NR NTN移动性管理增强策略分析

Analysis on Mobility Enhancement Strategies for NR NTN

司　亮[1]，王　森[1]，李益锋[2]，张建国[2]（1. 中讯邮电咨询设计研究院有限公司，北京 100048；2. 华信咨询设计研究院有限公司，浙江 杭州 310052）

Si Liang[1], Wang Sen[1], Li Yifeng[2], Zhang Jianguo[2]（1. China Information Technology Designing & Consulting Institute Co., Ltd., Beijing 100048, China; 2. Huaxin Consulting Co., Ltd., Hangzhou 310052, China）

摘　要：

首先阐述了NR NTN移动性增强需要解决的问题，包括大传播时延导致的信令延迟、卫星移动引起的频繁小区变化、小区中心和小区边缘之间的信号强度变化不明显导致的移动性的鲁棒性较低以及NTN终端频繁测量TN小区导致的功耗增加。针对这些问题，提出了无RACH切换以及具有重新同步的卫星转换方案，最后给出了NTN-TN间移动性管理增强策略。

关键词：

NR NTN；无RACH切换；PCI不变小区；NTN-TN移动性；卫星转换

doi：10.12045/j.issn.1007-3043.2024.12.008

文章编号：1007-3043（2024）12-0048-06

中图分类号：TN929.5

文献标识码：A

开放科学（资源服务）标识码（OSID）：

Abstract：

Firstly, it analyzes the issues that need to be addressed for NR NTN mobility enhancement, including increased signalling latency due to large propagation delay, frequent cell change due to satellite movement, lower robustness of measurement-based mobility due to reduced signal strength variation between cell centers and cell edges, and serious power consumption due to NTN UE frequently measure neighbor TN cells. To address these issues in NTN, it puts forward RACH-less handover and satellite switch with re-synchronization. Finally, it analyzes the NTN-TN mobility enhancement strategies.

Keywords：

NR NTN; RACH-less handover; PCI unchanged cell; NTN-TN mobility; Satellite switch

引用格式：司亮，王森，李益锋，等. NR NTN移动性管理增强策略分析[J]. 邮电设计技术，2024（12）：48-53.

1 概述

为了实现无处不在的通信服务，3GPP在Rel-17版本中将卫星通信作为地面5G蜂窝移动通信网的重要补充，简称为非地面网络（Non-Terrestrial Networks，NTN）。NTN由地面NTN网关（含gNB）、卫星、UE三大部分组成。卫星和UE之间的链路称为服务链路，NTN网关和卫星之间的链路称为馈电链路[1]。

NTN的移动性包括连接模式下的移动性和空闲模式下的移动性。其中，连接模式下的移动性由网络驱动，主要是切换，包括服务链路的切换和馈电链路的切换；空闲模式下的移动性由UE驱动，主要是小区重选，包括NTN小区重选到地面网络（Terrestrial Networks，TN）小区，也包括TN小区重选到NTN小区。相比于TN，NTN移动性管理面临以下4个难点[2]。

难点1：大传播时延导致的信令延迟。

难点2：低轨道（Low Earth Orbit，LEO）卫星高速移动引起的频繁小区变化导致的信令风暴。

难点3：小区中心和小区边缘之间的信号强度变化不明显导致的移动性的鲁棒性较低。

难点4：NTN终端频繁测量TN小区导致的功耗增加。

收稿日期：2024-11-06

针对上述难点，Rel-17增加了基于距离的D1事件和基于时间的T1事件，D1事件适合于准地面固定小区，T1事件适合于所有小区，部分解决了难点3。Rel-18增加了基于距离的D2测量事件，D2事件适合于地面移动小区，完全解决了难点3。本文提出了无RACH切换以及具有重新同步的卫星转换（也称PCI不变小区）方案，解决了难点1和难点2。除此之外，对NTN向TN重选进行了增强，gNB通过SIB25向NTN终端指示TN覆盖区，以减少UE功耗，解决了难点4。

