序列级联构建一个长前导序列的联合相关检测方法, 减少对定时和频移预补偿的依赖。

优化随机接入体制协议除了考虑用户终端与星载基站间时频同步外, 还要研究在消息响应、数据重传、频谱利用率等方面进行增强, 如参考文献[13]基于回退的随机接入解析机制, 可提高信道吞吐量, 保证大量用户连接请求的接入成功率。参考文献[14]研究随机接入申请和随机接入响应多次重传的增强型接入方法, 可避免由于随机接入响应窗口到期而引起随机接入申请重试, 降低随机接入过程的时延。参考文献[15]为提高频谱效率和增加用户接入数量, 研究稀疏码多址接入技术的多用户检测算法。参考文献[16]以公平提高用户总数和数据速率为目标, 研究 LEO 卫星网络中动态多波束的波束方向与频谱、时间、功率资源分配的联合优化问题。参考文献[17]研究数据辅助载波同步的稀疏码多址系统, 实现较少的导频开销得到更高估计精度、更好误码性能和更多接入用户。参考文献[18]为降低用户终端随机接入的碰撞概率, 将一个小区在空间域中划分为多个波束区, 不同波束区的终端以不同的概率选择随机接入信道资源, 设计适合随机接入的波束, 研究波束内终端间的最大差分时延、提前定时等参数对灵活波束设计的影响。通过研究适应低轨卫星通信的接入回退机制、消息重传机制、非正交多址等随机接入增强技术, 加强 NTN 随机接入过程中的数据交互的及时性与成功率。

3.3 接入波束调度技术

面向低轨卫星的 NTN 随机接入不仅需要研究 SSB 信号同步算法和随机接入过程的优化, 还需要研究卫星的接入波束如何调度指向有需求的用户终端。目前常见的控制接入波束的方法有 4 种: 一是使用覆盖广的宽波束传输接入信息, 此方法实现简单, 但接入能力弱, 并且容易受到频率干扰; 二是使用多个固定区域波束传输接入信息, 此方法在频率干扰和接入能力方面均得到增强, 但波束资源利用率不高; 三是利用相控阵点波束轮询扫描方式传输接入信息, 此方法的接入能力得到了进一步加强, 但无法按照用户终端接入需求实现调度; 四是区域波束引导窄点波束实时调度, 该方法提高了波束资源利用率, 又保证了接入短时延, 但是无法解决用户终端

初始接入时波束调度问题。

综合上述方法的优缺点, 提出了一种多点波束分区域覆盖的实时调度方法, 该方法的核心思想是将低轨卫星视场按照波束数量划分为多个区域, 每个区域内再按照点波束的覆盖能力进行小区划分, 每个点波束在对应的区域内按照规则进行灵活调度, 实现用户终端的实时接入。图 8 是多点波束分区域覆盖的实时调度示意。

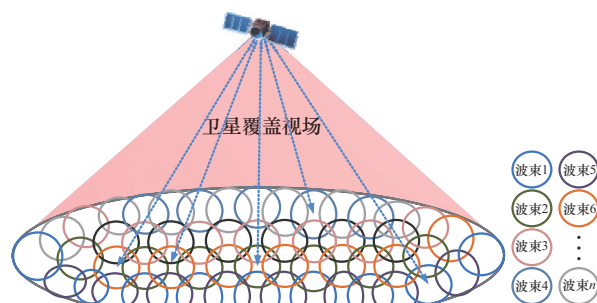


图 8 多点波束分区域覆盖实时调度示意

3.4 随机接入拥塞控制

低轨卫星的服务面积更加广阔、服务的用户更多, 随着用户数量的增加, 随机接入的拥塞控制需要重点研究, 接入类别禁止 (Access Class Barring, ACB) 的拥塞控制方法是当前最常见的研究方向。ACB 拥塞控制方法的基本原理是在系统消息中广播一个 ACB 因子, 用户终端接收之后即以 ACB 因子为概率决定是否发送接入请求, 通过让部分用户终端不发起接入请求而直接进行回退, ACB 拥塞控制方法可以有效解决海量用户场景下的随机接入拥塞问题。

ACB 因子可以是静态值, 也可是动态值, 为保证资源充分利用, 需要实时动态更新 ACB 因子。计算更新 ACB 因子需要考虑的因素较多, 传统的计算无法满足其要求, 可考虑采用强化学习方法来设计和更新 ACB 因子。基于强化学习的 ACB 拥塞控制方法大概可分为两类: 一种是仅针对 ACB 因子的优化方法; 另一种是综合 ACB 因子和回退时间的优化方法。基于强化学习的 ACB 拥塞控制部分研究成果见表 2。

此外, 也有一些综合多种策略、结合不同场景的基于强化学习拥塞控制方法研究, 如参考文献[25]采用深度 Q 网络和深度确定性策略梯度方法优化随机接入方案, 在成功接入用户终端的数量方面远大于传统的启发式解决方案。参考文献[26]针对 NTN 场景设计了一种新的强化学习结构, 即分支演员-评论家方法, 可实现更低的访问

