

文章编号: 1001-8360(2023)06-0080-07

基于 5G 上下行解耦架构的服务轨道交通低轨卫星网络性能分析

朱昂立, 方旭明

(西南交通大学 信息编码与传输省重点实验室, 四川 成都 610031)

摘 要:随着通信技术的发展,卫星通信特别是低轨(LEO)卫星通信将成为下一代移动通信系统的重要组成部分。此外,随着具有全面感知、传输可靠、智能处理的智能交通通信技术的兴起,基于 LEO 卫星网络的智能交通通信网络能有效解决智能交通领域特别是高铁高速移动性导致的通信质量下降问题,通过卫星下行链路的大区域覆盖可减少部分链路的切换次数,提升通信链路的可靠性,同时弥补部分地面通信系统特殊情况下容量不足的缺点。然而,虽然 LEO 卫星网络有覆盖范围大、吞吐量高、功能性强的特点,但由于卫星位置较高,受时延和功率的限制,地面移动用户较难受益于 LEO 卫星网络。为解决这一难题,提出在地面通信网络与 LEO 卫星网络混合组网场景中使用 5G 标准提出的上下行解耦技术,即地面移动用户上行通过地面基站传输,下行通过卫星传输。利用 LEO 卫星提供的高频谱、大覆盖服务,可以高效提高系统吞吐量与可靠性,同时满足终端设备的时延和功耗要求。通过建立模型比较解耦架构与非解耦架构下的排队时延和切换失败概率,分析比较两种架构的性能。仿真结果表明,解耦系统在业务高峰时段具有明显的性能优势。

关键词: 低轨卫星网络; 轨道交通; 上下行解耦; 性能分析

中图分类号: TN92 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1001-8360.2023.06.009

Performance Analysis of 5G Uplink and Downlink Decoupling Network Based on LEO Satellites for Rail Transportation

ZHU Angli, FANG Xuming

(Provincial Key Lab of Information Coding & Transmission, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: With the development of communication technology, satellite communication, especially LEO satellite communication, will become an important part of next generation mobile communication systems. In addition, with the emergence of comprehensive sensing, reliable transmission and intelligent processing for intelligent transportation communication systems, the railway communication network based on LEO satellite network can be considered to effectively solve the problem of communication quality degradation in the intelligent transportation field, especially the communication quality degradation caused by high mobility of high-speed railways, thereby reducing the handover times of some links through the large area coverage of satellites downlink, enhancing the communication link reliability, and making up for the deficiency of some ground communication systems under special scenarios. However, despite the large coverage, high throughput and strong resilience of LEO satellite network, it is hard for ground mobile devices to benefit from the LEO satellite network due to the limitation of delay and power caused by high satellite altitude. To address the dilemma, this paper proposed to use the uplink and downlink decoupling technology proposed by 5G standard, in which the uplink of ground mobile users is transmitted through the ground base station, and the downlink is transmitted through the LEO satellite base station under the hybrid network of ground communication networks and LEO satellite network. The high-frequency and wide-coverage service provided by LEO satellites can be utilized as efficiently as possible to improve the

收稿日期: 2022-06-08; 修回日期: 2022-09-14

基金项目: 国家自然科学基金(62071393, U1834210); 四川省应用基础研究重点项目(2020YJ0218); 中央高校基本科研业务费(2682021CF019)

第一作者: 朱昂立(1994—), 男, 江苏扬州人, 博士研究生。E-mail: woshizhuangli@126.com

通信作者: 方旭明(1962—), 男, 浙江义乌人, 教授, 博士。E-mail: xmfang@swjtu.edu.cn

throughput and reliability, while the delay and power consumption requirements of terminal equipment can be guaranteed. A probability model was established to analyze the queueing delay and handover failure probabilities, and compare the handover performance under decoupling and non-decoupling architectures. The simulation results demonstrate the high performance advantages of the decoupling system, especially during peak business hours.