本文接下来对无RACH切换、具有重新同步的卫星转换和NTN-TN间移动性管理增强策略进行分析。

2 无RACH切换

在NTN中，LEO卫星高速移动带来的一大挑战是大量UE频繁切换导致的信令开销的显著增加，为了解决这个问题，本文提出了2个解决方案，分别是无RACH切换和具有重新同步的卫星转换。

由于NTN的传播时延大，UE数量较多，随机接入过程的持续时间比TN中要长得多，随机接入尝试的竞争也比TN中更严重。无RACH切换可以让UE在执行切换过程中跳过随机接入过程，因此可以减少竞争中的持续时间，减少信令开销和用户数据的中断时间。

根据UE补偿的TA（Timing Advance）不同，无RACH切换有以下4个潜在的场景[3]。

场景1：具有相同馈电链路的卫星内切换，例如同一网关/gNB、同一卫星内不同波束间切换。

场景2：具有不同馈电链路的卫星内切换，例如不同网关/gNB、同一卫星内不同波束间切换。

场景3：伴随网关/gNB切换的卫星间切换，例如不同网关/gNB、不同卫星间切换。

场景4：具有相同网关/gNB的卫星间切换，例如同一网关/gNB、不同卫星间切换。

无RACH切换的4个潜在场景如图1所示[4]。

当可以使用目标小区的辅助信息（例如，历元时间、星历表、公共TA）预补偿来维持UL同步时，对于具有相同馈电链路的卫星内切换（即场景1），无RACH切换是可能的。除此之外，当UE可以保持UL同步时，无RACH切换也可用于具有不同馈电链路的卫星内切换（即场景2）以及卫星间切换（场景3和场景4）。综上所述，当UE具有在目标小区中进行第一次UL传输的有效信息时，在NTN中可以实现无RACH切换。

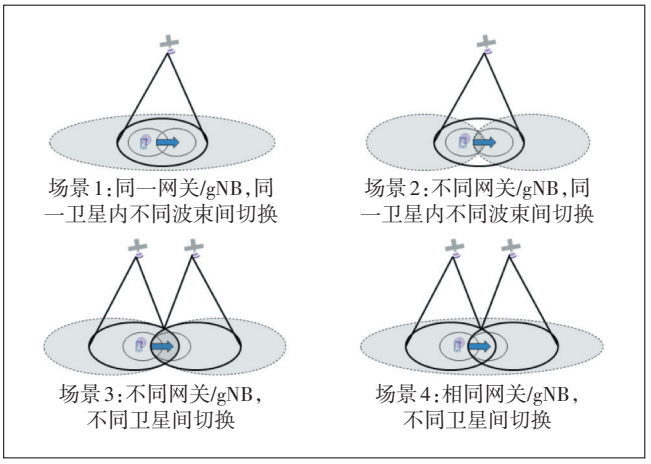

图1　无RACH切换的4个潜在场景

UE执行无RACH切换的流程如图2所示[5]。

对于无RACH切换流程，有以下4个问题需要详细说明。

a）UE如何获得TA。UE按照式（1）计算定时提前量T_{TA}：

$$T_{TA}=\left(N_{TA}+N_{TA,offset}+N_{TA,adj}^{common}+N_{TA,adj}^{UE}\right)T_c \quad (1)$$

其中，N_{TA}是通过MAC层信令调整的UE专属TA；$N_{TA,offset}$是与网络制式有关的公共TA；$N_{TA,adj}^{common}$是馈电链路的公共TA；$N_{TA,adj}^{UE}$是UE根据自身位置和卫星星历计