表 2 基于强化学习的ACB拥塞控制部分研究成果

主要研究方向	设计方法	参考文献	特点与问题
自适应调整 ACB 因子的解决方案	采用 Q 学习方法来减少前导码的碰撞次数并决策是否开启 ACB 机制	[19]	接入时延有所增加,没有研究对 ACB 因子和时间的限制
	Q 学习方法优化随机接入的成功率	[20]	接入成功率有所提升,但是并没有减小随机接入的时延
	采用双 Q 学习机制,针对人与人通信与机器对机器通信共存网络	[21]	优于传统动态 ACB 方法,但是时延仍有增加
	一种基于学习自动机的 ACB(LA-ACB)方案	[22]	在以机器通信为中心的场景下,性能接近理论最优
自适应 ACB 因子和 ACB 时间的综合求解方案	使用 Dueling 深度 Q 学习方法,离线训练网络模型	[23]	在接入时延和能量效率之间取得平衡,但是没有研究在线训练方面的性能
	采用近端策略优化(PPO)方法优化 ACB 因子和时间	[24]	将用户分为不同的组别,按照组别需求进行优化

时延和更少的访问失败次数。参考文献[28]利用强化学习解决低轨卫星通信 ACB 拥塞控制,采用深度 Q 网络方法来设计 ACB 因子,有效降低了接入时延。综上所述,利用强化学习方法设计 ACB 因子和解决随机接入拥塞问题在低轨 NTN 场景下的应用仍然较少,有待进一步研究。

4 结束语

NTN 和手机直连卫星均是解决 5G 全球覆盖、支撑 6G 发展的重要手段,二者的技术之间相辅相成。NTN 技术既可作为手机直连卫星最全面的技术路线,同时又可借助手机直连卫星应用及产业的驱动力和技术创新力促使其关键技术快速突破。本文通过分析 NTN 通信与地面 5G 通信在通信场景、接入架构、终端类型、传输特性等方面的差异,提出了低轨卫星 NTN 随机接入在星载基站的 SSB 信号同步、多终端定时提前、消息响应时延、用户终端跨星切换等方面面临的问题;分析和研究了 SSB 信号同步、随机接入过程优化、接入波束调度、随机接入拥塞控制等随机接入关键技术;提出了基于低轨卫星波束指向补偿多普勒频移、多点波束分区域覆盖实时调度接入波束、基于强化学习优化 ACB 拥塞控制机制提高随机接入成功率等新方法和新思路。

参考文献

[1] 3GPP. Study on New Radio (NR) to support non-terrestrial networks, V15.4.0: TR 38.811[S]. 2020.

[2] 宋艳军,肖永伟,孙晨华.手机直连卫星关键技术分析与发展展望[J].电信科学,2024,40(4):1-9.

SONG Y J, XIAO Y W, SUN C H. Analysis and future development of direct-to-handset satellite key technologies[J]. Telecommunications Science, 2024, 40(4): 1-9.

[3] 孙耀华,彭木根.面向手机直连的低轨卫星通信:关键技术、发展

现状与未来展望[J].电信科学,2023,39(2):25-36.

SUN Y H, PENG M G. Low earth orbit satellite communication supporting direct connection with mobile phones: key technologies, recent progress and future directions[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(2): 25-36.

[4] 孙耀华,许宏涛,彭木根.手机直连低轨卫星通信:架构、关键技术和未来展望[J].移动通信,2024,48(1):103-110.

SUN Y H, XU H T, PENG M G. Direct-to-mobile low earth orbit satellite communication: architecture, key technologies, and future perspective[J]. Mobile Communications, 2024, 48(1): 103-110.

[5] LI C M, SHU Y L, WANG P J. Synchronization for LTE-A system downlink[J]. IEEE Consumer Electronics Magazine, 2019, 8(3): 40-43.

[6] JUNG Y A, KIM M Y, SONG H K, et al. Effective estimation of integer carrier frequency offset in LTE downlink systems with symbol timing error[J]. IEEE Access, 2019, 7: 33329-33337.

[7] 李勇,韩博文,袁冰凡,等.5G NR 下行同步方法研究[J].现代电子技术,2023,46(13):12-18.

LI Y, HAN B W, YUAN B F, et al. Research on 5G NR downlink synchronization method[J]. Modern Electronics Technique, 2023, 46(13): 12-18.

[8] 朱剑锋,孙耀华,彭木根.低轨卫星通信系统的前导序列设计[J].北京邮电大学学报,2022,45(6):75-81.

ZHU J F, SUN Y H, PENG M G. Preamble design for low earth orbit communication systems[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2022, 45(6): 75-81.

[9] ZHU J F, SUN Y H, PENG M G. Timing advance estimation in low earth orbit satellite networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(3): 4366-4382.

