

# 5G NTN启航

## 5G非地面网络技术概论

白皮书 | 01.00 版 | Reiner Stuhlfauth

**ROHDE & SCHWARZ**

Make ideas real



# 目录

<b>1</b>	<b>引言</b>	<b>3</b>
1.1	NR-NTN	7
1.2	IoT-NTN	8
1.3	卫星通信领域的六大技术挑战	9
<b>2</b>	<b>商用和专用卫星星座 – 概述</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>NTN架构和星座方面</b>	<b>14</b>
3.1	NTN用例	15
3.2	频谱方面	18
3.3	能够使用NTN的用户设备	23
3.4	卫星接入节点的无线传输和接收	25
3.5	卫星星座	27
3.6	NewSpace卫星 – 架构演进	31
3.7	编排、管理和规划方面	34
3.8	轨道星座的题外话（开普勒物理学）	37
3.9	星历表	39
3.10	5G NTN 架构详述	43
3.10.1	5G系统架构、核心网和服务化架构	44
3.10.2	透传NTN NG-RAN架构	46
3.10.3	再生NTN NG-RAN架构	49
3.10.4	NTN回传和IAB	52
3.10.5	星间链路 (ISL)	53
3.10.6	地面与非地面网络之间的互通及多连接	55
<b>4</b>	<b>NTN射频和挑战</b>	<b>58</b>
4.1	NTN信道模型	58
4.1.1	大尺度衰落	62
4.1.2	链路级仿真的小尺度信道模型	63
4.2	路径损耗和链路预算	66
4.3	往返时间和差分延迟	70
4.4	载波频移（多普勒频移）	73
4.5	NTN中的法拉第旋转和极化	75
<b>5</b>	<b>NTN的信令流程和协议栈</b>	<b>77</b>
5.1	5G NTN 协议栈	77
5.2	HARQ	80
5.3	时间提前量	81
5.4	随机接入	85
5.5	调度请求 (SR) 和缓冲区状态报告 (BSR)	88
5.6	时序关系增强	89
5.7	移动性场景	93
5.8	测量和测量报告	96
5.9	跟踪区域更新 (TAU)	97
5.10	馈线链路切换	99
5.11	NTN和跨国移动性管理	102
5.12	NTN UE节电	103

<b>6</b>	<b>技术展望、归纳和总结</b> .....	107
6.1	3GPP第18版中的NTN – 对第18版后续标准的展望 .....	107
6.2	关于NTN演进的长期展望 – 通往6G之路? .....	108
6.3	归纳和总结 .....	110
<b>7</b>	<b>参考文献</b> .....	111
<b>8</b>	<b>标准规范</b> .....	114
<b>9</b>	<b>缩略语</b> .....	116

# 前言和免责声明

5G非地面网络 (NTN) 是一种旨在使地球表面上或接近地球表面的5G用户终端连接至位于卫星上的非地面基站的技术。我们认为这项技术仍将经历漫长的发展演进。本白皮书的目的是概述该技术的主要方面和相应的挑战。我们已尽可能纳入相关技术的最新进展，以体现3GPP 中正在进行的标准化工作的现状。5G NTN方兴未艾，并且无疑将继续演进，本白皮书提供的信息也会随时更改和扩充，敬请读者留意。

无线通信和航空航天两大市场生态系统正在带动技术和业务用例及服务的发展革新。我们注意到，5G NTN促使这两大生态系统趋于融合。鉴于作者的无线生态系统背景，我们认为 NTN的发展带来的巨大创新将在无线领域。因此本白皮书着重从无线角度展开论述。诚然，航空航天生态系统的贡献对于5G NTN的成功也是必不可少的，航空航天领域的重要性不容低估，但我们决定以5G为重点撰写这份白皮书，在此也要向各位读者致歉。如需了解罗德与施瓦茨提供的有关航空航天生态系统的丰富信息，请访问我们的网站：[www.rohde-schwarz.com](http://www.rohde-schwarz.com)。

希望我们在无线生态系统方面的专业知识能够助力5G NTN的成功，也希望本白皮书内容能为读者提供实用价值和参考意义。

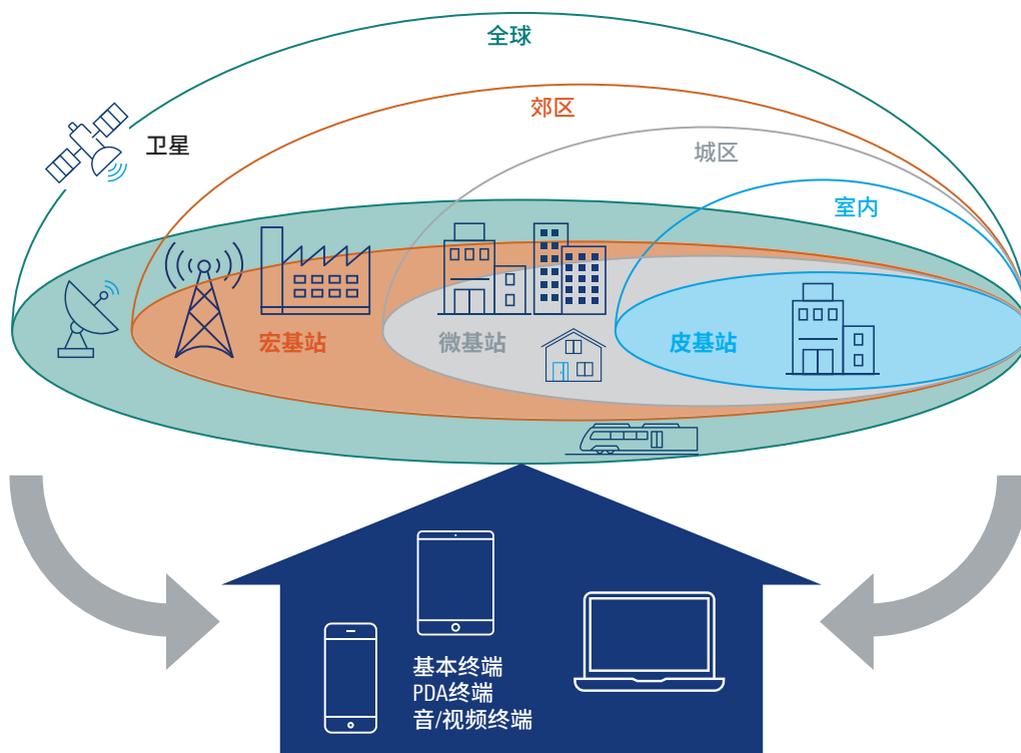
作者谨白

CDMA2000®是美国电信行业协会 (TIA-USA) 的注册商标。

# 1 引言

当3GPP Rel-17方案考虑将非地面网络 (NTN) 纳入5G系统时，人们的第一反应可能是这一幕似曾相识。早在上世纪90年代中期，国际电信联盟 (ITU) 就通过其国际移动通信方案IMT-2000提出了21世纪全球无线接入的愿景。以此为契机标准化组织3GPP (第三代合作伙伴计划) 创立了，着手推进第三代无线通信技术的国际化。引人注目的实例是由标准化组织 3GPP2牵头的CDMA2000®和通用移动通信系统 (UMTS)，其中采用两项关键无线接入技术 (RAT)：宽带码分多址接入 (WCDMA) 和时分码分多址接入 (TD-CDMA)。IMT-2000方案提出“灵活性”和“全球化”两项属性作为主要设计目标，并表示，热点的峰值数据速率达到2 Mbps、移动条件下的平均数据速率达到384 kbps是未来公共陆地移动网络 (FPLMN) 所要实现的目标。地面和卫星通信系统都应支持这些目标。受制于更多商业和成本原因，这个最早的设想在当时的卫星通信系统中并未成为现实。

图1: ITU方案IMT-2000



PDA 个人数字助理  
2 Mbit/s 皮基站和室内  
384 kbit/s 行人和低速车辆  
144 kbit/s 高速车辆

在此期间，情况发生了变化。伴随着航空航天领域的发展，无线技术的演进使5G系统更具灵活性。发射低轨道火箭和卫星星座并非不可逾越的技术挑战，在许多应用中已成为现实。商用和专用卫星系统持续部署，并向相应生态系统提供商业服务。3GPP Rel-17首次支持NTN连接，希望勾勒出长期技术演进和大范围普及NTN用例的框架。

## 非地面网络 – 全方位解读

术语“非地面网络”代表多种连接场景，从经由机载电台进行卫星通信，到考虑图2所示的空对地或无人驾驶飞行器 (UAV) 飞行控制等连接场景。整体考虑描述了其中卫星具有不同飞行高度（如GEO、MEO和LEO）和覆盖区域的各种卫星连接场景。用户设备 (UE) 类型亦有区别，即属于手持设备还是甚小口径终端 (VSAT)，通常认为后者接收能力更好，例如采用抛物面天线或是具有更高的发射功率。

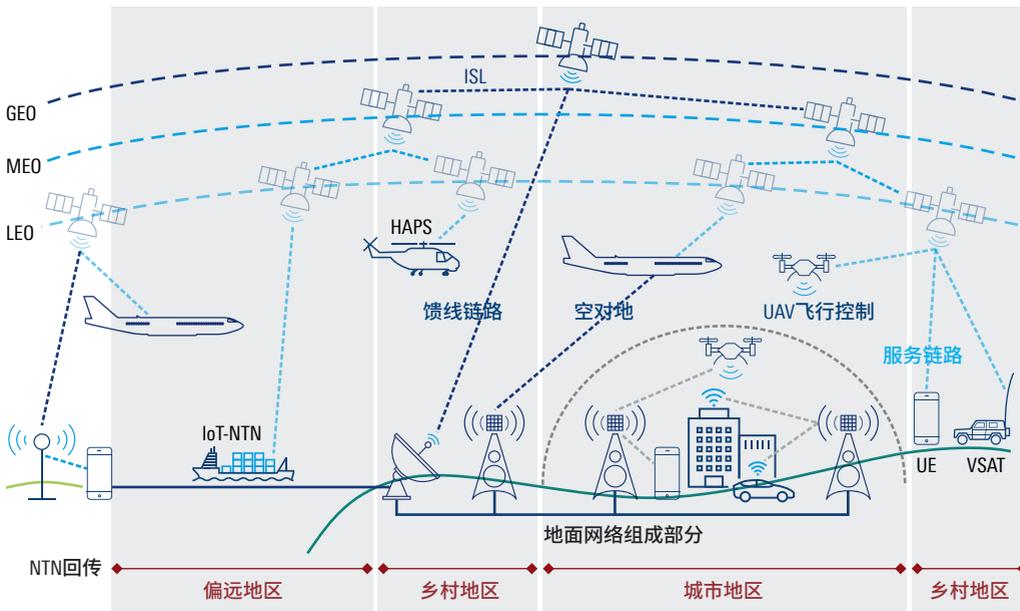
除了基于卫星的连接，3GPP还支持基于机载电台的连接（可能在后续版本中），即直升机、气球或飞机等所谓的高空平台系统 (HAPS)。空对地 (ATG) 通信旨在通过与地面基站的无线连接为飞机提供飞行中的连接。因此广义而言，这些空对地通信也属于NTN通信，但为求简明，本白皮书中暂不讨论其详细信息。与传统地面网络相比，这种空对地通信的不同之处主要在于小区覆盖范围更大，并且可能会将基站天线辐射朝向天空，而在地面网络中，基站天线通常向下倾斜以避免超出范围和发生干扰的情况。借助先进的定向天线阵列，有可能实现一种仅将辐射指向单架飞机的跟踪方法。即使不将ATG直接视为一个完全的非地面网络，这种通信方式也可利用一些相同的技术解决方案，例如延迟处理或频率补偿。

5G NTN不仅为用户终端提供连接服务，还可通过卫星连接将地面gNB连接至5G核心网络。这种设置称为NTN回传。

最后一项值得一提的技术也可视为NTN，即无人驾驶飞行器 (UAV) 或者通常称为无人驾驶航空系统 (UAS) 的飞行控制，在3GPP Rel-17中有过讨论。从更高层面来看，UAV包括两种型式。第一种型式为UE型UAV，从gNB到UE的通信在空中进行。在新技术方面，更新了UAV通信，通过三种不同方法进行指挥和控制：一是基于网络，即空中的无人机通过具有飞行控制功能的5G网络进行通信；二是直接通信，即像V2X中一样，两架无人机通过5G NR sidelink直接进行通信；三是预定义飞行计划，即5G网络和UAS控制功能预定义静态飞行路线。为简明起见，本白皮书中不再深入探讨UAV技术方面的问题，3GPP得出的研究结果在 [TR 23.754] 列出。第二种形式为UxNB，即集成在UAV上的NodeB作为中继运行或具有机载处理功能。后一种场景是被视作NTN内的未来技术演进的HAPS连接的一部分。

卫星NTN提供多种用例和服务，从更高层面来看，5G NTN面对的问题包括：“NTN与地面5G网络是否存在较大差异？”或是“NTN与传统卫星星座是否存在较大差异？”进一步从细节上考虑时，还涉及诸如频谱分配、卫星星座、无线链路波形或架构等方面的问题。本白皮书并不旨在回答所有这些问题，对于其中大部分问题，市场将给出它们的答案。但有一点是肯定的，如果要对比地面NR和NTN NR，那么我们应当以实事求是的态度看待技术。考虑到射频挑战、频谱环境（如频率范围或可用带宽）和卫星星座，我们认为初期部署5G NTN应重点关注泛在连接和信号覆盖。在期望的数据速率上，NTN 5G无法与地面5G相提并论。因此我们的初步看法是，5G NTN将作为地面5G系统的补充，主要用于实际提供连接性而非极高通量。

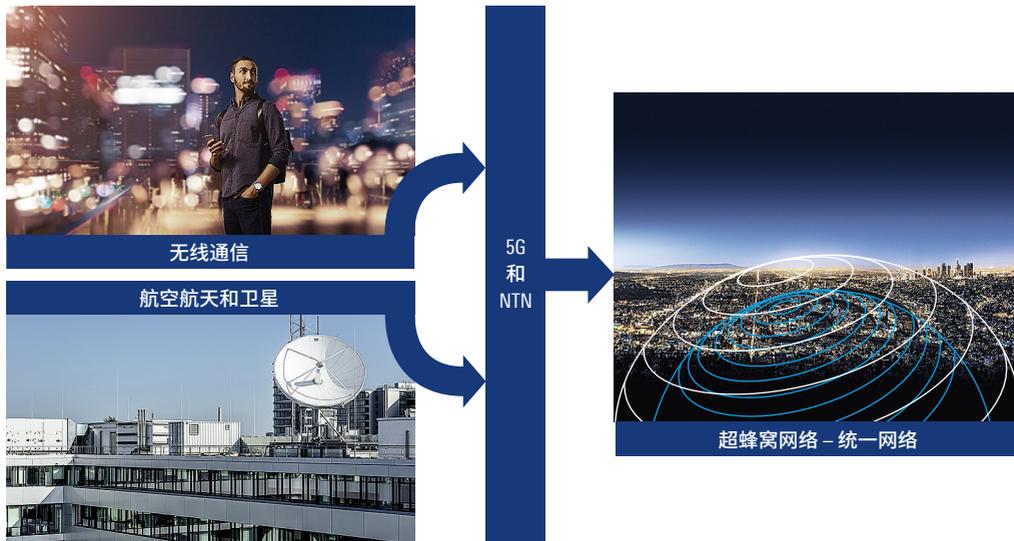
图2: 非地面网络一般连接概述



### 非地面网络 – 商业案例和未来发展

在NTN的商业相关考虑方面，我们可以确定，传统无线通信生态系统与传统航空航天生态系统趋于融合。两大系统的产业界和学术界主要参与者都致力于促进并利用进一步的发展和​​创新，以使非地面网络成功引入市场。将NTN纳入5G系统代表着向灵活、分层、动态网络（也称三维（3D）网络）的通用特性迈出一步。这种演变的特点在于对应的小区规模从室内/室外皮基站，宏基站用于广播的5G大功率高塔（HPHT）所覆盖的蜂窝小区，扩展到辐射方圆数百公里的卫星小区。随着网络的演进，有关第六代网络（6G）将如何发展的预测也揭示了NTN的一些技术方向，比如动态小区纳入、自组织和自协调网络及联合通信，其中灵活的网络组件和功能可以互操作，为多种服务和应用提供优等质量的服务连接。流行词“超蜂窝”常用于描述这种带有智能节点的三维网络架构。5G和6G在NTN技术演进方面的主要区别可能在于，5G NTN被视为在5G系统这样的网络中实现NTN连接的“变通方案”，因为5G系统最初设计用于地面通信。展望6G，可以设想，随着6G的到来，从静态的室内小基站到飞行的机载站和星载站，各种基站都能实现互操作，同时提供动态网络。