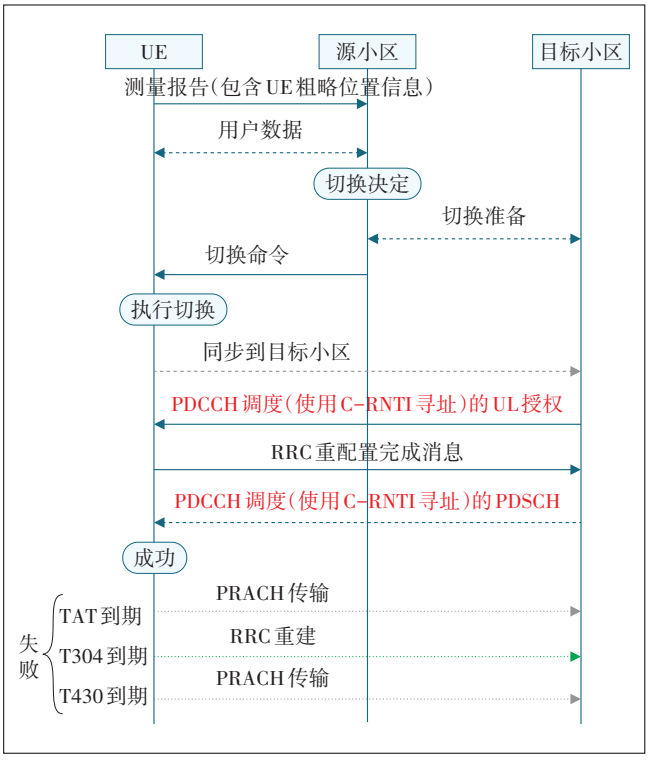

图2　无RACH切换流程

算的UE专用TA[6]。对于无RACH切换,UE需要在没有随机接入的情况下执行UL同步,这意味着UE需要对第1个UL传输的TA值进行自评估。在NTN中,只要UE知道了历元时间、星历表、公共TA,就可以计算出$N_{TA,adj}^{common}$和$N_{TA,adj}^{UE}$,UE可以估计目标小区在相同或者不同馈电链路的卫星内和卫星间切换所需的公共TA。与基于RACH切换相同,在无RACH切换中,N_{TA}等于0[7]。

b) UE如何获得UL授权。无RACH切换的初始UL传输可以使用动态UL授权或者由RRC配置的预分配UL授权。在存在可用的预分配UL授权的情况下,UE选择用于初始PUSCH传输的UL资源,否则,UE监听由C-RNTI加扰的PDCCH,以接收用于PUSCH调度的动态授权资源。由于NR支持多波束操作,gNB需要把调度UE的DL波束信息发送给UE。对于预分配授权,通过配置预分配授权和SSB之间的关联,gNB可以知道UE选择的波束,并使用相应的波束来调度后续的传输。对于动态授权,gNB通过RRC重配置消息中的RACH-LessHO字段向UE提供波束信息,在无RACH切换命令中,有且仅有1个波束指示。

c) 无RACH切换失败后,UE如何处理。对于无RACH切换,当UE在目标小区接收到由C-RNTI寻址的PDCCH(该PDCCH可以是用于DL分配,也可以是用于UL授权)且该PDCCH是新传输指示时,则认为UE成功完成了无RACH切换。当UE计算的目标小区TA出现错误,或者当目标小区的星历表或公共TA信息过期后,可能导致无RACH切换失败[8]。NTN通过T304计时器、T430计时器和时间对齐计时器(Time Alignment Timer,TAT)来判断无RACH切换是否失败。T304计时器用于控制切换过程并确定何时可以声明切换失败,T430计时器用于指示服务和/或邻卫星的星历表和公共TA参数等辅助信息的有效时间。TAT控制MAC实体认为服务小区的UL时间对齐的时长。这3个计时器到期都会导致无RACH切换的失败。如果TAT到期,UE除了需要维持N_{TA}外,释放其他的UL资源,然后再次同步到目标小区并从目标小区获取SIB19,发起随机接入过程。如果T304计时器到期,UE发起RRC重建流程,选择合适的小区并在该小区发起随机接入过程。如果T430计时器到期,UE将再次同步到目标小区并从目标小区获取SIB19,然后发起随机接入过程。

d) 无RACH切换和条件切换结合。条件切换是关于在何时以及如何触发切换,无RACH是关于如何执行切换,两者结合使用可以提供最大的好处。利用基于时间的条件切换,可以在UE仍处于良好的无线条件时,服务小区较早地发送切换命令,预先配置切换执行条件和RRC配置,减少了切换中断风险。而无RACH切换,在信令减少方面会带来明显的好处。因此3GPP在Rel-18支持无RACH切换和基于时间的条件切换组合,且支持预分配授权和动态授权2种模式[9]。