Key words: Low Earth Orbit (LEO) satellite networks; rail transportation; uplink and downlink decoupling; performance analysis

具有全面感知、传输可靠、智能处理的物联网将成为未来轨道交通应用新场景之一。由于海量感知信息需要在列车与网络间,列车与列车间实时传输,以实现有效地处理、调度、控制和决策,而现有 GSM-R 系统使用的带宽容量有限,已无法满足未来高速铁路的业务需求^[1];并且现实中列车运行环境多样、信道环境复杂,传统地面网络难以实现可靠的信息传输,这就需要更加高效与可靠的列车通信网络^[2]。基于卫星导航的列车测速定位^[3]和列车运行状态的自主感知^[4]将是下一代列车运行控制系统的重要发展方向。与基于轨旁设备实现列车定位相比,基于卫星的车载定位方式可以降低建设与维护成本,文献[5]中提供了一种基于图形处理器(Graphic Process Unit, GPU)的卫星信号生成方法,能够满足卫星导航在铁路应用中对接机性能测试验证的需求,降低了卫星信号模拟的成本和难度。此外,乘客的娱乐和工作需求要求铁路通信系统能够提供高速率的多媒体服务^[6],因此下一代铁路通信系统需要通过整合低轨(Low Earth Orbit, LEO)卫星网络的通信资源,采用空天地一体化网络(Space-Air-Ground Integrated Network, SAGIN)架构,以获得高可靠性的车车通信、车地通信以及环境感知与多媒体服务。

现有研究中对提高高速铁路无线通信系统的切换性能和服务质量的重点主要集中在车地通信小区切换策略的优化和天线系统的设计,包括在列车顶部增加一组天线的无缝双链路切换方案^[7];使用分布式天线的切换方案,以解决信号强度弱且不稳定问题^[8];通过分离控制面和信息面以减少切换负载并提高通信速率,从而有效优化切换性能^[9]。但是这些方案无法根本解决地面通信系统遇到的容量瓶颈问题,本文结合现有 3GPP TR 38.811 标准中提出的 5G(5th Generation)非地面组网架构^[10],分析基于 5G 上下行解耦架构的服务轨道交通 LEO 卫星网络的性能,通过建立模型,比较解耦架构与非解耦架构下的排队时延和切换失败概率,并分析其优缺点,以应对日益增长的无线通信需求。该网络架构认为卫星可以通过一个射频放大器直接建立与用户设备(User Equipment, UE)之间的上下行链路。由于 LEO 卫星具有覆盖范围大、吞吐量

高等优势, SAGIN 在灾难救援^[11]、海洋通信、物联网^[12]、地面传感等领域吸引了大量关注。特别是 LEO 卫星可以提供大面积覆盖,减小切换频率,可以提高高铁用户的服务质量(Quality of Service, QoS)。然而,尽管 SAGIN 具有覆盖大、容量高等诸多优势,但由于卫星高度高,大大增加了传输延迟和能量损失,部分性能指标难以与地面无线网络相比。在提出非地面组网之前,UE 与卫星间通信主要采用卫星电话和 GPS 系统^[13],其中卫星电话无法支持大带宽的多媒体业务,并且价格昂贵;GPS 系统中 UE 通过接收卫星信号进行定位,无法实现数据的上行传输。5G 非地面组网的提出,允许用户直接接收卫星信号或直接与卫星通信,同时减小了星地间时延对用户切换、差错控制等服务所产生的影响,使得将卫星的通信资源和计算资源整合到地面通信网络成为可能,但对于现有大部分 UE,其天线发射功率无法直接建立与卫星间的上行链路,导致 5G 非地面组网中部分 UE 如要获取卫星侧的数据与服务,需要通过地面基站(Base Station, BS)进行转发。

为了在不增加 UE 发射功率的条件下,实现地面移动用户与卫星之间的低延迟通信,引入现有 3GPP Release 15 标准中 5G-NR(New Radio, NR)上下行解耦技术^[14],其允许将一个小区中的上行载波和下行载波配置在不同频段内的频点上,这就使得 5G 非共站部署成为可能^[15],即一个低频站址同时为多个高频小区提供上行服务,用户的上行接入基站与下行接入基站可以是不同基站,这就实现了空间上的上下行解耦。现有对上下行解耦的研究主要集中在资源分配领域,例如:通过动态用户关联平衡上下行链路负载^[16];多用户通过为上行链路和下行链路关联不同基站,最大化整体流量^[17]等。