图3: 通信和航空航天生态系统的融合推动NTN向6G统一网络演变



### 非地面网络 – 标准化现状

下文将具体介绍3GPP等标准制定组织 (SDO) 内部目前提出的主张和采用的程序。3GPP研究将非地面网络纳入5G系统的主要动机是为通用RAT和系统接入创建一项开放标准，使运营商、系统供应商和设备制造商能将NTN纳入他们提供的服务。由于纳入NTN是一种技术演进，3GPP在Rel-15 [TR 38.811] 中启动了重点关注信道模型和部署场景的研究。在完成对场景和信道模型的研究后，3GPP继续进行之后的Rel-16研究 [TR 38.821]，寻求调整5G NR以支持NTN的解决办法。这项研究的主要目的是确定在5G系统内实现NTN的功能集，并将对现有5G系统的影响降至最低水平。研究中的功能集包括架构、协议层增强和物理层等方面。基于Rel-16研究取得的成功结果，3GPP决定在Rel-17中启动关于NTN的工作项目。主要目的是为基于LEO和GEO的NTN定义必要的增强功能，同时也为未来部署的HAPS和空对地网络提供隐性的支持。这涉及物理层、协议和架构以及无线资源管理、射频要求和待使用频段等诸多方面。主要关注点为具有地球固定跟踪区域和频分双工 (FDD) 系统的透明载荷架构，其中所有UE都假定具有全球导航卫星系统 (GNSS) 的功能 [Ref. 10]。

从一个简化的面向服务的角度来看，3GPP的前景包括两个部署和服务场景，这也与ITU IMT-2020方案在2015年发布的描述eMBB、mMTC和URLLC KPI的“服务三角”模型相一致 [Ref. 1]。其中一个服务场景是支持适用于NTN的5G NR (NR-NTN)，主要针对移动宽带业务。另一个服务场景是支持低数据率、提供尽力而为的QoS服务、通过卫星连接的物联网或者叫做 IoT-NTN的机器类型。

在全球范围内提供泛在连接是切实存在的要求，这也是促进NTN通信的主要动力。根据 GSMA等行业组织发布的市场统计数据，2020年，无线通信技术覆盖了全球80%以上的人口，但覆盖的全球陆地面积则不到40%。基于NTN卫星的通信可以解决这一问题，同时能够专注于海洋、偏远和极地地区的全球泛在覆盖。

## 文档结构

本白皮书旨在以翔实的方式描述3GPP方案中的NTN技术。第1章将简要介绍NTN技术和及其用例，并概述预期的主要挑战。

第2章将结合最新应用场景，简要概述现今的商用和专用卫星星座。

NTN要求改变5G系统架构以纳入机载站和星载站。第3章将说明架构以及有关通用卫星星座的内容。

NTN代表无线世界的范式变化，在将NTN gNB基站纳入到卫星或机载设备后，原本的静态和固定基站会以一定的速度移动。这将导致射频接口在移动性、极化、载频稳定性方面出现问题，而且由于UE和NTN gNB之间距离较大，显然会产生一些时间延迟。第4章将介绍这些挑战，重点关注射频和物理层。

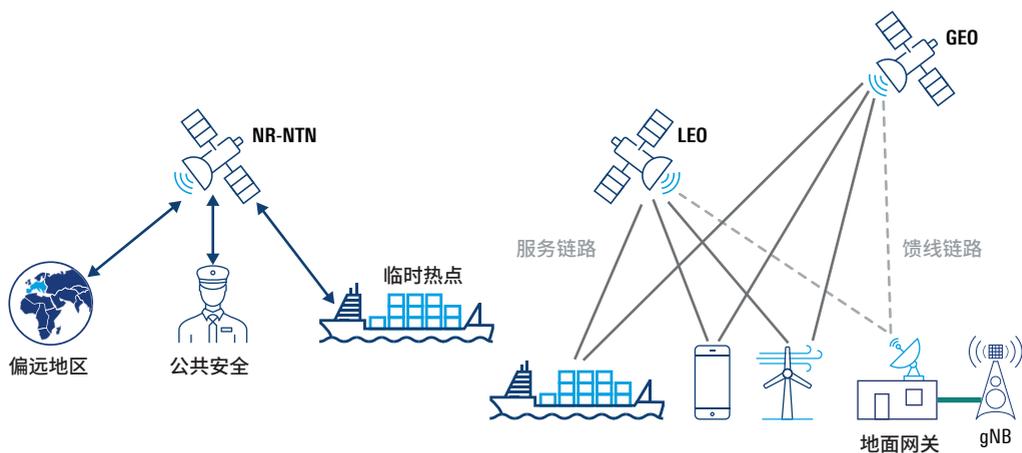
在5G中应用于无线接入、连接和空闲模式下的移动性、可靠的数据传输、网络选择或节电等方面的5G流程需要进行一些修正，以优化对于NTN的支持。第5章将概述这些流程和相关的优化修正。

我们认为NTN是一种技术演进，从Rel-17开始首次支持该技术，但一些技术扩展仍然有待标准化，或者仍处于研究阶段。第6章将说明NTN在未来版本中的技术前景，并描绘向着下一代无线通信6G演进的路径。

### 1.1 NR-NTN

根据NTN目前的发展，在用例、架构和可能的技术方面有两个主要方向逐渐凸显。第一个方向与5G NR增强有关，用于在5G系统中纳入非地面通信。相应用例遵循简短评估中eMBB场景的5G服务。该技术称为NR-NTN，图4描述了最初设想的用例和架构设置。后续章节将进一步介绍NR-NTN技术及其面临的挑战。

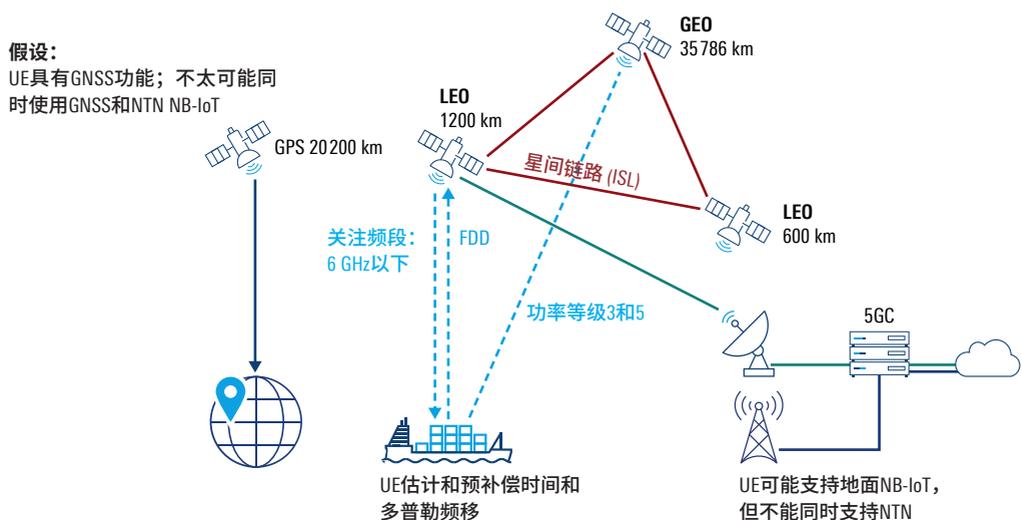
图4: 新空口非地面网络 (NR-NTN)



### 1.2 IoT-NTN

NTN背景下的第二个技术方向是通过非地面连接扩展通用物联网 (IoT)，该技术称为IoT-NTN。IoT-NTN与NR-NTN的不同之处在于其整体复杂度较低。无线链路技术持续完善，以适应基于NTN连接的NB-IoT；设备和卫星的复杂度较低。相应设备应当采用低复杂度的天线类型，没有特定的极化功能或可选配的第二条射频链路，并且不太可能在UE实体上运行特定的波束赋形方法。IoT-NTN的一个主要特点是缺乏对QoS的支持。IoT-NTN通信将采用尽力而为的策略，但与NR-NTN相比，该技术在能效和节电方面有更多的考量。这项工作于2021年8月开始，研究范围较为有限，初期步骤仅针对关键功能。eMTC和NB-IoT两种RAT被列入同等优先级，在初期潜在部署中，EPC被视为相关连接的核心网。5GC可能在后续部署阶段跟进。Rel-17中优先考虑了独立部署，应用透明的弯管卫星架构，并假设UE拥有可预先补偿时间和频率的GNSS功能。

图5: 采用非地面网络的物联网 (IoT-NTN)



在 [TR 36.763] 中进行的研究列出了一些NR-NTN未涵盖的增强功能和研究项目，应当进一步讨论。通常认为IoT-NTN支持截至Rel-16的蜂窝物联网功能，多载波以及单载波操作均可作为基准。普遍存在的共识是，应考虑GNSS定位功能对UE功耗的影响，而用于获取卫星星历表信息的额外SIB读取工作不会对能量消耗产生显著影响。长PUSCH和PRACH传输增强允许UE以分段方式进行时间和频率预补偿。流量始终时断时续，而启用分段预补偿方法意味着需要统一新的UL间隙和时间单位以及分段的持续时间。这同样适用于UL同步的有效性计时器等方面，即UE可以假定维持有效卫星星历表信息的时间。为增强DL同步 [TR 36.763]，提出一种步长大于100 kHz的新信道栅格，并在MIB中提供可选的ARFCN指示。对于被认为是IoT-NTN特征的偶发短距离传输，UE从空闲模式（或节电模式）唤醒，接入网络，在短时间内执行UL和/或DL数据传输，然后回到空闲模式。在接入卫星网络之前，UE通过GNSS定位来获取其位置。请注意，UE不要求同时进行GNSS和IoT-NTN操作，因此在IoT-NTN短暂连接期间，无需重新调整位置。3GPP需要进一步研究GNSS定位的有效性、获取GNSS定位的细节以及短距离传输的持续时间等方面。许多其他与射频相关的方面（比如时序关系增强或HARQ操作）采用与NR-NTN相同的方法，不同的是重点仍在于尽可能降低UE复杂性、UE功耗和UE成本。例如，IoT-NTN中不包含HARQ进程扩展。

### 1.3 卫星通信领域的六大技术挑战

有关卫星通信技术的文献描述了为使卫星星座正确启用而要先解决的六大技术挑战。为简明起见，我们将不会深入研究这六项关键技术的所有技术细节。

**天线设计和相控阵天线**，因为波束赋形在卫星连接中发挥着举足轻重的作用，能够提高天线增益以降低传播衰减，还有利于信号覆盖和可寻址性以及减少干扰。技术演进的目标是多波束、灵活、可扩展的数字相控阵天线，这种天线集成密度高，具有优异的接收机灵敏度性能。

**星间链路 (ISL)** 是一种通过星间通信来支持卫星星座的技术，通常为高频无线或光学链路 (FSO)。有必要采用星间链路的原因主要有两点，一是卫星需与地面站连接，但无法始终保持可见性，因此ISL将在多跳场景中提供这种连接；二是利用地面网络的经验，在采用多接入边缘计算技术 (MEC) 时，本地云更加靠近天线，但MEC只有在与核心云或其他MEC互连时才会成功。从长期部署的角度来看，我们假设星载站将成为智能网络节点，从而将MEC纳入太空并通过ISL进行互连。

**路由、调度和网络**要求加强当今复杂的地面网络管理、调度和路由机制，以纳入机载和星载网络节点。特别是LEO卫星，由于卫星相对于地球传播信号，覆盖范围或容量并不恒定。一些地区的卫星能力大于需求，比如人口稀少的偏远地区，而在另一些地区，一颗卫星则不够用，因此有必要执行智能化容量路由和规划操作。此处列出的“网络”为概括性术语。广义来讲我们可以认为，地面网络和NTN网络之间的移动性和连接性也是一大挑战，另外还包括干扰和频谱可用性等显而易见的方面。

**自动化和卫星星座管理。** 本文将不对此话题展开进一步论述。卫星不仅仅是太空中的设备，人们对飞行路径 (TM-TC) 进行长期维护和控制，对所使用的频率信道和ISL路线进行干扰管理，还需要将卫星送入或移出轨道。为符合经济效益和允许快速控制，应当尽可能减少人为干预。因此，人工智能和机器学习算法也将在卫星星座控制自动化领域得到普及。

**用户设备 (UE) 用于巨型星座**和大众市场NTN统一网络。过去人们认为，卫星地面终端与天空保持固定视距 (LOS)，并且使用大型天线，例如为人熟知的卫星电视抛物面天线。5G NTN将促使手机类型多样化，从低复杂度的物联网设备和手持式智能手机到具有波束赋形功能的甚小口径终端 (VSAT) 不一而足。这些设备的制造商可能需要开发新前端来覆盖新频段，或者需要实施新的射频链路来实现NTN连接。

本白皮书将进一步详细解读**有关射频接口的NTN特定挑战**，包括扩展时间延迟和RTT、载波频率偏移或多普勒频移、高路径损耗或链路预算以及极化失配或法拉第旋转。这些挑战将对协议架构和程序产生进一步影响。

我们无意忽视或排除此处所列六大挑战之外的其他挑战，但鉴于我们认为这些挑战显而易见且与NTN并非直接相关，为求简明，在此将不做深入探讨。这类挑战包括最大限度压低卫星和手机的部署和开发成本、将复杂度保持在可以承受的水平以及使整个NTN系统维持经济健康状态等。这些挑战显然属于商业用例层面，需由卫星运营商、卫星供应商和手机制造商来解决。[Ref. 22] 中给出了NTN商业案例的简明概述和市场估计。

## 2 商用和专用卫星星座 – 概述

商用通信卫星时代始于1965年4月6日，通信卫星Intelsat 1“晨鸟”(Early Bird)在当天发射进入地球同步轨道(GEO)。虽然GEO通信卫星是在较大覆盖区域内提供电视、无线和数据广播的理想选择，但由于信号传输36000 km到太空并返回，存在较高延迟，因而这类卫星在电话服务领域的应用较为有限。尽管存在上述明显缺点，各大运营商都已成功实现了通过GEO卫星提供语音和数据服务。

到了上世纪90年代，随着地面蜂窝通信系统的问世，开始出现通过中地球轨道(MEO)和低地球轨道(LEO)卫星星座提供全球低延迟电话和数据(Internet)服务的计划。然而，由于这种巨型星座成本极高，早期的ICO、Iridium、Teledesic和Global Star等系统在商业层面不幸折戟。

采用QAM或QPSK调制的频分多址接入(FDMA)和或时分多址接入(TDMA)广泛运用在针对卫星链路优化的RAN中。调制方式和信道编码可能是Inmarsat的宽带全球接入网(BGAN)这样的专有形式，也可能基于国际标准(例如DVB-S/-RCS/-S2/-S2X) [Ref. 38]。RAN连接至运营商特定核心网络架构，该架构与(移动)电话网络相连接。