无RACH切换跳过了随机接入过程,因此可以显著减少切换的执行时间,对于基于竞争的随机接入过程,省去了Msg1、Msg2、Msg3和Msg4的发送,节省了UE到gNB往返时间2次,可以节约50 ms(LEO卫星,高度600 km,透明转发)到1 000 ms以上(GEO卫星,透明转发)的切换时间。对于非基于竞争的随机接入过程,省去了Msg1和Msg2的发送,节省了UE到gNB往返时间1次,可以节约25 ms(LEO卫星,高度600 km,透明转发)到500 ms以上(GEO卫星,透明转发)的切换时间。

3 具有重新同步的卫星转换

对于准地面固定小区,由于卫星的高速移动,即使UE处于静止状态,也面临着频繁的切换,这将导致信令开销和功耗的显著增加,以及由于切换命令延迟而导致的服务中断。为了消除由于卫星高速移动而引起的L3切换问题,本文提出了具有重新同步的卫星转换过程,即在PCI不变的情况实现卫星转换。

准地面固定小区的典型场景如图3所示。卫星0和卫星1是属于同一星座同一轨道的2颗相邻卫星,随着卫星的移动,在某个时刻,卫星0覆盖的区域将被卫星1取代[10]。

在图3中,由于卫星0和卫星1连接到同一个gNB,gNB可以配置分别属于卫星0和卫星1的波束,

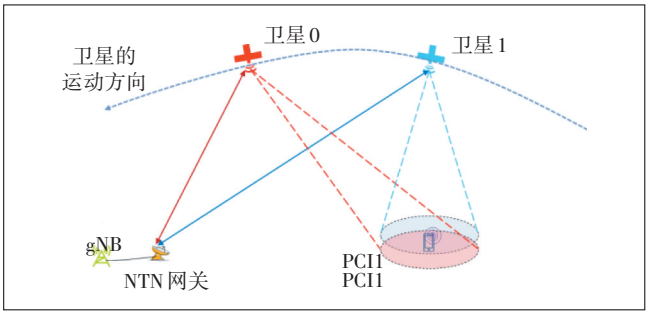

图3 准地面固定小区的典型场景

以便对同一个小区依次提供接入服务，在卫星转换前后，除了与卫星相关的信息（星历表和公共TA参数）发生变化外，其他小区的配置可以保持不变。这些具有相同PCI、相同频率和小区配置的小区被命名为PCI不变小区。PCI不变小区具有降低信令开销、降低延时、避免RACH资源拥塞等优点[11]。

在引入PCI不变小区这个特征后，如果UE没有移出PCI不变小区，则可以在没有切换的情况下，通过具有重新同步的卫星转换过程，NTN继续为UE提供服务。如果UE移出了PCI不变小区，UE可以正常进行切换。

对于具有重新同步的卫星转换，根据源卫星和目标卫星提供的服务时间不同，分为具有重新同步的硬卫星转换（简称硬卫星切换）和具有重新同步的软卫星转换（简称软卫星切换）2个场景（见图4）[12]。