本文参考 5G 非共站部署场景,将上下行解耦技术引入 5G 非地面组网架构,由地面基站提供全部上行覆盖和小部分下行覆盖,LEO 卫星网络提供大部分下行覆盖。利用 UE 相对容易接收 LEO 卫星信号的特点,结合上下行链路解耦技术,UE 的上行链路(Uplink, UL)通过地面基站传输,下行链路(Down Link, DL)通过 LEO 卫星传输。按照上述方式,UE 可以使

用现有 5G 接入机制和发射单元,有效地利用 LEO 卫星提供的大带宽广覆盖服务,提高系统总吞吐量,减少高速 UE 切换次数。在增强型移动宽带场景中,虽然用户实际数据速率、用户切换频率、小区吞吐量、峰值数据速率和频谱效率等指标都非常重要,但其中的用户实际数据速率和切换频率并非同时在所有使用场景中同等重要,例如:高移动性用户通常需要更少的切换,即需要小区广域覆盖。上下行解耦网络架构将使 5G 非地面组网网络在未来使用场景中提供更加多样化、灵活与可靠的服务。

与 5G 非共站部署应用场景不同,非地面组网上下行解耦架构中地面基站仅提供小覆盖范围的上行链路,而 LEO 卫星可提供大覆盖范围的下行链路。通过进一步整合 LEO 卫星资源,使得绝大部分 UE 可以直接获得 LEO 卫星下行链路覆盖,而不需要通过地面基站转发获得 LEO 卫星网络的服务,从而减小了系统的排队时延。通过 LEO 卫星网络提供大面积的小区覆盖,为高速移动 UE 提供低切换频率的下行传输服务,从而减小由于切换失败导致的中断,提高了用户 QoS。

1 网络架构

为便于分析验证,地面网络仅考虑 5G-NR 独立组网,上下行解耦与非解耦网络架构见图 1。

图 1(a)为上下行解耦网络架构地面与卫星组网示意,5G-NR 独立组网模式与 LEO 卫星网络下行传输架构中每个 LEO 卫星小区按时分双工(Time Division Duplexing, TDD)模式将大多数载波资源配置在下行链路,其覆盖的多个 5G-NR 小区按 TDD 模式将大多载波资源配置在上行链路,其中,一个上行载波是补充上行链路(Supplementary Uplink, SUL)载波^[8],其来源可以是一段专有的上行载波,也可以是一段与 LTE(Long Term Evolution)共享的上行载波。SUL 载波位于 1.8 GHz 频段,5G-NR 的下行链路和上行链路载波位于 3.5 GHz 频段,LEO 卫星的下行链路载波位于 20 GHz 或者其他毫米波频段。该架构中用户有三种接入方案,红色移动端表示用户上下行链路均接入 3.5 GHz 频段;蓝色移动端表示用户上行链路接入 1.8 GHz 频段,下行链路接入 3.5 GHz 频段;黄色移动端表示用户