虽然众多卫星运营商似乎偏好于ETSI/DVB卫星标准的空中接口，但新兴的NewSpace卫星星座和高空平台的运营商可能会考虑使用在5G移动通信系统背景下开发的调制和编码方案。

过去几十年间，一些组织、私营公司或政府项目开始提供基于卫星系统的连接服务。其主要特征是通常作为独立组网的封闭外围网络运行，在无线链路层上应用专有波形，并向客户提供通信服务。以卫星网络Iridium为例，他们在21世纪初开始向全球客户提供语音通信，但由于商业原因，并未像陆上运营商和服务提供商那样取得成功。为避免破产，他们被美国政府收购，如今Iridium-2正在运行。最近推出服务的网络有Lightspeed、Starlink、OneWeb和Kuiper [Ref. 31]。他们提供的数据率在每位用户300 Mbps的范围内，延迟为几十毫秒。透明和再生是在各种系统中都受到支持的两种有效载荷类型，与3.10章节所述的3GPP方法类似。从弯管抛物面反射器天线发展到多波束相位阵列式数字波束赋形 [Ref. 20]，卫星技术在架构方面已有质的飞跃。在此，根据目前的状况，我们以这四种网络为例 [Ref. 9]，简要概述专用卫星巨型星座。请注意，下文给出的部分信息和数字可能会有所更改。

**表1：商用卫星星座概览（示例）**

星座	Lightspeed	Starlink	OneWeb	Kuiper
运营商	Telesat	SpaceX	OneWeb	Amazon
国家/地区	加拿大	美国	英国	美国
所有者	新Telesat公司（由Loral Skynet与加拿大公共部门养老金投资委员会合资成立）	Elon Musk	英国王室、印度Bharti公司、Softbank、Hughes Network	Jeff Bezos
预算	50亿美元	无确切数字，> 100亿美元	无确切数字，大约数十亿美元	100亿美元
目标客户	工业消费者：航空、海事、企业、电信和政府网络	宽带互联网、消费市场、军事、政府	宽带互联网、消费市场	宽带互联网、消费市场
卫星制造商	TAS France	SpaceX	OneWeb Satellites（Airbus与OneWeb合资）	无资料
卫星数量（目前估计）	6个极地轨道上有298颗卫星，20个近赤道轨道上有11颗卫星	第1阶段：1584颗，第2阶段：2824颗，第3阶段：30000颗	先650颗，再1980颗，最后6372颗	3236颗

国际电信联盟 (ITU) 管理和协调全球范围内的频谱分配（另见第3.2章），并间接负责卫星星座的分配 [Ref. 19]。NTN网络运营商需要通过当地监管机构对其星载站进行监管。获批时随附的通知文件包含轨道信息（例如高度、倾角）、卫星数量和频段等参数。

**SpaceX Starlink**

Starlink是由美国航天公司SpaceX运营的卫星网络，旨在为地面用户提供互联网接入服务。SpaceX的所有者为Elon Musk，公司总部位于加利福尼亚州霍桑市。根据FCC的通知文件，在2027年之前，Starlink将部署约11927颗LEO卫星。而远期计划则将部署多达30000颗卫星 [Ref. 24]。这些卫星部署在不同轨道平面上，高度为540 km到1300 km不等。Starlink星座的特点是，由多颗卫星为重点纬度提供服务。在初次试验中，Starlink实现了达到93 Mbps的个人用户数据吞吐量，其每颗卫星容量约为16 Gbps，延迟值为31 ms，不足之处为地面覆盖区域未超过北纬60度。未来的目标是使地面覆盖延伸至上述纬度以外，并使数据率达到 300 Mbps。作为用户终端，Starlink提供固定式VSAT，采用约60 cm的相控阵天线。SpaceX Starlink使用的Ku波段频率为下行方向10.7 GHz至12.7 GHz、上行方向14 GHz至14.5 GHz。除此之外，分配的Ka波段频率低于Kuiper的频段，分配的V频段频率为大约37 GHz至50.4 GHz [Ref. 9]、[Ref. 32]。

## Amazon Kuiper

凭借Kuiper项目，Jeff Bezos领导的电商零售巨头Amazon开始进入通信市场。他们的中期目标是发射共3236颗LEO星座卫星，高度在590 km至630 km之间 [Ref. 31]。与Starlink类似，Kuiper也采用了以多颗卫星覆盖相关纬度的方法。预计数据率将达到400 Mbps。Kuiper采用Ka频段的频谱，下行方向为17.8 GHz至20.2 GHz，上行方向为27.5 GHz至30 GHz。由于UL和DL之间存在较大保护频带，开发采用双向相控阵天线的通用用户终端颇具挑战性。与SpaceX Starlink相比，截至2021年，Kuiper尚未部署任何卫星 [Ref. 24]、[Ref. 32]。

## OneWeb

OneWeb是一家英国本土企业，计划在轨道平面上部署共650颗卫星 [Ref. 31]。由于财务问题，OneWeb在2020年申请了破产保护。英国政府和印度公司Bharti Global已向OneWeb注资，希望帮助其摆脱破产危机 [Ref. 25]。OneWeb使用的高度约为1207 km，与Starlink和Kuiper不同的是，其轨道平面也覆盖极地地区。凭借这种星座架构，OneWeb实现了宽内框轴、低高度的椭圆波束足迹，Starlink则实现了更接近圆形的椭圆波束足迹。

## Telesat Lightspeed

Telesat是目前第四大卫星星座，旨在提供互联网接入服务 [Ref. 31]。整个星座由大约298颗卫星组成，分属于两个轨道外壳，高度分别为1000 km、1248 km [Ref. 9]。该星座的优点是可在整个地球表面提供分布均匀一致的信号覆盖或卫星可见性。

## 其他卫星系统

除了以上四大卫星星座，其他公司和联营企业也开始涉足这类业务。联营企业AST&Science旨在利用智能手机等手持设备进行基于卫星的互联网接入。AST&Science的缺点是星载站尺寸庞大，原因在于依赖大口径相控阵天线 [Ref. 9]。在LEO高度，这种超大卫星存在碰撞风险，需要永久性导航机动，由此也在业界引起一些批评。对于O3b，SES公司的目标是在8000 km高度使用MEO卫星创建卫星星座。由于海拔较高，实现覆盖目标所需的高吞吐量卫星数量较少。

## 中国的卫星系统

作为对美国卫星公司SpaceX Starlink和Amazon Kuiper这两个项目的回应，中华人民共和国启动了卫星互联网 (China SatNet) 项目，拟发射12992颗卫星 [Ref. 26]，将分布在轨道高度为508 km、590 km和600 km的低轨道以及1145 km的轨道高度上。频率使用方面，中国卫星网申请的DL频率为37.5 GHz至42.5 GHz，UL频率为47.2 GHz至51.4 GHz。

# 3 NTN架构和卫星星座

与一般的5G系统一样，非地面网络也将尝试在多种架构设置下运行，并根据不同用例提供各种各样的服务。本章将介绍这些架构，概述NTN用例，并探讨频谱可用性的主要方面。由于卫星可能在多种星座场景中运行，为了更好地理解“轨道”、“星历”或“星座”等术语，在此还将解释这些星座背后的数学知识。

在简化的架构模型中，每项空间任务都包含三个要素：空间段或卫星；地面段，包括网关、地面基带功能（如gNB）和核心网（如5GC）；最后是用户段，即用户设备UE [Ref. 31]。

## NTN语境中使用的术语和表达及其在本白皮书中的解释

在本白皮书的其余部分，我们对下列术语定义如下：

**卫星**是向UE提供NTN无线接入并通过馈线链路 (SRI) 与地面5GC功能相连的机载或星载站。本文使用缩写SAN（卫星接入节点）。本文未就星座是LEO、MEO还是GEO，或者由HAPS 还是UAS站提供接入作进一步分类。在本白皮书中，“卫星”一词将作为一般术语使用，我们不进一步区分透明或再生有效载荷，也不区分卫星站是否应用某些分离架构，比如gNB-DU或gNB-CU分离架构，或者IAB等架构。但对于某些值得一提的区分，本文将给予明确解释。

**服务链路**是提供给UE的5G无线接入，即非地面网络星座中的无线接口 (Uu)。

**卫星无线接口 (SRI) 或馈线链路**描述了卫星和网关之间的连接。其工作频率可能与服务链路相同或不同，在非透明架构中还可能是特定的无线技术 (SRI)。未来的部署会考虑毫米波频谱的频率以及光学 (FSO) 连接 (>190 THz)。

**gNB**对应于作为协议锚点继承用户面和控制面的协议层的5G术语gNB [Ref. 1]。gNB包括无线接入网部分，用于向UE提供无线接口 (Uu) 和gNB基带功能，而在相反方向，gNB则通过NG 接口连接到5GC功能。我们将gNB理解为逻辑术语，其中可能包括本白皮书语境中的卫星功能，但术语gNB与特定硬件架构无关。如果要明确强调非地面连接特性，我们建议使用NTN gNB一词。

**5GC**是提供会话和移动性管理、用户面功能等多种功能的5G核心网的总称。5GC使用服务化架构，某些功能通过该架构提供其服务 [Ref. 11]。

**sNB**作为卫星NodeB用于增强gNB的卫星接入可行性，也即sNB包含连接到卫星站的网关功能。此外，sNB亦为协议锚点，与gNB一样，在逻辑上分为分布式单元 (DU) 和集中式单元 (CU)，在用户面和控制面之间进行拆分。可以选择性地使用分解架构；不区分sNB是否完全在太空中运行，或者是否分为星载和地面部分。

**网关**描述了将gNB（或5GC）功能连接至卫星站的地面站。从5G技术的角度来看，网关在这些实体之间提供透明传输服务，并与应用的SRI RAT无关。

**NTN gNB**是为区分地面RAN gNB和提供NTN连接的gNB而引入的逻辑术语。NTN gNB可能位于卫星上（考虑再生有效载荷时），也可能对应于通过透明有效载荷提供NTN连接的地面 gNB。

**UE和VSAT**是描述终端用户所用终端的术语。用户设备 (UE) 为通用表述。本白皮书进一步细化了概念，UE支持一定程度的移动性，其形式通常为手持设备。一些卫星星座也将甚小口径终端 (VSAT) 视为用户终端，它们不是手持设备，很可能是安装在建筑物或车辆上的固定设备。

由于天线性能增强，该类设备主要特点为发射功率更高，具备更好的接收能力。这种VSAT的典型实例为CPE类型的UE。

**回传**是在各种情况下广泛使用的术语。在本白皮书中，我们使用无线通信领域中定义的回传，其中对无线接入网 (RAN) 和核心网（如5GC）加以区分，回传代表它们之间的接口。有些通常也称为回传的场景（例如具有卫星连接的CPE通过地面网络使用回退连接）在本白皮书中不视为回传。

### 3.1 NTN用例

3GPP对下一代接入技术的场景和需求进行了研究，研究内容涵盖从室内热点到星基5G系统扩展等各类用例 [TR 38.913]。在卫星通信业务领域，通过卫星提供信息对于整个生态系统并非新鲜事物，从目前部署的卫星星座即可见一斑。在无线通信方面，可将服务分为以下几类：广播卫星业务 (BSS)，比如众所周知的卫星电视广播；固定卫星业务 (FSS)，其中固定UE（如VSAT）连接到卫星进行互联网接入；以及移动卫星业务 (MSS)，代表与已知地面RAT用例类似的用例。本章重点探讨NTN的可能用例，为简明起见，我们将不深入讨论NTN的商业前景；有关这方面的进一步信息，请参阅 [Ref. 22]。

#### 固定卫星业务 (FSS)

此类业务主要为固定UE（如VSAT）提供互联网连接。从商业案例的角度来看，这种服务的目标类似于固定线路连接。FSS的优势在于覆盖面广，能够向服务不足地区或边远地区提供连接服务。这类业务代表了一些专有星座系统的主要商业模式，例如SpaceX的Starlink（参见第2章）。请注意，未来的部署可能会考虑VSAT的某种移动性，例如可以采用车载或机载系统。FSS业务可能还包括未来的IAB部署或地面5G系统的回传连接。

## 广播卫星业务 (BSS)

乍看之下，读者可能又觉得莫名熟悉，因为这类业务就对应于众所周知的卫星电视广播（如 DVB-S2）。5G NTN使这类系统可以用来向所有UE或一组UE广播信息，其余目标应用包括软件更新或是向一些区域或多组UE提供信息等服务。另一种商业模式是流量外包，特别是当它与分布在较大覆盖区域的多个UE相关时，这种基于广播的系统可以提高整个系统的效率。

## 移动卫星业务 (MSS)

此类业务对应于传统地面网络提供的服务，其优势在于信号覆盖更广，因此可以实现泛在连接。不足之处或现实考虑是，NTN服务虽可作为地面5G系统的补充，但5G NTN数据速率难以比肩地面网络可实现的数据速率。简单而言，NTN优先考虑的是广泛覆盖的全球连接和提供基础服务，而不是单用户的高数据速率。再看现实层面，通常认为用于MSS的手持式UE 位于室外。火车或船舶安装的手持式UE最大速度为500 km/h，飞机安装的VSAT型终端速度则达到1200 km/h。

图6：5G NTN用例 – 示例



根据市场统计数据，无线连接如今已大范围普及，覆盖了全球80%以上的人口，而蜂窝无线信号覆盖的全球陆地面积只有大约40%。因此，NTN服务的第一项目标是提供泛在覆盖。从现实角度来看，考虑到物理层环境和诸如带宽、载波频率、路径衰减、极化失配或较大延迟以及多普勒频移等障碍，我们认为NTN并不以极高数据速率为目标。此外，一般认为NTN利用泛在覆盖，它更像是地面5G的补充，两者并非竞争关系。在使用FR1频率进行首次部署时，通常假设最大带宽为20 MHz，由于存在大路径衰减，数据速率无法与地面系统相比。在后续部署中，当NTN可以使用FR2范围内的频率时，可能达到更高的带宽，假设VSAT等固定UE具有高增益，可以预计数据速率也会更高。

3GPP关注的不仅仅是服务不足地区的覆盖问题。在更高层面，划分了以下四类用例 [TR 22.822]:

- ▶ **服务连续性**的目标是在如海上或边远地区等地面网络无法触达的区域提供RAT覆盖。应支持由同一运营商拥有或通过不同运营商之间的协议实现的陆基5G接入网和星基接入网之间的服务连续性 [TR 22.822]
- ▶ **服务泛在性**在某种程度上由关键任务通信 (MCX) 的背景推动，目标是永久系统可用性。该特性具体体现在自然灾害和重大变故导致地面网络架构停用或破坏的情况下，通过NTN连接，可在短时间内恢复并获得系统可用性，即公共保护和救灾 (PPDR)。
- ▶ **服务可扩展性**遵循流量管理策略。流量定向功能增强（比如将流量从地面通信分流到非地面通信）可以提供更好的系统效率，考虑到NTN gNB和BSS的业务分流具有更宽的信号覆盖范围，这一点尤其明显。
- ▶ **5G系统回传服务**是指终端用户设备 (UE) 仍连接至地面RAT，但NTN连接用作到核心网的回传连接的情况。NTN回传的目标是在偏僻地区部署提供RAT覆盖的本地基站，并通过NTN连接以更可行的方式进行核心网连接。请注意，可通过多种不同方式执行回传部署。可以使用到星载NTN gNB的3GPP无线接口连接来进行地面gNB（如IAB节点）连接。还有一种方法是地面gNB使用核心网接口连接（如F1接口）透明地部署在星载站上。