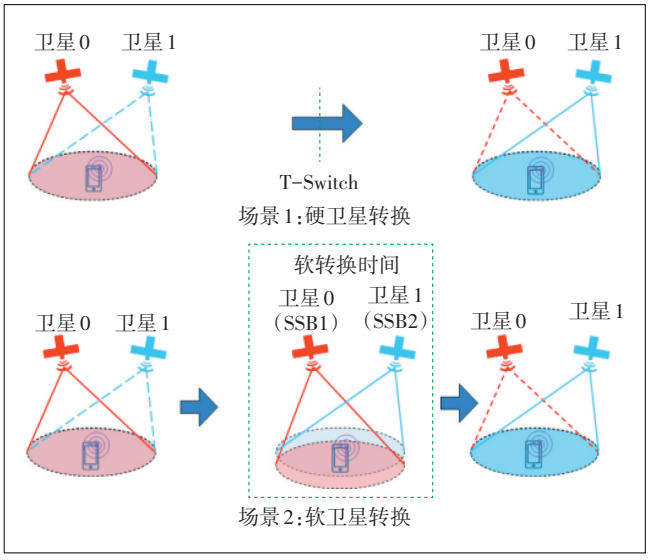

图4　具有重新同步的卫星转换场景

对于硬卫星转换，在前卫星离开之前，即将到来的卫星将不会提供覆盖，在同一时刻一个PCI只关联一颗卫星，因此避免了PCI混淆和干扰问题，但是硬卫星转换会带来服务中断问题。

对于软卫星转换，有一段时间有2颗卫星同时为同一区域提供服务，UE可以在源卫星的t-Service之前执行目标卫星的小区搜索和精细的时间跟踪，因此中断时间更短，甚至完全避免服务中断问题，但是2颗卫星同时具有相同的PCI，会导致PCI冲突和/或干扰。为了使软卫星转换过程可行，需要满足以下3个条件[13]。

a）在软卫星转换期间，UE不能同时连接到源卫星和目标卫星。

b）2颗卫星之间的干扰避免/干扰减轻可以通过gNB来实现，至少要确保UE侧具有相同PCI的SSB不冲突。

c）通过源卫星向UE提供目标卫星的NTN-Congfig，包括公共TA、k_{mac}、星历表和小区特定偏移等信息，这些信息在UE重新同步到目标卫星期间被使用。

在Rel-17中，定义了参数t-Service，用于指示准地面固定小区的服务停止时间，对于PCI不变小区，可以重复使用该参数来指示源卫星的服务停止时间。

对于硬卫星转换，NTN在服务小区的t-Service指示的时间停止通过源卫星为UE提供服务，UE在服务小区的t-Service之后执行与目标卫星的同步。

对于软卫星切换，UE可以在源卫星的t-Service之前开始执行与目标卫星同步，因此引入了t-ServiceStart这个参数，该参数指示了UE可以开始执行与目标卫星同步的最早时刻，目标卫星的t-ServiceStart早于源卫星的t-Service，也即UE可以在目标卫星的t-ServiceStart和源卫星的t-Service之间开始执行与目标卫星的同步，UE执行与目标卫星同步的确切时间取决于UE的实现方式。

硬卫星转换和软卫星转换的时序关系如图5所示[14]。

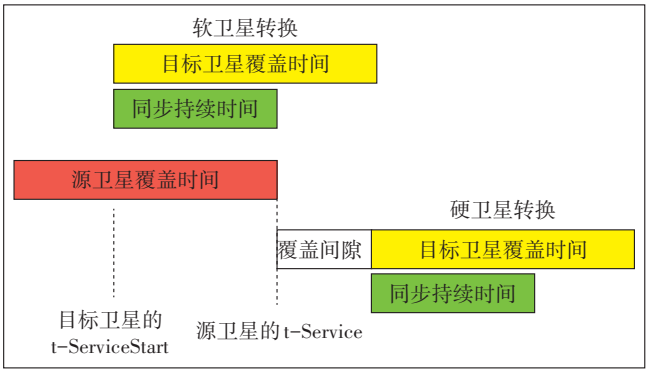

图5　硬卫星转换和软卫星转换的时序关系

在NTN中，UE使用SIB19提供的信息来估计完整的TA，因此，随机接入过程仅用于获得UL授权，卫星转换与无RACH接入相结合有助于减少服务中断时间。对于无RACH接入，UE可以经由服务小区来获取UL授权（即预分配UL授权），或者通过监听目标小区的PDCCH来动态获取UL授权。无RACH接入的卫星