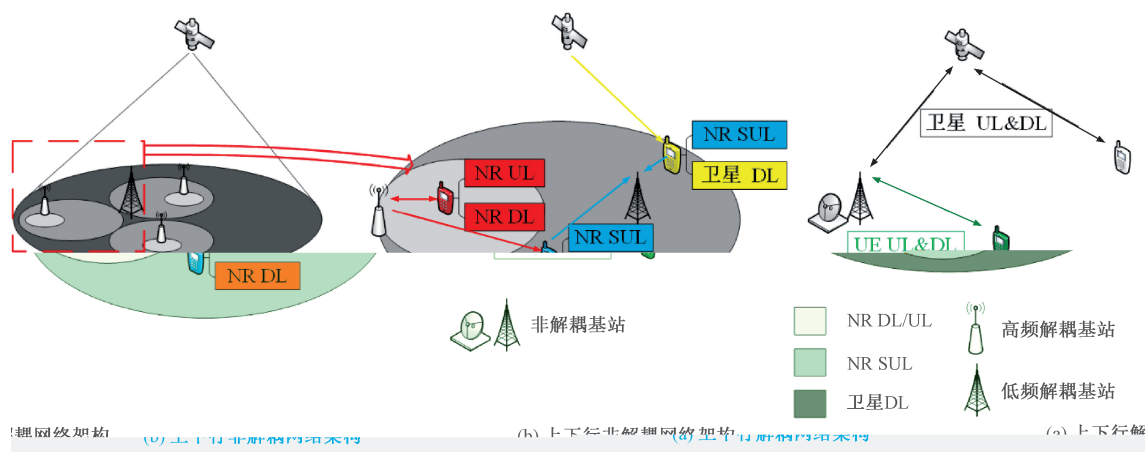


图 1 上下行解耦与非解耦网络架构示意

上行链路接入 1.8 GHz 频段,下行链路接入 20 GHz 或毫米波频段。由于本文只关注第三种接入方案,其他两种接入方案具体性能分析不再讨论。

图 1(b)为上下行非解耦网络架构地面与卫星组网示意,其中绿色移动端表示普通移动终端,它们无法直接建立与卫星的链接,需要通过中继基站的卫星发射接收天线转发与卫星之间的通信信息^[18],只有卫星终端可以直接与卫星建立通信链路,但这部分用户独立于现有的地面通信系统,因此不在本文讨论范围内。

图 2 为系统上下行解耦架构下载波配置示意。假设 UE 采用 LEO 卫星与 5G-NR 双模上下行解耦系统,地面基站可以为不同位置不同需求的 UE 提供不同接

入服务,如靠近小区中心的低速用户上下行都接入 3.5 GHz 频段载波,以获得高速率的通信服务,而高速用户上行链路则接入 1.8 GHz 载波,下行链路接入 20 GHz LEO 卫星载波,利用 LEO 卫星覆盖范围大的特点减小下行链路切换频率。

1.1 上行随机接入与下行资源分配

由于在 UE 发起随机接入之前,网络无法感知到 UE 的存在,所以无法通过信令配置的方法为小区中心和小区边缘这两类 UE 配置不同上行资源。5G-NR 系统中采用了让 UE 自行选择上行载波的机制,即网络在 SUL 载波的配置信息中额外定义了一个接收信号强度(Reference Signal Receiving Power, RSRP)阈

图2 上下行数据解耦载波配置示意

值,UE可以根据自己测量的RSRP值与该阈值的大小关系确定自身位于小区中心或者边缘,从而选择合适的上行载波发起随机接入。本方案UE上行随机接入参照5G-NR系统,但与5G-NR系统不同,下行链路可以通过地面基站或者LEO卫星提供。地面基站优势在于距离短、衰落小,而LEO卫星优势在于覆盖范围大、频谱资源丰富,因此下行资源配置更加复杂,需要通过中心控制器决策。本文上下行解耦架构参照5G-NR系统,UE可以先通过接入地面5G-NR网络向中心控制器发送自己测得各信道的RSRP值,由网络中心控制器来决定是否为UE配置LEO卫星下行资源,并将决策发送至UE。中心控制器可以根据网络的负载和各UE反馈的RSRP值等参数调度信道资源。

由于5G-NR系统已经考虑非对称业务,可以灵活调整NR DL/UL载波中上行时隙和下行时隙,使得系统总吞吐量最大化。文中系统为了更充分利用LEO卫星的频谱资源,NR DL/UL载波可通过将下行时隙分配给上行业务的方式,增加系统UE接入数量,而该部分UE的下行服务则通过LEO卫星提供。

1.2 非地面组网解耦架构逻辑信道

逻辑信道分为控制信道与业务信道,控制信道用于传输控制面信息,包括广播控制信道(Broadcast Control Channel, BCCH)、寻呼控制信道(Paging Control Channel, PCCH)、公共控制信道(Common Control Channel, CCCH)、专用控制信道(Dedicated Control Channel, DCCH)和共享控制信道(Shared Control Channel, SHCCH)。业务信道仅用于传输用户面信息,包括专用业务信道(Dedicated Traffic Channel, DTCH)和公共业务信道(Common Control Channel, CTCH)。

系统逻辑信道工作链路见图3,BCCH与PCCH工作在LEO卫星下行链路和地面基站下行链路。在建立无线资源控制(Radio Resource Control, RRC)连接前,UE与LEO卫星网络无法通信,故CCCH无法工作在LEO卫星下行链路。由于SUL频段与LTE共享频段,并且LTE不支持SHCCH和CTCH,所以NR SUL链路不包含SHCCH与CTCH。DCCH与DTCH包含在所有链路上。