除了这些主要用例以外，3GPP还适用于卫星接入网的一些5G用例，与上述四个高级别用例相比，这些用例侧重于更加细化的服务。[TR 38.811] 中开展的研究及有关介绍描述了如下用例：

- ▶ eMBB连接包括到服务不足地区UE的宽带连接，也包括到固定小区和移动小区的连接服务
- ▶ 弹性网络、中继（到地面小区集群的NTN回传）和边缘网络交付可以防止网络连接完全中断，允许在偏僻区域提供连接服务，或进行流量定向。由于卫星网络不受地面通信系统所遭遇的天气和灾害的影响，故而可使得网络更加弹性
- ▶ 混合和广播连接支持为地面5G连接叠加非地面网络连接，例如将广播或多播服务分流到广域NTN中
- ▶ 广域物联网 (IoT-NTN) 通过卫星连接扩展了物联网设备的已知用例，支持在服务不足的地区进行部署
- ▶ 公共安全机构的服务包括大范围快速分发公共警报信息，以及为当地或广大区域的应急响应人员提供内部通信。后者支持在已实现的设备对设备 (D2D) 连接之外对这类通信进行扩展，以应对原有连接范围受限的情况

- ▶空中接入网是NTN组合的补充，可在地面回传不可行时提供按需热点、区域公共安全或固定小区互连等服务
- ▶临时使用卫星连接描述了由救灾情况 (PPDR) 推动的用例，在该例中可以通过临时使用NTN 连接来缓解地面网络中断的影响
- ▶HAPS特定用例包括由准静态UAV（如气球）支持的固定无线接入 (FWA)、临时热点或灾难恢复等 [Ref. 23]

有关5G NTN服务的其他综述，请参阅 [TR 22.822] 和 [Ref. 12]。文档 [Ref. 23] 描述了更多用例和场景，重点是HAPS等机载站，[TR 38.913] 则总体概述了与下一代场景和要求有关的研究。

### 3.2 频谱方面

像任何无线技术一样，通信领域最明显、最相关的资源是可用的频谱。由于卫星很可能不限于某一特定国家/地区或区域，必须对卫星通信所用频率进行国际协调。ITU正是支持此类频谱协调的组织，因为某些频段会在一些地区用于地面PLMN，而另一些地区则可能允许使用NTN PLMN。如果某公司想要发射卫星，首先应在该国负责的政府机关的许可机构进行审批。待该机构批准运营申请后，公司将依照管理无线频率使用的国际条约的规定，向ITU提交频率申请。ITU无线电规则的主要目标是避免有害的无线干扰，其他问题或法规（比如空间中的实际物体或碎片以及避免碰撞）将由UNOOSA等其他组织处理。允许国家/地区为LEO星座的卫星“预留”频谱，即所谓“囤积”，但也会要求他们承担义务，例如需在给定时间内部署一定百分比的卫星，否则囤积将予以取消。

#### 频率范围1 (FR1)

目前讨论了几个用于NTN的频率范围，其中一些落在6 GHz以下的既有频谱内，即FR1，同时10 GHz以上的频率也在讨论当中。当前讨论的用于NTN的FR1频段为：S频段频率，上行方向 1980 MHz至2010 MHz，下行方向2170 MHz至2200 MHz；L频段频率，1525 MHz至1559 MHz DL和1626.5 MHz至1660.5 MHz UL [Ref. 15]。3GPP内部一致同意将n255和n256两个频段作为NTN首先应用的两个频段 [Ref. 15]；可能会将NR频段的前缀“n”改为卫星频段的“s”。图7显示了这两个频段的频率编号明细、带宽、以及资源块数 (#RB) 和子载波间隔相关的最大传输带宽配置 [TS 38.101-5]。这些频率范围的优势为路径衰减较低，且其已用于既有通信，因而可使用已有器件。缺点是众所周知的频谱紧缩问题，由于这些频段已被密集占用，可用带宽会受到限制。总带宽上限大小为40 MHz [TR 38.811]。NTN将继续使用5G NR中定义的部分带宽 (BWP) 方法，因此 UE 配置有一个或多个BWP（另见 [Ref. 1]），并且UE不需要知晓SAN信道带宽。可以使用不同参数集将整个SAN信道带宽划分为多个分段。需要关注的是干扰，例如，

有必要保障在那些允许为NTN目的使用频谱的国家/地区和那些选择用于地面用途的国家/地区之间解决跨境问题。举例来说，用于LTE和NR用途的3GPP频段1/n1和65/n65将与ITU建议的B1和B6部分重叠，允许该频谱用于地面和卫星用途 [Ref. 13]，如下图上半部分所示。频谱使用的其他方面在 [Ref. 12] 中介绍。3GPP为FR1范围内的频谱设定了更高的优先级，但需要研究和应用协调工作和干扰消除技术。ITU WRC决议 [Ref. 13] 中的一段话指出：“在1980 MHz至2010 MHz和2170 MHz至2200 MHz频段（这些频段已确定用于IMT的地面部分和IMT的卫星部分），B6和B7的频率安排以及B3和B5的部分安排存在独特的情况。除非应用合适的干扰消除技术，否则独立的卫星和地面IMT组件无法实现同覆盖、同频率部署。当这些组件部署在相同频段的相邻地理区域时，如果报告出现有害干扰，将需要采取技术或操作措施。”

图7：用于NTN用途的S频段和L频段 (FR1) 的频谱



2022年2月，3GPP全体会议同意了有关NTN UE射频和解调要求的全新子规范 [TS 38.101-5] 的工作，其中包含后续进一步细化所讨论的频率以及如何将其应用于NTN服务。新规与现有规范 [TS 38.101] 的不同之处是，对于NTN UE，当前框架 [TS 38.101-5] 认为需要区分应在传导或辐射要求中评估的某些射频特性。例如，后者允许在考虑最大辐射输出功率时将波束赋形天线增益纳入考量。由于存在与相邻频段协调的问题，NTN频段n255在UL方向上使用频谱的较高部分，n256频段则在DL方向上使用较高部分。因此，默认的TX-RX频率分隔为 n256频段190 MHz、n255频段101.5 MHz<sup>1)</sup>。两个频段都使用100 kHz的信道栅格，射频信道位置由信道号 (NR-ARFCN) 标识。有关编号和信道栅格的详细信息，请参阅 [TS 38.101-5]。为实现小区获取和同步，NTN遵循与5G相同的原理，小区将发射SSB，该SSB的频率位置与全局同步频率栅格 (GSCN) 的栅格一致。为了降低同步过程的复杂性，SSB的时间模式及子载波间隔受到限制。频段n256仅支持15 kHz SCS的SSB，且只允许情况A的映射，而频段n255支持15 kHz或30 kHz SCS，且SSB映射情况A和情况B均受支持（另见 [TS 38.213] 或 [Ref. 1]）。

<sup>1)</sup> 注：在n255频段，上行方向使用频谱的较高部分。

## 频率范围2 (FR2)

3GPP研究 [RP-212144] 建议讨论10 GHz以上的NR-NTN，因为这是提供宽带服务的关键频率范围。这种更高频率范围的讨论涉及多个方面，包括已经存在的频段到远期范围的新频段。最优选频段为Ka频段，下行方向介于17.7 GHz和20.2 GHz之间，上行方向介于27.5 GHz和 30 GHz之间，如ITU有关卫星通信预期使用频率的资料所述 [Ref. 19]。

**表2：依据ITU设想的用于卫星通信的10 GHz以上的频率范围**

频段	下行（空对地）	上行（地对空）
Ku频段	10.7 GHz至12.75 GHz	12.75 GHz至13.25 GHz和 13.75 GHz至14.5 GHz
Ka频段 (GEO)	17.3 GHz至20.2 GHz	27.0 GHz至30.0 GHz
Ka频段（非GEO）	17.7 GHz至20.2 GHz	27.0 GHz至29.1 GHz和 29.5 GHz至30.0 GHz
Q/V频段	37.5 GHz至42.5 GHz 47.5 GHz至47.9 GHz 48.2 GHz至48.54 GHz 49.44 GHz至50.2 GHz	42.5 GHz至43.5 GHz 47.2 GHz至50.2 GHz 50.4 GHz至52.4 GHz

在WRC-23世界无线电大会上，ITU将考虑将频段17.7 GHz至18.6 GHz、18.8 GHz至19.3 GHz和19.7 GHz至20.2 GHz用于空对地（下行）传输，将27.5 GHz至29.1 GHz和29.5 GHz至30 GHz用于地对空（上行）传输 [Ref. 19]。此外，WRC-23 预计将解决星间链路的监管问题，并将考虑有关移动卫星业务的新频谱需求以及新分配的研究。即将召开的WRC-23大会具有关键意义。它将保障继续促进合理、高效、经济地利用无线频率以及包括LEO在内的任何相关轨道。作为国际频谱协调及其区域的示例，[RP-193234] 提出一组初始NTN建议频率（参见图8）。

FR2频率范围目前在Rel-17中被认为优先级较低，主要有三个原因：

- ▶ 所讨论的Ku或Ka频段的频率属于目前FR1和FR2之间的频谱空白，因此3GPP首先需要就如何处理7.125 GHz到24 GHz之间的频谱达成一致。
- ▶ FR2中用于NTN的频率遵循FDD双工模式，而所有其他FR2频段则为TDD模式。因此，3GPP需要增强的5G规范，以便在FR2中也支持FDD。
- ▶ 在FR2中引入FDD可能会导致TDD和FDD之间的干扰问题，需要进一步分析。

对于NTN，由于延迟较长，这些频率将采用FDD双工方案。TDD系统存在TX-RX切换的挑战，由于延迟较长，TX-RX切换之间必须设有保护间隔，这对频谱效率不利。在未来的扩展中将纳入HAPS等机载站以及直升机、无人机、UAV等空对地 (ATG) 基站，且不会明确排除使用TDD双工方案。在未来的演进中，将有望实现不同NTN频段的载波聚合。

图8：NTN频谱 – FR1和FR2一览



RP 193234提出了不同ITU区域FDD和TDD模式下用于HAPS、GEO、非GEO NTN的各种频段

	区域1	区域2	区域3	
下行 (空对地)	17.3 GHz至20.2 GHz	17.7 GHz至20.2 GHz	17.7 GHz至20.2 GHz	Ka频段: GEO
上行 (地对空)	27.5 GHz至30.0 GHz	27.0 GHz至30.0 GHz	27.0 GHz至30.0 GHz	
下行 (空对地)	17.3 GHz至20.2 GHz	17.7 GHz至20.2 GHz	17.7 GHz至20.2 GHz	Ka频段: 非GEO
上行 (地对空)	27.5 GHz至29.1 GHz和 29.5 GHz至30.0 GHz	27.5至29.1 GHz和 29.5至30.0 GHz	27.5 GHz至29.1 GHz和 29.5 GHz至30.0 GHz	
下行 (空对地)	2170 MHz至2200 MHz	2160至2200 MHz	2170 2200 MHz	S频段: GEO和非GEO
上行 (地对空)	1980 MHz至2010 MHz	1980至2025 MHz	1980至2010 MHz	
下行 (空对地)	2110 MHz至2170 MHz	2110至2160 MHz	2110至2170 MHz	S频段: HAPS
上行 (地对空)	1885 MHz至1980 MHz和 2010 MHz至2025 MHz	1885至1980 MHz	1885至1980 MHz和 2010至2025 MHz	

### 针对ISL、地面站和HAPS的额外频谱规定

现今的卫星星座（参见第2章）也将Q频段和V频段用于卫星和地面站之间的馈线链路。由于地面站静止不动，并且通常采用更复杂的天线设计，因此在采用具有先进波束赋形方法的更大阵列时，可对这类特定用例使用这些更高的频率。

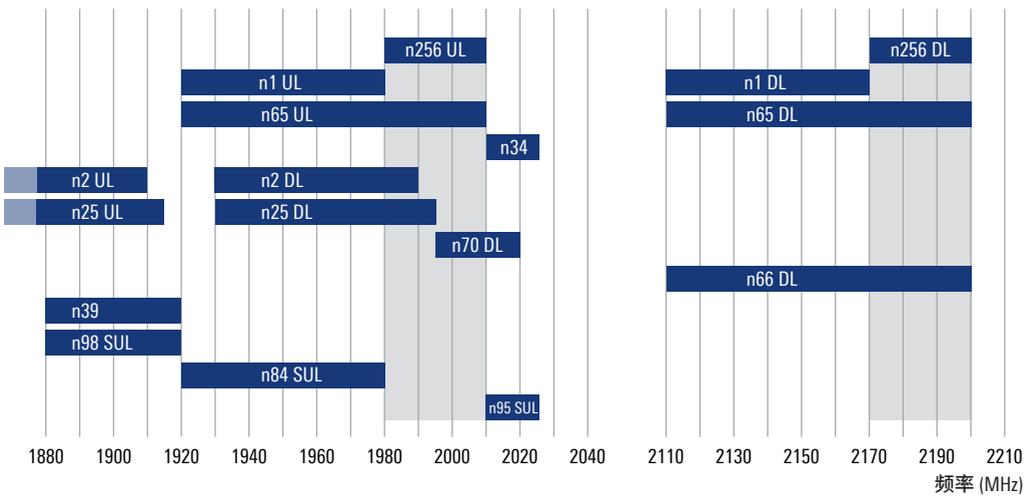
除了服务链路的频谱方面，国际监管也需要考虑卫星和地面站之间的馈线链路以及星间链路的频谱因素。未来的频谱协调和监管将需要考虑技术演进，并将HAPS或UAV等机载站的频谱纳入考虑因素。

根据ITU的规定，HAPS目前可用作蜂窝基站的唯一频谱为2.1 GHz。在与地面频段配合的情况下，用于移动服务的主要HAPS频段包括1885 MHz至1980 MHz、2010 MHz至2025 MHz和 2110 MHz至2160 MHz的频谱。不过，WRC-23议程第1.4 项正考虑在已确定用于IMT的特定频段上开展HAPS移动服务，即694 MHz至960 MHz、1710 MHz至1885 MHz和2500 MHz 至2690 MHz [Ref. 23]。

### 与NTN相关的射频共存方面

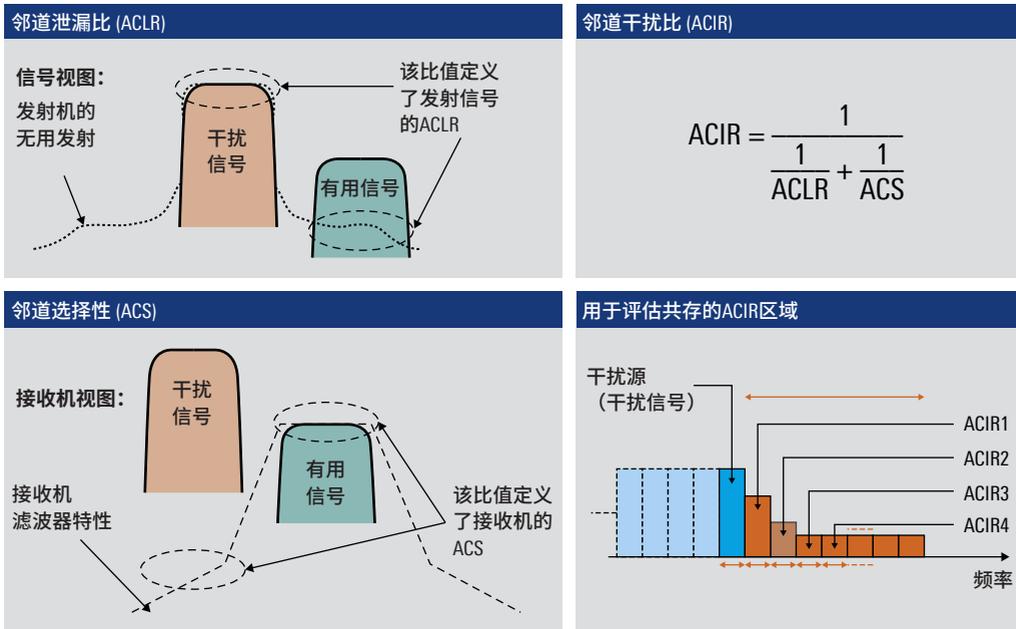
通常认为对射频的干扰情况是受到引入NTN所导致的两个方面的影响。首先，小区或波束信号覆盖超过了国家/地区和地面小区的边界，其次，所用频谱位置与现有5G频段重叠或相邻。出于这些原因，3GPP启动了旨在进一步调研这类共存方面的研究计划 [TR 38.863]。为了促进共存分析需求，下图显示了与设想中的NTN频段n256相邻和重叠的5G地面频段。