[10] 廖学富,席兵,邓炳光.5G 高速场景下随机接入前导设计和检测[J].电讯技术,2023,63(3):416-420.

LIAO X F, XI B, DENG B G. Design and detection of random access preamble in 5G high-speed scenario[J]. Telecommunication Engineering, 2023, 63(3): 416-420.

[11] D'AMICO A A, MORELLI M, MORETTI M. A novel scheme for

- CP-length detection and initial synchronization for the LTE down-link[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(10): 4668-4678.
- [12] ZHEN L, SUN T, LU G Y, et al. Preamble design and detection for 5G enabled satellite random access[J]. IEEE Access, 2020, 8: 49873-49884.
- [13] LIN G Y, CHANG S R, WEI H Y. Estimation and adaptation for bursty LTE random access[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(4): 2560-2577.
- [14] KIM E, LEE H. Low-latency random access in wireless networks [J]. ICT Express, 2021, 7(1): 41-48.
- [15] 雷菁, 王水琴, 黄巍, 等. 稀疏码多址接入多用户检测算法综述 [J]. 电子与信息学报, 2021, 43(10): 2757-2770.
- LEI J, WANG S Q, HUANG W, et al. Survey of multi-user detection algorithms for sparse code multiple access system[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2021, 43(10): 2757-2770.
- [16] YUAN S, SUN Y H, PENG M G, et al. Joint beam direction control and radio resource allocation in dynamic multi-beam LEO satellite networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(6): 8222-8237.
- [17] 张嘉怡, 余忠洋, 朱敏, 等. 低轨卫星通信中 SCMA 系统载波同步算法设计[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(5): 1354-1360.
- ZHANG J Y, YU Z Y, ZHU M, et al. Design of carrier synchronization algorithm for SCMA system in LEO satellite communication [J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(5): 1354-1360.
- [18] GUIDOTTI A. Beam size design for new radio communications satellite communications systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(11): 11379-11383.
- [19] TELLO-QUENDO L, PACHECO-PARAMO D, PLA V, et al. Reinforcement learning-based ACB in LTE-a networks for handling massive M2M and H2H communications[C]//Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-7.
- [20] MOON J, LIM Y. Access control of MTC devices using reinforcement learning approach[C]//Proceedings of the 2017 International Conference on Information Networking (ICOIN). Piscataway: IEEE Press, 2017: 641-643.
- [21] PACHECO-PARAMO D, TELLO-QUENDO L. Adjustable access control mechanism in cellular MTC networks: a double Q-learning approach[C]//Proceedings of the 2019 IEEE Fourth Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM). Piscataway: IEEE Press, 2019.
- [22] DI C, ZHANG B, LIANG Q L, et al. Learning automata-based access class barring scheme for massive random access in machine-to-machine communications[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(4): 6007-6017.
- [23] BUI A T H, PHAM A T. Deep reinforcement learning-based access class barring for energy-efficient mMTC random access in LTE networks[J]. IEEE Access, 2020, 8: 227657-227666.
- [24] ZHANG H J, JIANG M H, LIU X N, et al. PPO-based PDACB traffic control scheme for massive IoV communications[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(1): 1116-1125.
- [25] JIANG N, DENG Y S, NALLANATHAN A. Deep reinforcement learning for discrete and continuous massive access control optimization[C]//Proceedings of the 2020 - 2020 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-7.
- [26] BAI J N, SONG H, YI Y, et al. Multiagent reinforcement learning meets random access in massive cellular Internet of Things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(24): 17417-17428.
- [27] ZHANG C W, SUN X H, XIA W C, et al. Distributive ACB factor estimation for delay-sensitive applications in non-terrestrial networks[C]//Proceedings of the 2022 IEEE 96th Vehicular Technology Conference (VTC2022-Fall). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-6.
- [28] FENG T, NIE G F, TIAN H, et al. Dynamic access control for LEO satellite networks based on reinforcement learning[C]//Proceedings of the 2023 9th International Conference on Computer and Communications (ICCC). Piscataway: IEEE Press, 2023: 344-349.

[作者简介]



宋艳军 (1983-), 男, 中国电子科技集团公司第五十四研究所高级工程师, 主要研究方向为低轨卫星通信、卫星有效载荷、低轨卫星随机接入。

孙晨华 (1964-), 女, 中国电子科技集团公司第五十四研究所教授级高级工程师, 主要研究方向为卫星通信、天基网络协议、天基网络融合。

谢文轩 (2000-), 男, 电子科技大学硕士生, 主要研究方向为卫星移动通信、随机接入拥塞控制。

徐军 (1963-), 男, 电子科技大学教授, 主要研究方向为微波毫米波技术、毫米波通信技术、无线电物理等。

张志丽 (1985-), 女, 中国电子科技集团公司第五十四研究所教授级高级工程师, 主要研究方向为卫星移动通信、物理层协议。

张静 (1981-), 男, 中国电子科技集团公司第五十四研究所高级工程师, 主要研究方向为卫星通信、认知无线电、频谱感知。