转换过程适合于源卫星和目标卫星的轨道高度和空中位置大致相同的场景,因此在服务链路转换后,UE的往返时间不会发生变化,UE不需要重新同步到目标小区。对于不支持无RACH接入的UE或者不适合使用无RACH接入的场景,UE仍使用基于RACH的接入方式。

具有重新同步的卫星转换流程如图6所示[15]。对于具有重新同步的卫星转换流程,有2点需要说明。

a)在步骤②中,RRC层首先确定卫星转换时间,即T-switch。对于硬卫星转换,T-switch=t-Service;对于软切换,T-switch=[t-ServiceStart,t-Service]。其中,t-Service是源卫星的服务停止时间;t-ServiceStart是目标卫星何时开始为源卫星当前覆盖的区域提供服务的时间信息。对于基于RACH的过程,停止TAT,对于无RACH过程,TAT不受影响。

b)在步骤⑤中,UE发送TA报告作为第1个UL传输,分为2种情况。如果TAT正在运行,UE执行步骤⑤a,UE通过PUSCH或触发PUCCH SR发送第1个UL传输,这种情况对应无RACH接入方式。如果TAT到期,UE执行步骤⑤b,UE通过RACH发起第1个UL传输,这种情况对应的是基于RACH的接入方式。

4 NTN-TN间移动性管理增强

NTN和TN联合部署有重叠和非重叠2种场景,UE接入TN小区会有传播时延短、功耗低等优点,TN小区的优先级通常较高。对于在NTN小区覆盖范围内的UE,如果使用传统的基于小区优先级的重选策略,当UE在远离TN小区的覆盖时,即使UE周围没有TN频率,UE也总是持续地搜索TN频率并尝试执行测量,这会导致UE功耗增加。为了避免对TN频率进行不必要的测量,NTN应提供TN频率的区域信息,UE使用该区域信息来确定是否测量TN频率。如果UE在给定区域内,则允许UE测量TN频率;如果UE在给定区域之外,则UE不应测量TN频率[16]。

为了使NTN UE有效识别TN小区,需要解决以下2个问题。

a)如何提供TN的覆盖区域。提供TN覆盖区的目的是帮助UE节省搜索和测量TN小区的功率,使UE只需要在接近TN覆盖区或在TN覆盖区内时才开始搜索和测量TN小区,因此不需要提供高精度的TN覆盖区信息。由于TN小区通常是集群的,并且在具有不规则覆盖边界的一个区域中可以获得多个TN小区,因此提供近似的TN覆盖边界应该足以让UE识别TN覆盖区,然后在接近TN覆盖区时启动TN小区的测量。以区域中心位置坐标和半径来表示TN覆盖区的优点是实现简单,具有最低的总体信令开销,且既适用于地面移动小区,也适用于准地面固定小区。除此之外,以区域中心位置坐标和半径来表示TN覆盖区的方法可以通过调整相邻TN覆盖区的参考位置和距离阈值(半径)来满足不同的精度需求。如果精度要求较低,