图9：相对于NTN频段n256的相邻和重叠5G频段的共存方面



地面频段n65与NTN频段n256完全重叠，频段n66下行方向完全重叠，频段n2、n25和n70与频段n256部分重叠，频段n1以及n84和n95则与NTN频段相邻。**邻道干扰比 (ACIR)** 是在分析潜在共存方面时使用的指标。ACLR和ACS是用于发射机和接收机性能的两项质量标准，ACIR则为两者的组合（参见图10）。**邻道泄漏比 (ACLR)** 为发射机质量标准，定义了相邻频段中的无用发射；**邻道选择性 (ACS)** 定义了接收机抑制邻道干扰信号的能力。为综合判断，将结合使用相邻信道上的两项泄漏。ACIR是指一个信道上发射的功率与接收机在邻道上因TX和RX缺陷而收到的总干扰之比。为了获得更好的评价标准，干扰源和被干扰频段之间的距离具有相关性，如图中右下方所示。

图10：邻道干扰比 (ACIR)



[TR 38.863] 中的3GPP共存分析研究了地面和NTN网络之间的组合（其中地面或NTN为干扰源），并探讨了UL和DL的组合。研究中还进一步详细介绍了波束星座、UE RX和TX参数、功率电平等内容。基于HAPS的gNB的NTN和NTN之间的共存方面留待将来研究。

### 3.3 支持NTN的用户设备

本章将简要概述通常认为与NTN连接相关的UE或终端特性。在技术演进中，最初的NTN终端作为客户驻地设备 (CPE) 连接到GEO卫星，而NewSpace网络将此类NTN终端部署为卫星（多半为LEO）和普通终端用户通信设备之间的透传中继接口 [Ref. 16]。这种UE行为也称为间接连接，例如，CPE提供了卫星接入的中间节点功能。为简明起见，我们将不会进一步深入探讨这种间接模式。

从更高层面总体而言，存在三种可能的UE类型：仅支持地面5G的UE、仅支持NTN（NR-NTN和/或IoT-NTN）的UE以及同时支持两者的UE。NTN和地面网络之间的小区选择和移动性场景只与第三类UE有关。

我们将第一类UE又分为两种型式：手持式和固定式。**手持式UE**与智能手机或物联网设备类似，顾名思义，是可以移动的终端。通常假定该类UE中没有针对TX性能的特定增强。换言之，手持式UE的最大发射功率为23 dBm，符合功率等级3 (PC3) 的定义，并且假定RX 侧没有特定的天线增益。**甚小口径终端 (VSAT)** 一词描述的UE主要为固定式终端，即永久安装在建筑物上或可能安装在车辆或飞机等移动平台上的终端。3GPP允许更高的发射功率 (33 dBm)，并假定这类UE提供更高的天线增益，原因可能是采用复杂的相位阵列式天线方向图或抛物面天线形状。[TR 38.811] 中进行的研究假定这些特性是通常认为在S或L频段以及Ka 频段工作的UE所具备的最低射频能力。

表3：NTN UE射频参数 – 示例 [TR 38.811]

	甚小口径终端 (固定或安装在移动平台上)	手持式或物联网设备 (3GPP功率等级3)
发射功率	2 W (33 dBm)	200 mW (23 dBm)
天线类型	60 cm等效口径（圆极化）	全向天线（线极化）
天线增益	TX: 43.2 dBi, 接收: 39.7 dB	TX和RX: 0 dBi
噪声系数	1.2 dB	9 dB
EIRP	45.75 dBW	-7 dBW
增益噪声温度比 (G/T)	18.5 dB · K <sup>-1</sup>	-33.6 dB · K <sup>-1</sup>
极化	圆极化	线极化

除了这些最低射频能力，支持NTN的UE显然也应支持后续章节所述的一些机制。在第一阶段部署中，UE需要的主要能力为GNSS支持，即UE需要基于GNSS或地面RAT来定位其地面位置。UE随后使用这些信息对时间和频率调整进行预先补偿。

为了描述卫星接入频率和UE性能要求，3GPP通过了一项子规范 [TS 38.101-5]，该子规范在撰写本白皮书时提出，可用作初步框架。首批NTN频段n255和n256将23 dBm视为UE的最大发射功率。为了解决与相邻频段的共存问题，每个频段的网络可以定义额外的发射要求。在这种情况下，UE必须应用额外降低的功率值。最低受控UE输出功率为-40 dBm。发射关断功率、频率误差和调制质量等其他发射性能特性可重用当前针对地面5G UE规定的要求 [TR 38.101]。由于相邻频段的共存是NTN的重大问题，网络可以制定额外的杂散发射要求，作为小区切换消息的一部分。在这种情况下，发射到邻道的UE功率不应超过某个限值（例如n255频段的带宽边缘-80 dBm）。该规范的未来版本可能会定义更新的ACLR和SEM模板等无用发射的总量。

在撰写本文时，UE的接收机性能参数还未最终商定。适配非常必要，例如，由于NTN的链路预算问题，需要就UE的接收灵敏度达成一致。表12中给出了链路预算计算示例。有关UE RX 部分的要求是在所有频段采用双天线端口接收机。除了接收机灵敏度 (REFSENS)，该规范还定义了一些性能参数，例如最大输入电平、邻道选择性和针对假定带内、带外或窄带干扰源的阻塞特性。其他要求为杂散响应等RX测试方面，其中任何其他频率的CW干扰信号都不应引起有用信号劣化、交调阻塞以及接收链路所致的杂散发射。

3GPP定义了特定UE功能列表（参见 [R1-2200780]），例如上行时间预补偿、时序关系增强、UE特定TA补偿报告、增加HARQ进程数量、极化信令支持、性能增强或HARQ码本增强，这些功能对应于UE支持和启用NTN的能力。其中一些面向用户面的子功能对于支持NTN 的UE来说属于必选功能，通常认为这些功能必不可少，比如RACH适配、HARQ RTT定时器扩展，以及MAC、RLC和PDCP中的其他定时器（可以调整为更长的RTT）。还有一些子功能对于支持NTN的UE来说是可选功能，例如时间提前量报告功能、HARQ 禁用或新逻辑信道映射规则。UE控制面将TAC软更新和SMTC增强（例如双并行SMTC）等子功能视为必要功能。另外一些控制面子功能是NTN UE的可选功能，比如基于小区停止定时器的相邻小区测量、基于位置的小区重选、最多四个SMTC以及条件切换增强。

UE架构的另一个设计方面为使用极化。大多数NTN链路可能使用圆极化方案（参见第4.5 章）。在最简单的架构中，UE可以只应用线极化、垂直或水平极化，并容许3 dB的极化损耗。使用更复杂的配置时，UE可为所有水平和垂直极化应用两个RX分支，并实现3 dB的组合增益。在上行方向，[TR 38.821] 假定UE TX侧为单一线极化，卫星可以容许3 dB的极化损耗，并将相反的圆极化用于其他链路以获得更高的卫星容量，或者卫星也可在其RX链内将两个圆极化进行软组合，并获得3 dB的增益。

### 3.4 卫星接入节点的无线发射与接收

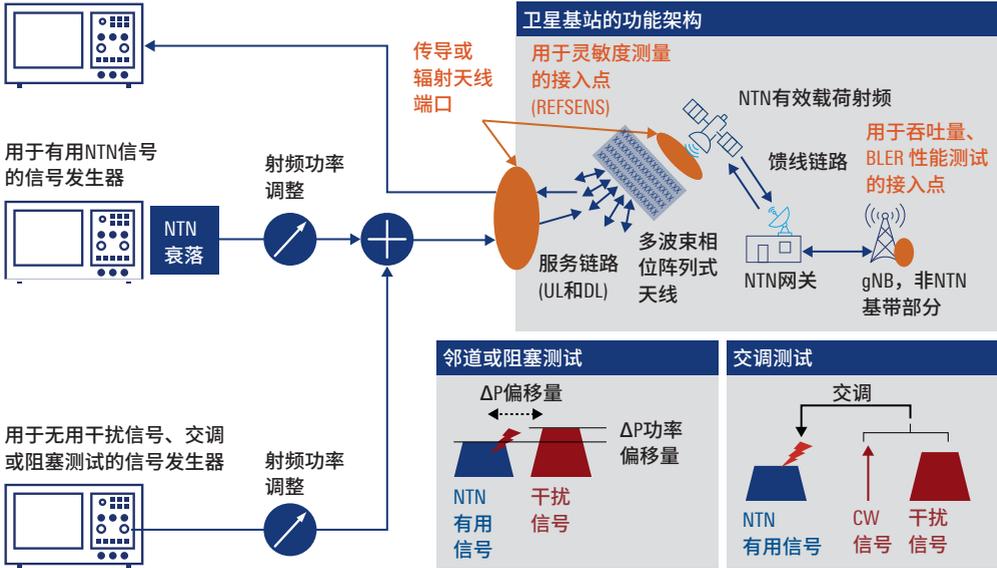
除了卫星的星座和轨道方面，3GPP还考虑了卫星接入节点 (SAN) 的一些射频因数，类似于基站射频特性的现有规范 [TS 38.104]。本章的目的是考虑将SAN作为射频基站，并概述应提供哪些射频功能，以及测试和测量如何保障其性能。此类卫星的射频方面在 [TS 38.108] 中规定。现已通过初步框架草案，其中包含用于TX和RX评估的射频框架参数，该草案可能还会进一步更新。发射机通过发射功率、功率动态性、无用发射、发射信号质量（如EVM）、频率或时间对准等指标来表征。与地面基站类似，接收机的表征指标包括灵敏度、选择性、动态范围和阻塞特性。与 [TS 38.104] 中的不同基站类型相比，通常假定SAN为混合型“H”或空口“O”，分别对应于传导和空口 (OTA) 辐射连接。鉴于卫星节点的基本功能之一是波束赋形，辐射设置允许考虑射频指标中的天线增益，除了发射功率，EIRP等指标也被视为测试参数。由于假定卫星天线作为多波束相位阵列式天线存在，某些OTA天线测试场景将为射频测试提供补充。信道带宽、子载波间隔和信道栅格等与NTN频段n255和n256有关的参数遵循 UE射频特性的定义（参见图7）。

除了一般射频特性，SAN还将进行性能方面的评估，也即定义各种条件下可实现的吞吐量等标准。这些条件包括图11所示的射频灵敏度和干扰抑制测试。射频灵敏度指标概述了当接收功率电平处于最小边界时应达到的吞吐量，这种卫星基站测试设置在上行方向应用特定的衰落文件。干扰测试设置将包括可能位于共用信道或相邻频段的干扰源，以及针对带外干扰情况的阻塞测试。在接收机性能的总体背景下，两个有源发射产生的影响NTN频段RX性能的潜在交调产物也是测试领域之一。共存方面（另见第3.2章）是另一项相关的测试指标，但应考虑到地面和NTN之间的共存主要影响地面上的UE等因素。接入节点共存应考虑上行场景，特别是由地面网关在空间中的波束重叠所产生的潜在干扰。

卫星射频测试背景中的主要挑战是作为DUT的sNB的架构细节。讨论的主题包括NTN有效载荷部分是否可以独立评估，被测NTN基础设施是否包括馈线链路和网关，以及gNB剩余架构中的一些地面基带功能（另见第3.10章）。在图11这种卫星基站的逻辑设置中，将NTN有效载荷射频的天线端口作为灵敏度测量的接入点，而基于CRC计数为正值MAC层传输块来捕获吞吐量，因此这些吞吐量性能测试的接入点位于协议栈中的MAC层之上，在gNB基带部分实现。根据卫星使用透明还是（未来的）再生架构方法，必须假定可选馈线链路加网关作为DUT架构的一部分。

图11: 卫星基站射频测试布置

用于EVM、SEM、ACLR、发射功率等TX测试的信号分析仪



卫星接入节点的多项射频参数在当前规范中尚未定义。研究 [TR 38.821] 在仿真过程中使用了最有可能在真实射频器件中实现的几个假设。

表 4: 卫星接入节点射频参数 – 示例 [TR 38.821]

卫星轨道	GEO	LEO-1200	LEO-600
卫星高度	35 786 km	1200 km	600 km
卫星天线方向图	波束赋形天线, 波束宽度约为 10°		
<b>DL传输的有效载荷特性</b>			
<b>S频段 (即2 GHz)</b>			
卫星天线等效口径	22 m	2 m	2 m
卫星EIRP密度	59 dBW/MHz	40 dBW/MHz	34 dBW/MHz
卫星TX最大增益	51 dBi	30 dBi	30 dBi
3 dB波束宽度	0.4011°	4.4127°	4.4127°
卫星波束直径	250 km	90 km	50 km
<b>Ka频段 (即DL为20 GHz)</b>			
卫星天线等效口径	5 m	0.5 m	0.5 m
卫星EIRP密度	40 dBW/MHz	10 dBW/MHz	4 dBW/MHz
卫星TX最大增益	58.5 dBi	38.5 dBi	38.5 dBi
3 dB波束宽度	0.1765°	1.7647°	1.7647°
卫星波束直径	110 km	40 km	20 km
<b>UL传输的有效载荷特性</b>			
<b>S频段 (即2 GHz)</b>			
卫星天线等效口径	22 m	2 m	2 m
增益噪声温度比 (G/T)	19 dB · K <sup>-1</sup>	1.1 dB · K <sup>-1</sup>	1.1 dB · K <sup>-1</sup>
卫星RX最大增益	51 dBi	30 dBi	30 dBi
<b>Ka频段 (即UL为30 GHz)</b>			
卫星天线等效口径	3.33 m	0.33 m	0.33 m
增益噪声温度比 (G/T)	28 dB · K <sup>-1</sup>	13 dB · K <sup>-1</sup>	13 dB · K <sup>-1</sup>
卫星RX最大增益	58.5 dBi	38.5 dBi	38.5 dBi

[TS 38.108] 定义了卫星接入节点的TX和RX特性。当前状况仅考虑FR1频段、两种轨道高度（600 km和1200 km）的GEO和LEO卫星星座以及1-H和1-O两种SAN类型。TX特性描述了基于制造商声明的最大发射功率、输出功率控制范围和动态、发射信号质量（EVM、频率误差和时间对准）以及无用发射方面（SEM、ACLR、杂散发射）等参数。由于NTN传输可能超出国家/地区边界，3GPP定义了可能的区域要求。例如，为保护地面5G频段不受NTN干扰，可对某些地区实施有关工作频段无用发射的规定。RX性能的测量方式与5G NR相同；基于固定参考信道（FRC），卫星应在参考灵敏度水平上达到最大吞吐量的95%。传导1-H测试布置的典型REFSENS值在-99 dBm范围内。用于灵敏度测试的传导测试布置测量接入点位于天线阵列的下游，因此灵敏度水平不考虑天线增益（参见图11）。此外，RX性能还包括带内选择性、阻塞、交调和杂散发射测试。