图3 系统逻辑信道工作链路示意

2 系统性能分析

2.1 系统排队时延分析

本节将分析基于上述架构的系统排队时延。在上下行非解耦网络架构中,UE无法直接接入LEO卫星网络,若以LEO卫星中继节点接入,来自LEO卫星网络的信息需要通过地面基站转发^[18]。在上下行解耦架构中,UE可以通过LEO卫星下行链路直接获取来自LEO卫星网络的信息。假设两种架构总通信业务进入网络的到达过程都服从泊松过程,且各队列的服务时间是独立的指数分布,根据Jackson定理,系统的顾客数由每个独立的M/M/1队列决定。

两种架构的上行业务流示意图4。假设用户业务类型分为地面业务和卫星业务,分别需要地面服务器和卫星服务器进行服务。用户传输业务请求至地面基站缓存区,并等待地面基站服务,地面基站分别将地面业务传输至地面服务器缓存区,卫星业务传输至卫星缓存区,等待对应服务器服务。假设基站与卫星收发天线处缓存区服务速率为 μ_1 ,到达任务需要通过卫星网络服务的数量占总任务的比例为 k ,地面业务与卫星业务到达速率之和为 λ 。令 $\rho_1 = \frac{\lambda}{\mu_1}$,基站与卫星

收发天线处缓存区队列长度为 $\frac{\rho_1}{1 - \rho_1}$,则上行业务流

平均总时延为 $\frac{\rho_1}{(1 - \rho_1)\lambda}$ 。

图4 上行业务流示意

两种架构的下行业务流示意图5。非解耦架构中,卫星业务由卫星服务器传输至卫星缓存区并等待服务,再由卫星将业务传输至非解耦基站缓存区并等待服务,最后由非解耦基站将业务传输至用户;地面业务由地面服务器将业务传输至非解耦基站缓存区并等待服务,最后由非解耦基站将业务传输至用户。解耦

架构中,卫星业务由卫星服务器传输至卫星缓存区并等待服务,再由卫星将业务传输至用户;地面业务由地面服务器将业务传输至解耦基站缓存区并等待服务,最后由解耦基站将业务传输至用户。假设卫星处缓存区服务速率为 μ_2 ,解耦基站与非解耦基站服务速率均为 μ_3 。令 $\rho_2 = \frac{\lambda}{\mu_2}, \rho_3 = \frac{\lambda}{\mu_3}$,则卫星缓存区队列 N_2 长度为 $\frac{k\rho_2}{1-\rho_2}$,非解耦架构中基站缓存区队列 N_3 长度为 $\frac{\rho_3}{1-\rho_3}$,解耦架构中基站缓存区队列 N_4 长度为 $\frac{(1-k)\rho_3}{1-\rho_3}$ 。非解耦架构中下行业务流平均总时延为 $(N_2 + N_3)/\lambda$,解耦架构中下行业务流平均总时延为 $(N_2 + N_4)/\lambda$ 。

图 5 下行业务流示意

2.2 移动切换失败概率

本节分别对解耦架构与非解耦架构系统的阻塞率进行分析。在上下行解耦架构中,假设 BS 区域中被 LEO 卫星下行链路波束覆盖的 UE 与非解耦架构中的 UE 具有相同的资源,以便两种架构的性能进行比较。由于 5G-NR 系统解耦架构支持为非对称业务灵活分配上下行时隙,因此文中地面网络下行业务卸载至卫星后,原下行链路信道资源可以分配给上行链路,以便在需要时支持更多的 UE 终端。

由于解耦架构与非解耦架构中 UE 的上行链路始终接入地面基站,本节仅讨论下行切换的性能,并假设解耦架构与非解耦架构中上行链路切换失败的概率相同。为具有普遍性,假设 LEO 卫星下行覆盖采用固定信道分配方案,将用于下行链路的固定信道集分配给每个小区。由于卫星覆盖范围远大于地面基站覆盖范围,同时 LEO 卫星下行链路使用高频载波,为便于比较,假设两种架构中下行覆盖单位面积的平均信道数相同。

文献[19]中模型假设 UE 服务有 I 种类型,第 i 种类型业务需要 b_i 单位的信道数。当业务呼叫到达小

区 x 时,可用的子信道数为 $A(x)$ 。如果 $A(x) \geq b_i$,系统接收调用请求并分配所需的子通道。否则,这个切换请求需要等待足够的子通道。如果等待超时,连接将被中断。业务到达示意图 6,图中 $\Lambda_{i,j,\text{out}}$ 为服务完成的用户的离开速率; $\Lambda_{i,j,\text{ho}}$ 为服务中发生切换的用户的离开速率。