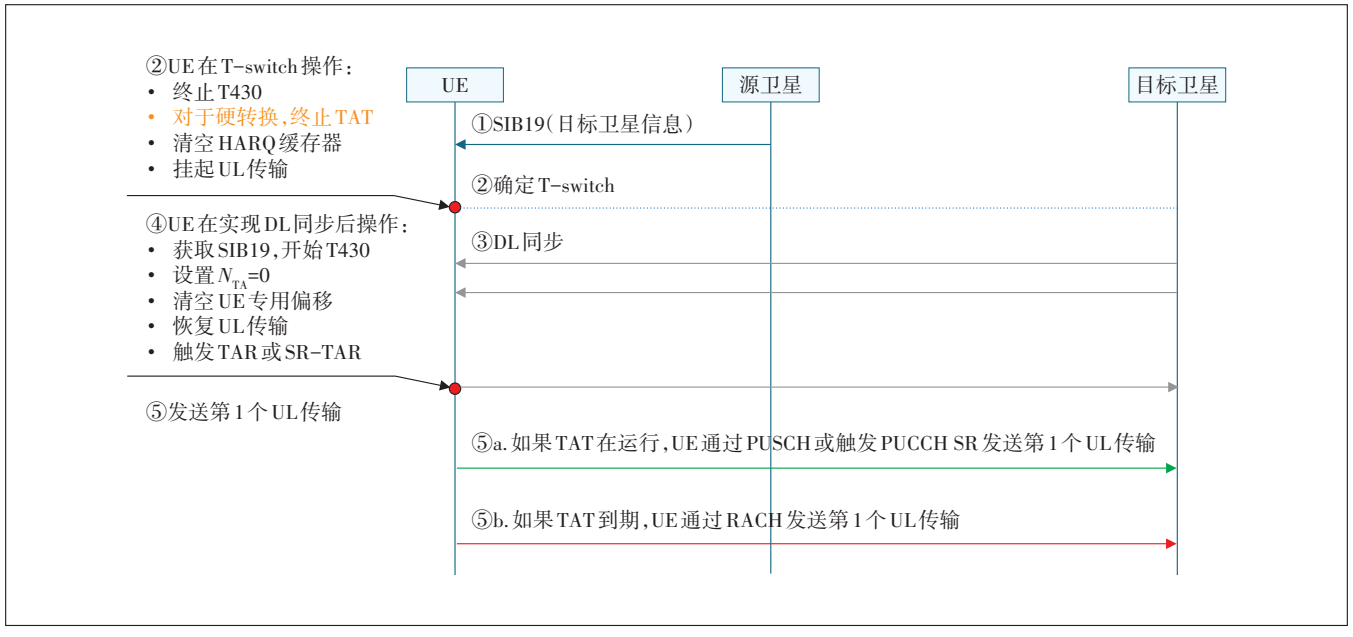

图6 具有重新同步的卫星转换流程

使用大的距离阈值，则一个TN覆盖区将覆盖尽可能多的TN小区，信令开销将更小。如果精度要求较高，使用小的距离阈值，则一个TN覆盖区将覆盖更少的TN小区，高精度可以使UE节省更多的功率，但具有更大的信令开销。在实际部署时，需要为网络配置适当的TN覆盖区，以便在精度和信令开销之间取得平衡。

b）如何提供TN的频率。NTN提供TN频率的信令有2个选项。选项1：在每个TN覆盖区里面直接显示TN的频率列表；选项2：在每个TN覆盖区配置1个TN覆盖区标识，通过在SIB4和SIB5中添加TN覆盖区标识来指示TN覆盖区的频率信息。选项2需要的信令负荷是选项1的25%。NTN提供给UE的TN辅助信息，除了TN覆盖区和频率外，还包括SSB、接入门限、小区优先级等其他信息，这些信息也是在SIB4/SIB5中发送，将TN覆盖区标识与SIB4/SIB5中的小区重选参数一起发送，信令比较简单。因此，最终选择选项2。

综上所述，对于NTN-TN的移动性增强，SIB25提供了以区域中心位置坐标和半径表示的TN覆盖区，最多可以提供32个TN覆盖区。而SIB4/SIB5中添加了TN覆盖区标识来指示TN覆盖区的频率信息以及其他信息。TN覆盖区与频率关联的示例如图7所示[17]。