[TS 38.108] 中的当前测试程序描述了传导（1-H）和辐射（1-O）条件。1-O型辐射特性要求卫星具有多波束能力，每颗卫星至少需要8个收发信机单元。

未来版本的射频测试方面届时需考虑NTN的附加频段，特别是带宽更宽的毫米波频率，以及由于增强波束赋形方法而导致的射频变化。可选讨论方面包括是否及如何在该射频测试概念中包括ISL方面。在未来进程中，3GPP计划在新创建的规范 [TS 38.181] 中引入一些SAN一致性测试场景。[R4-2111460] 中给出了初始配置建议。

### 3.5 卫星星座

NTN是Rel-17的工作项目，使用星载站与地面UE进行通信。像所有卫星业务一样，NTN卫星从环绕地球的轨道运行（参见图12）。这种轨道星座的数学描述模型基于开普勒数学定律（参见第3.8章）。

这些**卫星轨道**在卫星网络规划方面起到至关重要的作用，例如容量规划、信号覆盖和干扰规划 [Ref. 31]。本文将不会深入研究那些复杂的卫星星座规划主题，我们的目标是只介绍这些方面的基础知识。

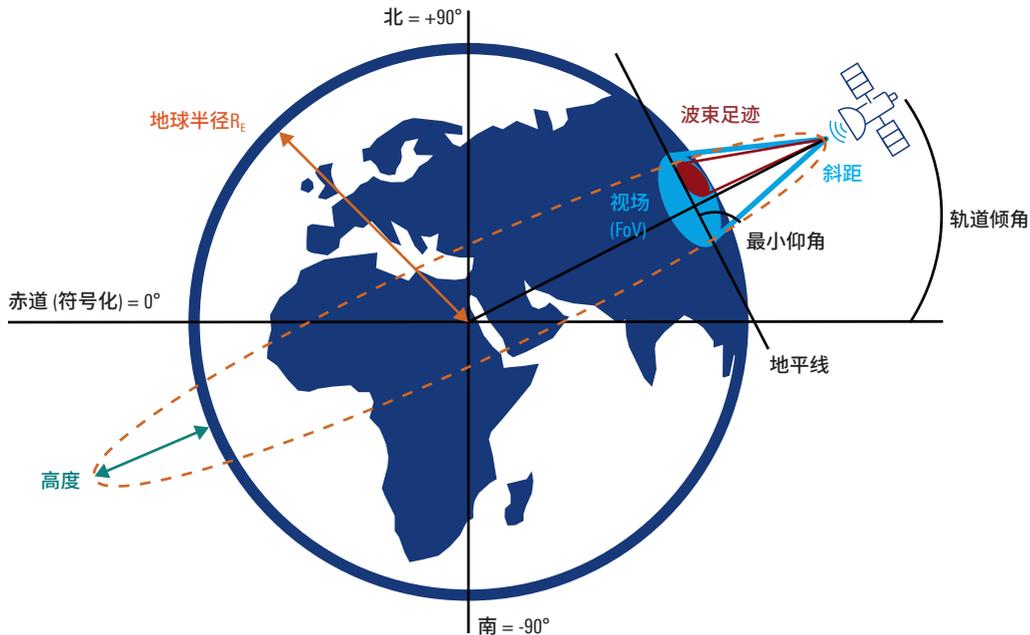
**卫星星座**是作为系统一起工作的一组人造卫星，它们可能通过链路互连，并遵循相同的覆盖目标。卫星星座中的**轨道外壳**指的是一组高度相同、倾角可能相同的圆形轨道。通常，外壳内的这种轨道在天文经度上均匀分布 [Ref. 9]。

我们可以确定以下三个主要参数，它们影响到为实现特定覆盖和容量目标所需的卫星总数：

- ▶ 仰角，即用户终端的地平线（与用户当前位置地表上的地球半径相切）与UE和星载站之间的连线所形成的夹角。最小仰角代表从UE角度能够看到星载站的最低仰角
- ▶ 卫星高度或轨道高度，定义为地球海平面中值与当前卫星在轨位置的垂线距离
- ▶ 地球赤道与卫星轨道椭圆之间的倾角

除了这三个参数以外，还有一个参数或术语“斜距”，是指假定UE位于覆盖表面的最大边缘，即处于最小仰角时，在该方向上卫星与UE之间的距离长度。卫星的高度和仰角定义了地球表面上对应于所谓视场 (FoV) 的区域。此FoV对应于理论覆盖区域（参见图12）。在FoV内，地面设备将能接收足够的卫星TX电磁辐射场强，并能向卫星发射信号。显然，FoV取决于卫星轨道高度和最小仰角。请注意，此FoV并不直接对应于我们的覆盖区域。在现实环境中，卫星使用一个或多个波束在地球表面提供无线覆盖。其中一个波束的信号覆盖定义为波束足迹。出于某些原因，例如相对于其他卫星的干扰方面、相位阵列式天线架构与其各自的波束赋形方法以及卫星的可寻址性，未必可以完全覆盖可能的FoV区域。对于可寻址性或卫星过顶，我们所指的是这样的情况：LEO卫星相对于地球移动，因而只能在一定时间内可见；其次，FoV还取决于倾角或仰角。顺带一提，可寻址性的先决条件是已建立从卫星到地面网关的连接。概言之，我们认为，星基连接达到100%覆盖率和100%可用性并不现实。

图12：星基网络星座的一般情况



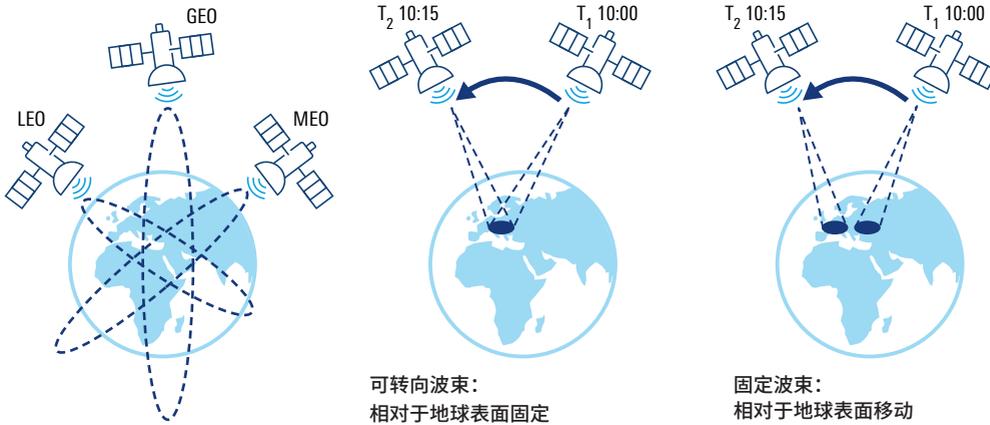
下面概括介绍四种不同的轨道星座：

- ▶ **低地球轨道 (LEO)** 卫星在环绕地球的圆形轨道上运行，高度约在500 km到2000 km之间，运行速度约为28000 km/h，轨道周期约为90分钟。由于LEO卫星的高度不算很高，发射这类卫星不需要大推力火箭，因此更具成本效益。近地距离带来的另一项明显优势是往返时间 (RTT) 较短，通常小于30 ms。LEO卫星的尺寸一般也较小，通常周长小于1米，甚至只有十几厘米（纳米卫星），重量则在500 kg以下。通常假定NTN在卫星站使用波束赋形机制。LEO卫星的典型波束足迹范围介于100 km到1000 km之间。LEO卫星的缺点是运行环境恶劣（在该环境中仍可能存在大气气体），因此生命周期一般不到10年
- ▶ **中地球轨道 (MEO)** 卫星在环绕地球的圆形轨道上运行，高度在7000 km到25000 km之间，运行速度约为13800 km/h，轨道周期约为6至12小时。比较著名的MEO卫星星座之一是用于定位服务的GNSS。这类卫星的波束足迹与LEO星座类似
- ▶ **地球静止轨道 (GEO)** 卫星在环绕地球的圆形轨道上运行，高度为赤道上空35 786 km，因而就相对于地球上给定点的仰角和方位角而言，星载站在理论上保持固定位置。考虑窄波束时，波束足迹的大小范围约为200 km，使用大尺寸波束时，范围可达4000 km。这类GEO 卫星的速度为11070 km/h，轨道周期相当于一天。比较著名的GEO卫星有Intelsat这样的通信卫星，还有Astra或Eutelsat这样的电视广播媒体卫星，等等。由于距离较远，GEO卫星的RTT 约为544 ms
- ▶ **高椭圆轨道 (HEO)** 卫星在环绕地球的椭圆轨道上运行。由于采用这种轨道形状，从地球点可以观测到卫星的范围更远，例如，当所需的信号覆盖服务区域为两极这样的边远地区时，HEO卫星可能更有优势。缺点是椭圆轨道形状需要一定的控制，由此还会产生浮动延迟，存在时间或轨道变化的频率漂移，并且覆盖区域并不恒定。目前发布的3GPP NTN并未将HEO卫星考虑在内
- ▶ **高空平台系统 (HAPS)** 是涵盖飞机、气球、直升机或无人机 (UAV) 等所有可在空中飞行物体的通用术语。这些物体可以非常灵活地在几百米到15 km的高度上运行，其波束足迹直径平均仅为几千米到100 km，由于距离较近，RTT可以短到仅有几毫秒，几乎与地面网络水平相当。从前面描述的用例来看，HAPS星座的目标是提供热点，或者用于短期系统恢复和连接恢复。有关HAPS星座和场景的进一步详细介绍，请参阅 [Ref. 23]。



图14: NTN星座和波束足迹方面

平台	高度	轨道	波束足迹
GEO	35 786 km	相对于地球给定点的仰角/方位角保持固定位置	200 km至4000 km
LEO	500 km至2000 km	环绕地球的圆形轨道，相对于地球给定点为非静止状态	100 km至1000 km



文档 [Ref. 12] 进一步介绍了有关卫星对UE可见时间的详细信息，并就研究结果加以解读。

该时间显然取决于轨道高度、波束足迹半径、卫星速度、UE速度、UE和卫星相互之间的运动方向，以及我们假定移动波束场景还是固定波束场景。针对LEO星座和固定波束场景，卫星相对于UE位置保持在地平线之上的时间约为7至10分钟。针对移动波束场景，根据文档 [Ref. 12] 的表格中的数值，UE保持在波束覆盖范围内的时间约为6秒至130秒，具体取决于波束足迹大小。

### 3.6 NewSpace卫星 – 架构演进

从5G到非地面网络的技术演进也伴随着过去几十年来卫星行业的技术飞跃，我们在其中看到卫星架构和场景发生重大变化。在用例和场景方面，我们前面介绍了传统广播服务 (BSS) 如何由固定 (FSS) 和移动卫星业务 (MSS) 与高吞吐量和甚高吞吐量卫星 (HTS) 进行补充。如今，宽带信号传输和接收、基带数字信号处理以及使用复杂相位阵列式天线的数字有源波束赋形等功能已相当常见。最初的卫星应用以GEO星座为目标，而未来NewSpace卫星将会发射到非地球静止卫星轨道 (NGSO)。在本章中，与卫星有关的术语“NewSpace”是指具有内置处理功能和数字波束赋形天线的卫星，这种卫星支持多波束场景，其中单颗卫星能够在RX和TX中同时产生数百个波束。卫星生态系统涵盖多种不同应用，例如导航系统 (GNSS)、电视广播卫星，当然还有众多提供通信业务的卫星星座。在这一方面，可以认为5G系统是庞大卫星业务版图上的又一块拼图。不过本白皮书的重点是5G NTN通信。仅出于完整性起见，请注意，卫星在大气层中的飞行状态需要应对飞行条件和温度的剧烈变化，因此所应用的优化方法也需要在恶劣和极端条件下正常工作。

## 用于5G NTN的相位阵列式天线

具有挑战性的方面将在第4.2章中进一步详述。由于地面终端与卫星之间距离很远，应当采用高度定向天线。这种天线旨在满足两个主要方面，一是高天线增益以克服衰减，二是高方向性以减少无用发射。提供高增益波束转向功能的技术解决方案为相位阵列式天线。简言之，相位阵列式天线是天线的组合（阵列），其中模拟或数字移相器和振幅控制器允许信号定向辐射。相位阵列式天线的优势在于其灵活性和产生大量高增益点波束的能力。此外，先进的波束管理允许生成零值，从而可减少干扰。高路径损耗会造成不良影响，手机成本和复杂性需要尽可能降低，这些因素促使工程师不断改进卫星天线的性能，以提高天线的灵敏度和增益，作为应对高路径损耗的对策。过去的传统卫星首先关注宽波束足迹和简单的TX和RX天线链，主要是抛物面反射器类型的天线，这些卫星通常称为弯管卫星。有关这类卫星及其技术演进的概述请参阅 [Ref. 20]。较新星座以NGSO为目标，旨在促进交付灵活的商业用例，比如在泛在覆盖场景中提供互联网服务。

卫星工程师追求的目标是研发具有全阵元数字波束赋形能力的全柔性化软件定义卫星。市场分析指出，基于平板天线 (FPA) 的非GEO (NGSO) 高吞吐量卫星 (HTS) 预计将主导未来的非地面宽带通信。电动转向多波束天线、透明或再生数字化内置处理等技术（参见第3.10章），以及使用具有极快信号切换过程的星间和/或多卫星连接 [Ref. 20] 都是强有力的趋势。伴随这种技术演进，在向LEO星座发射多颗较小尺寸卫星方面已取得巨大进展，电动转向硅基相位阵列式天线也趋于成熟。最初的卫星架构使用机械转向天线来引导其波束，较新的部署则应用电动转向相位阵列式天线 (ESA) 来提高灵活性，并缩减整体尺寸和重量。挑战在于整体复杂度、成本和能耗以及散热问题。后者要求配备高效功率放大器。借助独立的波束赋形器、上下变频器、采样和滤波器，相位阵列式天线系统可同时处理多个信号流。卫星天线架构在模拟、数字或混合波束赋形方面使用相同的已知原理 [Ref. 1]。与电子工业的发展相似，卫星工业也在使用GaAs、SiGe和CMOS技术等衬底来提高硅片集成度方面进行创新。以用于14 GHz Ku频段的这种TX相位阵列式天线为例，其尺寸为37 cm × 34 cm，包含1024个单元，可实现44 dBW的EIRP和160 W的功耗 [Ref. 21]。由此可以得出结论，5G系统中称为大规模MIMO的技术也将在卫星架构中得到应用。

为保障天线阵列的质量和正确运行，可通过辐射方向图、方向性、半功率波束宽度、EIRP或旁瓣电平（参见 [Ref. 2] 和 [Ref. 36]）等测量参量来验证这些天线的性能。测试布置需要OTA连接。