图 6 业务到达示意

其中:

(1) 第 i 种业务类型的新呼叫到达小区 j 的过程服从参数 $\lambda_{i,j,\text{nc}}$ 的泊松过程。

(2) 第 i 种业务类型的业务占有小区 j 通信资源的时间服从参数 $\mu_{i,h}$ 的指数分布。

(3) 第 i 种业务类型的业务剩余通信时间服从参数 $\mu_{i,c}$ 的指数分布。

(4) 对于一个给定的移动用户从小区 j 进入小区 j' 的概率为 $T_{jj'}$,其中 $j' \in N(j)$ 为 j 的相邻小区。

记 $P_{i,j,b}$ 为新到小区 j 的第 i 种业务阻塞概率; $P_{i,j,\text{ho}}$ 为切换到小区 j 的第 i 种业务阻塞概率。 $\lambda_{i,j,\text{ho}}$ 为小区 j 中第 i 种业务的切换到达率。

小区 j 的平均输出率 $\Lambda_{i,j}$ 可以根据非阻塞的新到呼叫到达率与切换呼叫到达率之和求出

$$\Lambda_{i,j} = (1 - P_{i,j,b})\lambda_{i,j,\text{nc}} + (1 - P_{i,j,\text{ho}})\lambda_{i,j,\text{ho}} \quad (1)$$

切换输出率 $\Lambda_{i,j,\text{ho}}$ 为平均输出率 $\Lambda_{i,j}$ 的 $\frac{\mu_{i,h}}{\mu_{i,h} + \mu_{i,c}}$ 倍,表示为

$$\Lambda_{i,j,\text{ho}} = \frac{\mu_{i,h}}{\mu_{i,h} + \mu_{i,c}} [(1 - P_{i,j,b})\lambda_{i,j,\text{nc}} + (1 - P_{i,j,\text{ho}})\lambda_{i,j,\text{ho}}] \quad (2)$$

同时小区 j 切换输入流量依赖相邻小区切换输出,即 $\lambda_{i,j,\text{ho}} = \sum_{j' \in N(j)} T_{jj'} \Lambda_{i,j',\text{ho}}$ 。通过迭代可以计算每种业务的阻塞率,迭代计算式为

$$\begin{aligned} \Lambda_{i,j,\text{ho}}^n &= \frac{\mu_{i,h}}{\mu_{i,h} + \mu_{i,c}} [(1 - P_{i,j,b})\lambda_{i,j,\text{nc}} + \\ &\quad (1 - P_{i,j,\text{ho}}^{n-1})\lambda_{i,j,\text{ho}}^{n-1}] \\ \lambda_{i,j,\text{ho}}^n &= \sum_{j' \in N(j)} T_{jj'} \Lambda_{i,j',\text{ho}}^n \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $\lambda_{i,j,\text{ho}}^0$ 通过式(3)中阻塞率 $P_{i,j,b}, P_{i,j,\text{ho}}$ 取零时求得,即

$$\begin{aligned} \Lambda_{i,j,ho}^0 &= \frac{\mu_{i,h}}{\mu_{i,h} + \mu_{i,c}} (\lambda_{i,j,nc} + \lambda_{i,j,ho}^0) \\ \lambda_{i,j,ho}^0 &= \sum_{j' \in N(j)} T_{jj'} \Lambda_{i,j',ho}^0 \end{aligned} \quad (4)$$

3 系统仿真分析

3.1 系统排队时延仿真

根据排队的系统时延模型,对上下行解耦和非解耦网络架构进行平均时延仿真对比验证。

本次仿真验证了在不同业务占比中,两种网络架构中的排队时延变化,同时对比在不同卫星服务速率对时延的影响,见图7。

图7中, μ_{gNB} 为地面基站的服务速率, μ_{sate} 为LEO卫星的服务速率。在LEO卫星服务时间相同的条件下,解耦架构的时延表现总是优于非解耦架构。当LEO卫星的服务能力提升时,解耦架构的时延将快速降低,而非解耦架构由于受限于地面基站,时延下降较慢。