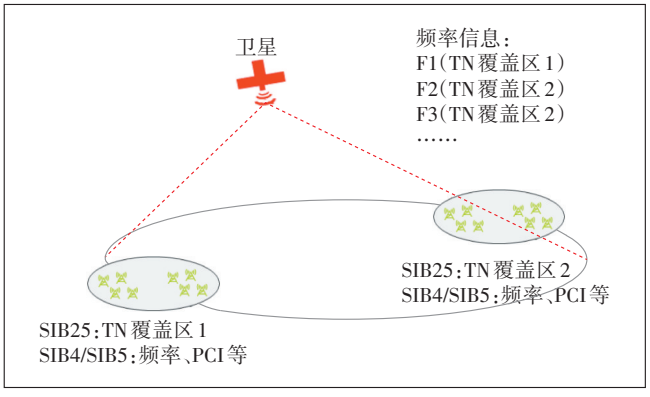

图7　TN覆盖区信息与频率的关联示例

5 结束语

为了解决NR NTN移动性管理过程中面临的挑战，本文创新地提出了无RACH切换和具有重新同步的卫星转换，并对NTN-TN间移动性管理增强策略进行了分析，理论上解决了NTN移动性过程中大的信令延迟和信令风暴以及NTN终端功耗大等难题。在NTN网络实际部署过程中，可借助本文提供的移动性管理增强策略，通过规模实验合理设计移动性管理的相关参数，以达到最优的网络性能。

参考文献：

[1] 3GPP. Study on new radio（NR）to support non-terrestrial networks：3GPP TR 38.811[S/OL].[2024-07-31].ftp://3gpp.org/specs/.
[2] 3GPP. NTN-TN mobility and service continuity：R2-2212338[S/OL].[2024-07-31].ftp://ftp.3gpp.org/Specs/.
[3] 3GPP. Discussion on RACH-less handover for NTN：R2-2301536[S/OL].[2024-07-31].ftp://ftp.3gpp.org/Specs/.
[4] 李思栋，李侠宇，孙建成，等. 手机直连卫星应用发展与挑战[J]. 电信科学，2024，40(4)：43-55.
[5] 3GPP. RACH-less handover for NTN[S/OL].[2024-07-31].ftp://ftp.3gpp.org/Specs/.
[6] 3GPP. NR；physical channels and modulation：3GPP TS 38.211[S/OL].[2024-07-31].ftp://ftp.3gpp.org/Specs/.
[7] 3GPP. Open aspects for RACH-less HO in Rel-18 NTN：R2-2305883[S/OL].[2024-07-31].ftp://ftp.3gpp.org/Specs/.
[8] 3GPP. Remaining issues on RACH-less HO in NTN：R2-2306071[S/OL].[2024-07-31].ftp://ftp.3gpp.org/Specs/.
[9] 3GPP. Discussion on NTN RACH-less handover：R2-2302698[S/OL].[2024-07-31].ftp://ftp.3gpp.org/Specs/.
[10] 3GPP. Discussion on PCI unchanged scenario：R2-2300209[S/OL].[2024-07-31].ftp://ftp.3gpp.org/Specs/.
[11] 3GPP. Service link switching with PCI unchanged：R2-2301269[S/OL].[2024-07-31].ftp://ftp.3gpp.org/Specs/.
[12] 3GPP. Satellite switching with unchanged PCI：R2-2310307[S/OL].[2024-07-31].ftp://ftp.3gpp.org/Specs/.
[13] 3GPP. Discussions on SMTC configuration for satellite switch without PCI change：R2-2312546[S/OL].[2024-07-31].ftp://ftp.3gpp.org/Specs/.
[14] 3GPP. Major issues for satellite switch with PCI unchanged：R2-2312279[S/OL].[2024-07-31].ftp://ftp.3gpp.org/Specs/.
[15] 3GPP. RACH-less satellite switch procedure：R2-2313877[S/OL].[2024-07-31].ftp://ftp.3gpp.org/Specs/.
[16] 3GPP. Cell reselection enhancements for NTN-NTN and NTN-TN mobility：R2-2212079[S/OL].[2024-07-31].ftp://ftp.3gpp.org/Specs/.
[17] 3GPP. Discussion on NTN-TN cell re-selection：R2-2304014[S/OL].[2024-07-31].ftp://ftp.3gpp.org/Specs/.

作者简介：
司亮，高级工程师，硕士，主要从事卫星互联网、空天地一体网络规划和新技术研究工作；王森，高级工程师，注册咨询师，硕士，主要从事运营商移动通信网络规划建设和解决方案课题研究工作；李益锋，毕业于浙江工业大学，高级工程师，主要从事无线网络的规划与设计工作；张建国，毕业于南京邮电学院，正高级工程师，硕士，主要从事无线网络的规划和设计工作。