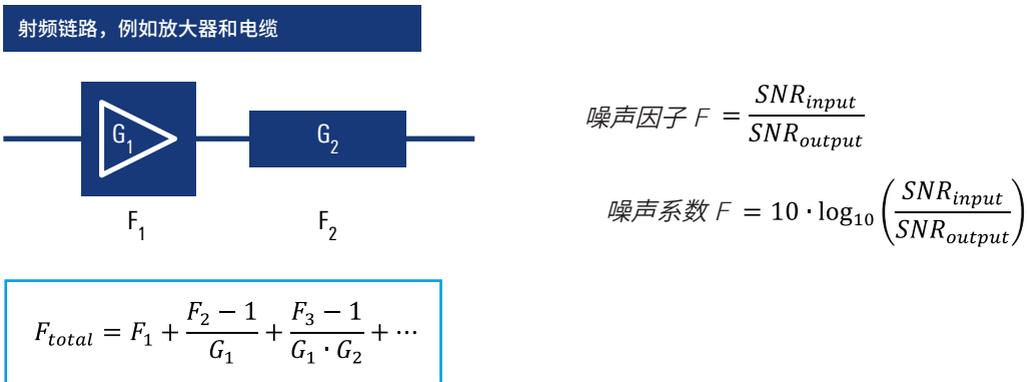
### 优化相位阵列式天线的灵敏度

高灵敏度、高效率、经济适用的前端解决方案是LEO卫星通信的关键推动因素。通常认为这种相位阵列式前端不仅将纳入到卫星中，而且也将纳入地面网关，在某些情况下还将纳入UE中（如VSAT型UE）。挑战在于天线阵列的尺寸，因为它们可能包含大约500到4000个阵列单元（例如Ka频段阵列），这会增加复杂性和成本。接收机灵敏度是关键的性能评估指标 (FoM)。接收机上可见的信噪比 (SNR) 取决于TX EIRP、路径衰减PL、表示为增益噪声温度比  $G/T$  的天线性能（参见第4.2章）以及带宽B和玻尔兹曼常数k的对数。

$$SNR = EIRP - PL + \frac{G}{T} - 10 \cdot \log_{10}(k \cdot B)$$

RX天线设计的目标是优化G/T比。当然，一种方法是提高天线增益G。在相位阵列式架构中，天线口径或单元数量会影响增益。缺点是要以更高的复杂性和外形尺寸为代价。对于术语G/T，除了增大枚举值G，还可考虑减小分母值T。可以提高该G/T参数的另一个实体是低噪声放大器 (LNA)，其任务是将接收的信号提升到高于噪声基底的足够电平，以支持RX链的后续处理阶段。LNA的噪声系数 (NF) 会影响整体RX灵敏度，也即可能降低术语G/T中的天线噪声温度 T。此处请注意，我们使用的是 Friis 噪声系数公式 [Ref. 3]，该公式用来计算射频系统级联链中的累积噪声系数F。在图15中，我们将一台放大器和一根电缆级联组成的射频链路作为简单示例。可能会出现简单的问题：应将这两个实体中的哪一个放在第一位？从增益或衰减（例如负增益）角度来看，信号与此无关，因为总体增益是所有增益的线性组合： $G_1 + G_2 + G_3 + \dots$ ，但对于总体噪声系数，Friis提出的公式揭示了总体噪声系数主要受射频第一级噪声系数影响的情况。后续阶段的噪声系数因实体增益而降低。总之，将具有良好噪声系数特性的LNA置于射频链路第一行的方法是恰当的设计选择。

图15：噪声系数累积的Friis公式 - 提示



卫星相位阵列与典型5G基站阵列之间可能的接收机架构差异在于，前者分解成多个子阵列作为波束赋形器，并将额外的LNA直接放置在波束赋形器前方，可选择通过额外的滤波器进行扩展以消除杂散干扰。分解成多个子阵列可带来降低面板损耗的优势 [Ref. 35]。

除了口径大小会影响增益，设计的关键参数还包括LNA的NF和功率放大器的效率。仅出于完整性起见，请注意，卫星在大气层中的飞行状态需要应对飞行条件和温度的剧烈变化，因此所应用的优化方法也需要在恶劣和极端条件下正常工作。

### **NewSpace卫星功能 – 展望**

在Rel-17中，假定UE具有用于确定其地面位置的GNSS功能。对于卫星来说，这项功能不属于必选功能，且未在3GPP标准范围内，但技术部署同样会考虑在LEO卫星中实现GNSS功能，用于轨道管理和飞行控制目的 (TM-TC) (参见图43)。

除了卫星的上述功能和技术演进，我们还应考虑基带信号处理，特别是向OBP和具有集成处理功能的卫星演进。信号处理链也要应对射频路径损耗、大气和天气条件造成的劣化和SNR 影响、绝对和时变延迟以及多普勒频移等挑战。通过示例，我们想提醒读者注意卫星广播技术中的不同协议架构，例如DVB-S2X [Ref. 38]，其中卫星需要满足广播数据必须由面对完全不同的信道传播条件的多个RX实体进行同时解码的要求。[Ref. 30] 中进行的一项研究调查了基于信道状态信息的信号处理和空间预编码技术的各个方面，以及卫星内部自带处理功能的复杂性。这类多波束卫星中应用的预编码技术与地面基站不同，因为多波束并非完全对应于大规模MIMO。例如，在这种多波束情况下，同信道或波束间的干扰不会随着波束数量的增加而减少，而且不同于UE通常会被周围小区的多个干扰源注入的地面情况，一般认为NTN中的干扰卫星数量较低。

未来的卫星架构不仅需要更高的内置处理集成度，还要考虑与地面站的多个ISL和馈线链路连接。

### **3.7 编排、管理和规划方面**

将NTN引入5G系统需要调整管理和编排方法，以及在卫星发射前引入飞行控制和规划与部署分析。本节旨在简明扼要地给出有关这些方法的提示，它们可能是无线通信网络现有技术发展的延续，也可能对应于生态系统的新方法。其背景是无线生态系统与航空航天生态系统之间的融合，举例来说，航空航天行业对卫星星座规划、飞行控制和管理 (例如TM-TC) 等方面非常熟悉，而在网络、流量和QoS管理等方面则可能要向通信行业学习，反之亦然。3GPP并不直接处理卫星飞行控制等方面的问题。在通信网络演进过程中，我们观察到自组织网络 (SON)、服务管理和编排 (SMO)、操作自动化和维护 (OAM) 或网络功能虚拟化 (NFV) 等技术。NTN并不直接要求强化这些概念，不过提高了必要性等级。显然，一旦卫星发射到太空中，向这种SAN派遣工程师进行硬件维护将成为挑战。因此，这种自主SMO方法是NTN取得成功所必备的前提条件。在第一阶段部署中，引入NTN是为了向地面网络提供补充，可以作为现有地面RAN的星基覆盖网络，也可作为独立卫星网络来充当唯一的服务提供网络，例如在边远地区即是如此。从技术角度来看，NTN首次部署会应用透明架构，其中核心网被认为基于地面系统 (参见第3.10章)。后续几代技术将在机载或星载架构实体中引入更多灵活性。例如，初期卫星轨道星座可能多数由地面飞行控制中心控制，而在未来的星座中则可能会应用某种自治 [Ref. 26]。下面是与网络规划和维护相关的一些关键技术。

## 网络和路由

这类技术用于解决流量路由和网络方面的问题，以便在整个地球表面提供连接服务，并优化面向QoS的数据流。需要特别指出，事实上LEO卫星可能并未通过永久馈线链路连接至地面网关，这意味着ISL增强功能与智能自动化流量路由将成为未来NTN的重要组成部分。当前ISL架构模型使用所谓的“+网格”，其中一颗卫星连接至与其相邻的四颗卫星。“+”号用于模拟网格形状，分别对应于卫星的前、后、左、右（参见图29）。这种星座可提供弹性冗余连接，但并未针对低延迟进行优化，目前正在进行一些旨在优化此ISL路由的研究 [Ref. 9]。另一个网络方面是软件定义网络 (SDN) 的概念，该概念已在5G中实现，做法为将CP和UP分离，并使控制实体集中化。CP架构的模块化允许未来在卫星中部署内置处理单元 [Ref. 26]。网络方面最终会引入MEC，带来更好的数据流量管理和更低的延迟应用，即使对于延迟较长的NTN亦如此。

## 操作、自动化和维护 (OAM)

自动化方面当然不仅仅与NTN有关，我们无意在本白皮书中全方位介绍网络编排和自动化方面，但巨型卫星星座和向游牧节点的演进需要复杂精细的网络编排和自动化管理，而不只是出于降低OPEX的目的。目前正在进行在此类网络管理应用中引入人工智能方法的研究 [Ref. 9]。3GPP提出了在CU和DU之间进行网络拆分 [Ref. 11]，允许在NTN中部署具有内置处理功能的卫星，而网络管理则基于地面。例如，OAM的作用是通过3GPP定义的F1接口，使用地址、接口和协议层细节等信息预先配置网络实体。此外，NTN还可应用O-RAN联盟的分层或混合架构模型，其中gNB拆分为O-RU和O-DU，网络管理（例如SMO）可与O-RU（混合）直接连接或经由O-DU（分层）连接。这种OAM方法与RAN本身无关，可以应用于地面和非地面网络；有关5G架构方面的更多详细信息，请参阅 [Ref. 11]。

## 飞行控制、遥测和遥控 (TM-TC)

这一方面与5G没有直接关系，但随着NR-NTN的引入，显然有必要将其纳入5G系统。与传统网络的主要区别在于，我们假设控制器（或网络运营商）拥有整个网络的全局视图，其中包括可接入性和监测能力。随着全新大规模卫星网络覆盖整个地球表面，单一控制器可能不足以实现快速响应。因此，分布式控制面就显得十分必要，但这种控制器的布局与CP的架构和UP的QoS要求有关，需要进行一些增强，在文献中称为动态控制器布局问题 (DCPP)。在LEO架构中，目前采用三段式方法，包括地面段、卫星或空间段和终端用户终端。飞行控制方面由地面段负责，包括信号覆盖、成本和性能。未来的部署需要内置飞行控制功能，在将UAV等网络节点视为UxNB时尤其如此。卫星星座所涉方面众多，本白皮书仅作管窥，无法言尽。例如，在特定轨道上以恒定角距运行的卫星，对称分布时称为“街道星座”或“Walker星座”（参见图29）。最后需要提到的是，轨道星座还应考虑卫星寿命结束及其离轨程序等方面，以避免产生空间碎片。这些轨道管理和飞行控制方面与网络和路由方面相互依存，在此将不做赘述，否则会显著增加本文篇幅。有关这些技术的概述请参阅 [Ref. 26] 和 [Ref. 27]。

## 卫星链路规划和星座规划

随着NewSpace卫星技术和5G NTN的到来，卫星链路和星座规划都需要为该技术奠定良好基础。在早期GEO卫星星座中，只需计算网关和卫星之间的典型链路预算即已足够，而新星座及其LEO和MEO卫星则较为复杂，需要进行精确建模和优化。这种规划不仅需要考虑大气和天气条件，也要考虑不同国家/地区的监管要求 [Ref. 20]。后者不但能保证成功运行，还将防止对其他星座或地面网络造成干扰。

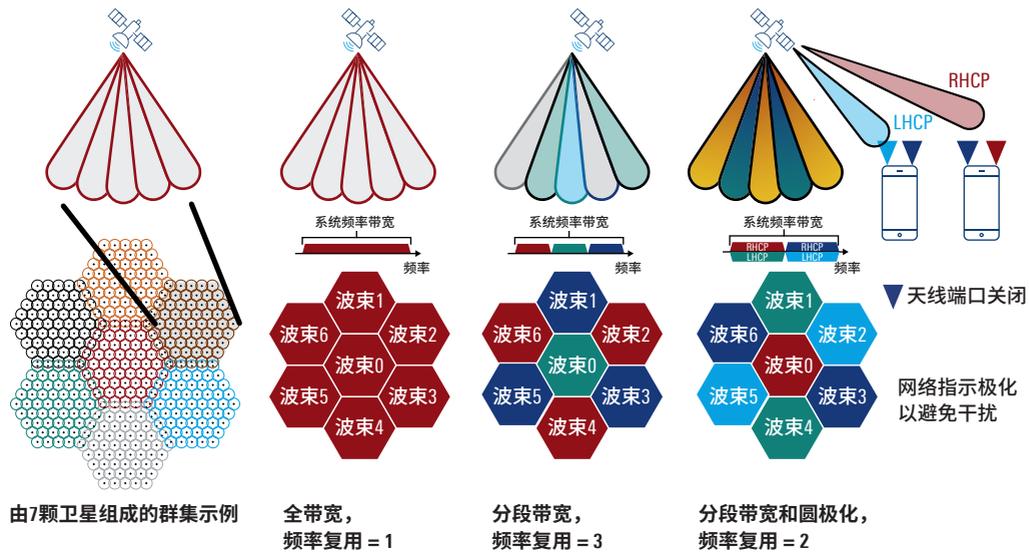
卫星星座规划的各个方面需要另行撰写白皮书详加论述，我们在此仅就主要方面进行非常简要的介绍。规划的目标是通过特定轨道外壳上的卫星星座，提供对某一地理区域的无缝覆盖。因此需要以下基本设计参数（另见图20）：

- ▶ UE可以连接到卫星的最小仰角
- ▶ 轨道高度
- ▶ 卫星轨道的倾角

基于这三个参数，我们可以计算视场 (FoV)，但即使卫星支持多波束，整个FoV也未必与覆盖区域完全对应。另外，向GEO和NGSO分配的实际频谱以及由此产生的GEO卫星的频谱保护还会加剧这一问题。具体而言，ITU 1503号建议书 [Ref. 29] 提议设置排除区角度，作为 NGSO卫星停止运行的边界。因此，不应将卫星的FoV与该卫星的覆盖区域划等号。为了提供更广泛的信号覆盖，需要部署更多卫星；[Ref. 9] 中的一项研究介绍了各种轨道和星座的一些研究结果，以及可能的可寻址数字与部署成本。

考虑到信号覆盖和容量规划方面的频谱分配要求，下面讨论几种方法和流程。这些方法包括大量卫星的可选群集和5G技术的部分带宽 (BWP) 方面内容。要为特定区域提供一定程度的覆盖（也要考虑到FoV事实上不提供完整的覆盖），一种方法是可将卫星及其波束组合成所谓的群集。图16左侧显示了由7颗卫星组成的群集示例，假定该星座用于信号覆盖规划。就干扰方面而言，存在多种方案，[TR 38.821] 中的研究对其中一些方案进行了仿真。5G中有“部分带宽” (BWP) 的概念，最初引入这一概念是为了支持多个参数集和不同能力UE的理论配置 [Ref. 1]。现在的想法是可使用这种BWP配置作为参数，通过对每个特定的卫星波束应用一定的BWP带宽，配置特定的频谱复用。下图提供了一些示例。除了BWP频谱配置外，卫星运营商还可以考虑将极化作为潜在参数来区分基于卫星的链路。下图右侧给出的示例使用LHCP和RHCP来区分无线链路，因此可为每颗卫星提供更高的容量，但缺陷在于会增加干扰风险，且需要指示对每个UE应用的极化。

图16: 卫星群集和频率复用方面



卫星星座规划的一个重要方面（在此将不做展开论述）是LEO卫星对潜在客户的可寻址性。在NGSO星座中，卫星大部分时间将在仅有少数客户可达的地理区域运行。在此情况下，我们使用术语“可寻址性”，即LEO卫星确实向终端用户提供连接服务的时间百分比 [Ref. 9]。这种可寻址性规划显然将成为任何商业案例和投资者关系讨论的基本前提 [Ref. 22]。