图7 业务排队性能仿真结果

3.2 系统切换失败概率仿真

仿真参数参考文献[19],假设用户终端分为两类,车下终端移动性较低,几乎不会发生切换;车上用户终端移动性高,发生切换的概率较大。其他参数假设如下:

- (1) 车下终端平均连接时长为4 min,车上终端为3 min。
- (2) 车下终端最大排队等待时间为3 s,车上终端为2 s。
- (3) 车下终端与车上终端比例为3:2。
- (4) 车下终端呼叫需要占用2单位信道资源,车上终端呼叫需要占用1单位信道资源。
- (5) 根据文献[19],每分钟卫星小区中车上终端切换概率为0.01,按照卫星与地面小区覆盖面积的比值,假设车上终端在卫星小区与地面小区切换概率的

比例为1:500。

切换性能仿真结果见图8,其中 $P_{n,f}$ 为非解耦架构中固定用户的阻塞率; $P_{n,m}$ 为非解耦架构中移动用户的阻塞率; $P_{d,f}$ 为解耦架构中固定用户的阻塞率; $P_{d,m}$ 为解耦架构中移动用户的阻塞率。

图8 切换性能仿真结果

图8中,不仅车下终端,车上终端在解耦架构中的阻塞率也比非解耦架构中的阻塞率小。与非解耦架构相比,在解耦架构中,车上终端从一个小区移交到另一个小区的概率要低得多,原因分析如下:

(1) 车上终端的切换延迟被限制在一个小范围内,车上终端必须在有限的时间内完成切换过程,否则连接将被中断。因此,在呼叫到达率上升的同时,移动终端的阻塞率也在迅速上升。

(2) 在解耦架构中,阻塞率远低于非解耦架构,这些LEO卫星拥有过去不方便使用的资源。因此,车上终端和车下终端都可以从中受益。

(3) 由于LEO卫星覆盖范围大,下行切换的概率较小。此外,考虑解耦架构上行链路可以获得更多的地面基站资源,而这些资源原本被用于非解耦架构下行链路,解耦架构上行链路的性能将在实际中进一步提高。

4 结论

基于未来轨道交通移动通信的发展,考虑高铁物联网大速率通信和全方位感知,提升列车控制调度的可靠性以及满足未来乘客的多样化服务需求,本文提出一种基于上下行解耦技术的低轨卫星网络架构。在这种架构下,列车终端可以直接获得低延迟和低切换中断率的卫星通信服务,能避免传统非解耦架构中下行通信链路受限于地面基站处理能力的状况,并且随着卫星性能的进一步提升,上下行解耦架构的性能提升将强于非解耦架构。仿真结果表明,上下行解耦架构总体上能减小空地一体化网络架构的排队时延,并且随着LEO卫星性能的增强,时延会进一步下降。此

外,由于 LEO 卫星网络大覆盖使移动用户切换概率降低,从而减小了由于切换失败导致的阻塞概率,提升了服务质量。

未来的 SAGIN 将更加普遍与灵活,能够满足高性能通信服务和多种应用需求。在动态场景下,用户和 LEO 卫星都具有移动性,这就使得切换更具挑战性。由于 LEO 卫星网络下行切换时延大、服务时间短,地面移动用户必须选择合适的目标才能获得更好的服务。深度学习算法可以用来简化迭代计算,在有限的时间求解复杂的模型,使得 LEO 卫星网络下行链路的快速无缝切换成为可能。同时,未来地面 UE 的移动性将会大幅提高,如何为其提供高效稳定的服务将是一个挑战。具有传感能力的 LEO 卫星可以定位断开链接的用户,并为其提供定向波束,通过精确提供资源,提高用户服务质量和系统效率。由于 LEO 卫星高度的优势,LEO 卫星传感波束可以比地面基站传感波束更高效地工作。

参考文献:

- [1] 陈永,詹芝贤,刘雯.下一代高速铁路 LTE-R 时间同步网协议脆弱性分析[J].铁道学报,2023,45(1):63-74.
CHEN Yong, ZHAN Zhixian, LIU Wen. Vulnerability Analysis of Next-generation High-speed Railway LTE-R Time Synchronization Network Protocol [J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(1): 63-74.
- [2] ZHONG G D, XIONG K, ZHONG Z D, et al. Internet of Things for High-speed Railways [J]. Intelligent and Converged Networks, 2021, 2(2): 115-132.
- [3] 刘江,陈华展,蔡伯根,等.基于非参数贝叶斯模型的列车卫星定位方法[J].铁道学报,2020,42(1):59-68.
LIU Jiang, CHEN Huazhan, CAI Baigen, et al. Satellite-based Train Positioning Method Based on Non-parametric Bayesian Model [J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(1): 59-68.
- [4] 陆德彪,唐德璋,蔡伯根,等.基于最大偏差准则的列车卫星定位完好性监测方法[J].铁道学报,2019,41(6):81-90.
LU Debiao, TANG Dezhang, CAI Baigen, et al. GNSS-based Train Localization Integrity Monitoring Analysis Method Considering Maximum Offset Principle [J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(6): 81-90.
- [5] 刘宇航,巴晓辉,蔡伯根,等.面向铁路定位装备测试的实时卫星信号生成方法[J].铁道学报,2022,44(12):46-55.
LIU Yuhang, BA Xiaohui, CAI Baigen, et al. Real-time Satellite Signal Generation Method Based on Railway Positioning Equipment Testing [J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(12): 46-55.
- [6] XIONG J, GUI L, LIU B, et al. On Digital TV Broadcasting Coverage Scheme in Carriages of Chinese High Speed Railway [C] // 2010 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB). New York: IEEE, 2010: 1-4.
- [7] LUO W T, FANG X M, CHENG M, et al. An Optimized Handover Trigger Scheme in LTE Systems for High-speed Railway [C] // Proceedings of the Fifth International Workshop on Signal Design and Its Applications in Communications. New York: IEEE, 2012: 193-196.
- [8] YANG C Z, LU L H, DI C, et al. An On-vehicle Dual-antenna Handover Scheme for High-speed Railway Distributed Antenna System [C] // 2010 6th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM). New York: IEEE, 2010: 1-5.
- [9] SONG H, FANG X M, YAN L. Handover Scheme for 5G C/U Plane Split Heterogeneous Network in High-speed Railway [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(9): 4633-4646.
- [10] 3GPP. Technical Specification Group Radio Access Network; Study on New Radio (NR) to support non terrestrial networks; TR 38. 811 [S]. Sophia Antipolis: 3GPP, 2018.
- [11] CASONI M, GRAZIA C, KLAPEZ M, et al. Integration of Satellite and LTE for Disaster Recovery [J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(3): 47-53.
- [12] WANG Z, CUI G F, LI P X, et al. Design and Implementation of NS3-based Simulation System of LEO Satellite Constellation for IoTs [C] // 2018 IEEE 4th International Conference on Computer and Communications (ICCC). New York: IEEE, 2019: 806-810.
- [13] HUAN L, XU Z, BO R. Dynamic Monitoring System of High-speed Railway Based on GPS/SINS [C] // 2014 International Conference on Mechatronics and Control (ICMC). New York: IEEE, 2015: 1617-1619.
- [14] 3GPP. Technical Specification Group Services and System Aspects; Release 15 Description; Summary of Rel-15 Work Items, V15. 0. 0 [S]. Sophia Antipolis: 3GPP, 2019.
- [15] ZHAO X Y, CHEN J G, LI P, et al. 5G NSA Radio Access Network Sharing for Mobile Operators; Design, Realization and Field Trial [C] // 2020 IEEE 20th International Conference on Communication Technology (ICCT). New York: IEEE, 2020: 454-461.
- [16] ELBAMBY M S, BENNIS M, LATVA-AHO M. UL/DL Decoupled User Association in Dynamic TDD Small Cell Networks [C] // 2015 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS). New York: IEEE, 2016: 456-460.
- [17] SEKANDER S, TABASSUM H, HOSSAIN E. A Matching Game for Decoupled Uplink-downlink User Association in Full-Duplex Small Cell Networks [C] // 2015 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). New York: IEEE, 2016: 1-6.
- [18] LEE J H, KO Y C. Optimization for LEO Satellite-ground Integrated Networks via Deep Reinforcement Learning [C] // 2021 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). New York: IEEE, 2021: 1758-1762.
- [19] SORET B, POPOVSKI P, STERN K. A Queueing Approach to the Latency of Decoupled UL/DL with Flexible TDD and Asymmetric Services [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(6): 1704-1708.

(责任编辑 李嘉懿)