与NGSO卫星星座有关的几项研究结果表明，单一星座不太可能在信号覆盖和容量方面提供所需的性能。

### 在轨测试 (IOT)

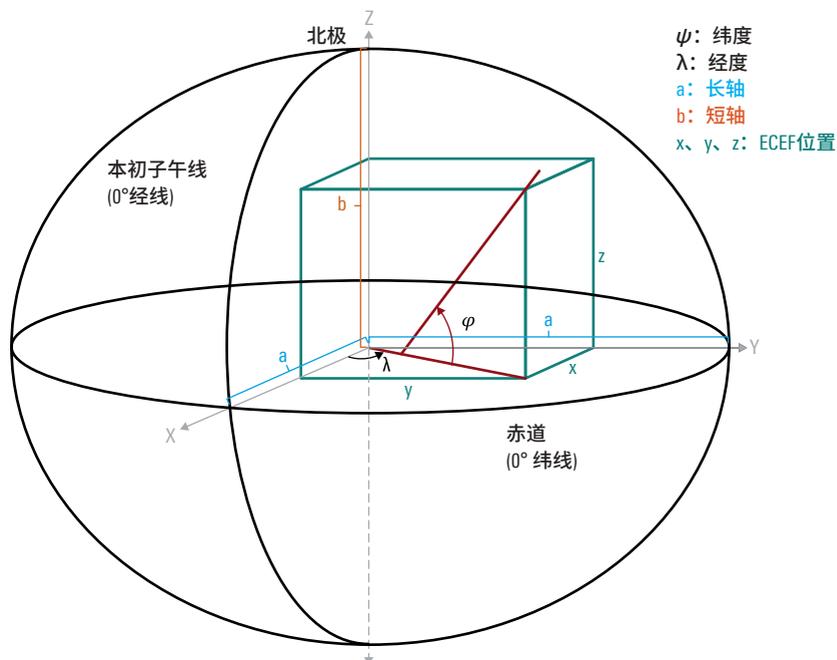
为简明起见，我们仅提及此术语。在轨测试允许在运行期间对卫星性能进行测量，可最大限度降低与运营商的交互。它与5G NR并无明确关联，而是各类卫星星座的常见主题。更多详细信息请访问罗德与施瓦茨卫星测试页面。

### 3.8 有关轨道星座主题的简短题外话（开普勒物理学）

关于轨道星座方面，我们稍离正题，简单讲讲用于描述卫星轨迹的数学方法基础知识。这里要提到中世纪科学家约翰内斯·开普勒 (Johannes Kepler, 1571-1630)，他最先开始通过建立数学基础来描述日心说模型中的行星星座。这些星座方面的表述即为现今所称的开普勒定律，构成所有卫星星座和现代天文学的基础科学背景。有经验的读者可以跳过本节，不过我们认为简要介绍这些方面非常有用。更多信息请参阅 [Ref. 14] [Ref. 17] 和 [Ref. 18] 等文献。

约翰内斯·开普勒与伽利略·伽利雷 (Galileo Galilei) 一样，是最早认识到太阳系以日心说模型为基础科学家之一，认为太阳位于太阳系的中心，行星围绕太阳运行。他首先将行星轨迹描述为由特定参数定义的椭圆。这些参数可用作描述卫星轨迹的卫星星历参数。为理解这种模型，我们使用地心地固坐标系 (ECEF) [TR 38.821]。

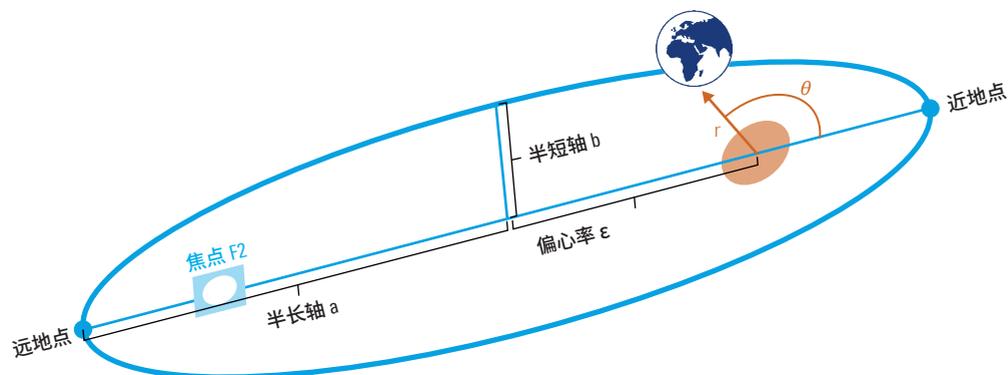
**图17：地心地固坐标系 (ECEF)**



约翰内斯·开普勒将行星轨迹描述为以太阳为焦点的椭圆。由此形成当代天文学中的开普勒第一定律，描述了卫星星历的前两个基本参数。

**开普勒第一定律指出，所有行星的轨道都是以太阳为两个焦点之一的椭圆。**

**图18：开普勒第一定律所述的椭圆行星轨道**



行星的位置用极坐标表示：半径  $r$  = 到太阳的距离，角度  $\theta$  = 从当前位置到经过近地点的长轴的角度（最短距离  $r$ ）。当  $\theta = 180^\circ$ 、 $r$  为最大值时，位于远地点。

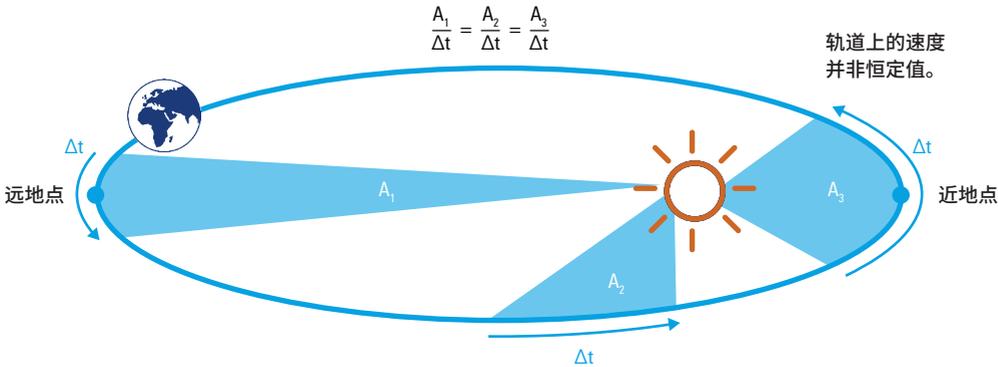
开普勒第二定律描述了椭圆轨迹的表面和速度方面。椭圆上的速度并非恒定值。

**开普勒第二定律指出，将行星和太阳连接起来的线段在相等的时间间隔内扫过相等的面积。**

或者换言之，在时间间隔 $\Delta t$ 内以椭圆轨迹运行的物体所描述的表面A始终大小恒定。

在下图中， $A_1$ 至 $A_3$ 三个表面大小相等： $A_1 = A_2 = A_3$ 。

**图19：开普勒第二定律的行星椭圆轨迹表面方面**



开普勒第三定律描述了每颗行星在其各自椭圆轨迹上的不同速度和轨道时间方面。

**开普勒第三定律指出，行星轨道周期的平方与其轨道长半轴长度的立方成正比。**

### 3.9 星历

星历数据中包含有关轨道轨迹的信息，包括轨道在空间中的形状和位置、卫星在给定时间的位置及其速度。

一般说来，星历包含6个主要参数：

- ▶ 两个关于轨道形状的参数，例如**半长轴a**和**偏心率ε**
- ▶ 三个关于其与地球相对方位的参数，例如**倾角i**、**升交点赤经Ω**及**近点幅角ω**
- ▶ 一个作为时间参考点的参数，即**历元**



星历数据包含有关人造卫星轨道轨迹的信息，即轨道在空间中的形状和位置、卫星在给定时间的位置及其速度。其理念是系统信息块 (SIB) 将提供有关服务卫星位置、速度和时间 (PVT) 的信息。方案 [R2-2007574] 提供了有关卫星位置和卫星速度的详细信息，此类SIB信息总大小约为144位，每隔数秒广播一次以影响内容有效性。邻近卫星星历可以通过SIB广播提供，其格式与服务卫星信息类似，也可通过专用RRC信令提供。

研究 [TR 38.821] 提供以下两组可能的此类星历描述信息：

- ▶ 第1组：一种可能的选择是提供以坐标  $(x, y, z)$  (例如ECEF坐标) 表示的卫星位置。这些位置信息足够GEO使用；对于其他星座，则还需要速度矢量  $(\vec{v}_x, \vec{v}_y, \vec{v}_z)$  和参考时间点。该研究提到了这种方法的缺点：对于LEO卫星，它使 UE 无法在短时间内推断出卫星轨迹，因为LEO卫星以较高速度运动，导致CEF中的给定位置可能已经过时；其次，当卫星在椭圆轨道上运行时，表示线性运动轨迹的速度矢量并没有太大帮助。因此，LEO卫星可能每隔几分钟广播一次更新的位置或星历信息。
- ▶ 第2组：一般来说，星历数据包括用于充分描述轨道面的六个参数，以及作为时间信息的第七个参数 (历元)：
  - 两个关于轨道形状的参数，例如半长轴和偏心率
  - 三个关于其与地球相对方位的参数，例如倾角、升交点赤经及近点幅角
  - 一个作为参考时间点平近点角的参数
  - 一个时间信息参数，即星历参考时间，也称为历元

前五个参数可以确定轨道面，另外两个参数用于确定给定时间内卫星的确切位置 (参见第3.6章)。

**表5：星历参数**

星历参数	
<b>轨道面参数</b>	
$\sqrt{a}$	半长轴的平方根 (半长轴)
$\epsilon$	偏心率 (离心率)
$i_0$	参考时间的倾角 (倾角)
$\Omega_0$	轨道面升交点经度 (升交点赤经)
$\omega$	近地点幅角 (近心点幅角)
<b>卫星级别的参数</b>	
$M_0$	参考时间的平近点角 (真近点角和参考时间点)
$t_{0e}$	星历参考时间 (历元)

在卫星通信中，星历信息在ASCII文件中使用两行元素 (TLE) 的格式表示。这些TLE数据在两个70列的数据行中对环绕地球运行物体的轨道元素列表进行编码。在 [TR 38.821 附录A] 给出了这种TLE元素的示例。

**表6：用于对卫星轨道信息编码的第一行TLE元素**

字段	列	内容
1	01至01	行号 (1)
2	03至07	卫星编号
3	08至08	保密级别 (U: 非保密)
4	10至11	国际代号 (发射年份的最后两位数)
5	12至14	国际代号 (当年的发射序号)
6	15至17	国际代号 (发射物体)
7	19至20	历元年份 (年份的最后两位数)
8	21至32	历元 (一年中的某一天和当天的小数部分)
9	34至43	平均运动的一阶时间导数除以2
10	45至52	平均运动的二阶时间导数除以6 (假定小数点)
11	54至61	BSTAR拖调制系数 (假定小数点)
12	63至63	数字0 (最初应为“星历类型”)
13	65至68	元素集编号; 当为该对象生成新TLE时递增
14	69至69	校验和 (modulo 10)

**表7：用于对卫星轨道信息编码的第二行TLE元素**

字段	列	内容
1	01至01	行号 (2)
2	03至07	卫星编号
3	09至16	倾角 (度)
4	18至25	升交点赤经 (度)
5	27至33	偏心率 (假定小数点)
6	35至42	近地点幅角 (度)
7	44至51	平近点角 (度)
8	53至63	平均运动 (每天飞行的圈数)
9	64至68	发射以来飞行的圈数 (圈)
10	69至69	校验和 (modulo 10)

### 星历提供

具有挑战性的方面之一是星历信息的存储和提供。3GPP同意扩展系统信息广播，例如引入带有NTN信息的SIB19。星历的最低限度表示方法需要至少6个双精度浮点数，外加一些开销。出于这一原因，考虑到NTN星座具有大量卫星，星历数据可能相当可观。文档 [R2-1914195] 提供了5000颗LEO卫星和6个星历参数的示例，每个参数都由64位数字表示，数据大小达到几百KB。请注意，这些信息需要存储在靠近硬件的位置，比如存储在USIM卡中，此时可能存在容量大小问题。作为应对措施，由于多颗卫星通常共享一个共用轨道面，本白皮书建议仅提供共用星历数据，而不是每颗卫星的数据，以便节约存储空间。

3GPP内部目前正在讨论向UE预先提供星历的各种可能性。一种方法是将某些信息存储在按卫星ID编写索引的UE存储器（例如USIM）中，并由该卫星ID来扩展SIB广播。第二种方法是通过系统信息广播星历信息，在降低UE存储器复杂性的同时扩展信令信息内容。为了支持空闲和连接模式下的移动性，卫星可以通过SIB或直接RRC信令来提供相邻小区的星历信息。

向UE预先提供星历数据可以缩短小区采集时间，例如，确定参考信号和系统信息以实现频率和时间同步的时间。特别是如果假定具有高度定向天线的UE要克服链路预算的挑战，该UE必须通过冗长乏味的搜索程序，从地平线一端到地平线另一端搜索整个天空，因为天线波瓣或RX波束形状只对应于整个天空区域的一部分。此外，LEO卫星的快速移动也令这种初始搜索更加复杂。在UE中，卫星星历先验知识的另一个优点是RACH程序，因为UE可以预先调整时间和频率，并为由于RTT更长而导致响应时间延长做好准备。为避免这种非常耗时的搜索程序，未来的增强旨在通过USIM中的文件来为UE提供先验知识，该文件包含上述星历信息。为了不与该USIM的典型存储大小(128 KB)冲突，这些星历信息只包含共用轨道面信息。

在第二阶段，UE所采集的第一个卫星或NTN小区的系统信息将提供更多信息，比如NTN gNB相对于轨道面的确切位置，用于补充星历信息。这一程序允许UE预估频率偏差（称为多普勒频移），用于载波频率预补偿，并允许UE预先计算或假设随机接入程序的预期RTT。

为了提供一定的灵活性并防止预测值准确性受损，可能需要更新存储在USIM中的星历信息。有效性定时器可以确定此类更新的频率，通常通过显式NAS信令来安排。

在NTN情况下，可以预先向UE提供额外的信令信息，以补充星历数据：

- ▶ 用于定义NTN工作频段的频率范围。与地面RAT中相邻小区的传统应用频率列表类似，NTN也为UE提供频率信息，以避免繁琐的初始接入程序。
- ▶ 与卫星星座相关的极化信息。这些信息非常有用，例如，圆极化方案LHCP或RHCP彼此正交，因此接收机应采用与发射机相同的极化方案。
- ▶ 最大RTT。超过该值即不允许UE在小区驻留，以控制网络的某些容量方面的问题，并避免UE接入距离很远的卫星。

### 3.10 5G NTN架构详述

除了卫星星座方面，要扩展5G系统以纳入非地面网络，需对现有5G系统架构进行调整。特别是对于无线接入网(RAN)，从地面基站到机载或星载卫星接入站会有明显变化，导致需要作出大量修正。下文将进一步详细解释RAN的这些扩展。除了RAN的修改和增强，3GPP进行的一项研究调查了对包括5GC在内的整个5G系统架构的影响[TR 23.737]。第3.10.1章介绍了支持引入NTN的5GC和系统架构组件。

从更高层面考虑，NTN架构需要从地面UE到卫星的无线接入，称为“服务链路”，其次卫星需要连接到地面网关，称为“馈线链路”。一般说来，为了稍作区分，将服务链路称为NR Uu接口，而将众所周知的5G RAT和馈线链路称为卫星无线接口(SRI)。

该SRI可以是5G NR波形，也可以是后续版本架构规范中的另一种专有或标准化波形。未来的部署考虑将30 GHz至300 GHz范围内的毫米波用于Gbps数据速率连接。除了大带宽和由此产生的高吞吐量之外，其优势还在于对云层和恶劣天气的适应性；仅在大雨时才会受到雨衰的影响。预计未来的网络还将实现自由空间光学 (FSO) 馈线链路，其频率超过190 THz，提供高达Tbps的数据速率和远至1000 km的距离。关键优势在于这些光频率不受国际法规管制，而主要劣势则在于传播方面。FSO链路不在云中传播。网关将进一步连接到回传和核心网功能，当然也会连接到应用程序服务。除了卫星和网关之间的直接馈线链路之外，还有可能使用星间链路 (ISL)。这在LEO星座中格外必要，因为卫星可能并非始终与陆基网关连接，在考虑卫星位于海上区域时尤其如此。此外，ISL还可用于移动性或切换场景控制等控制信息交换、用于流量管理目的以及用于与3GPP无关的卫星飞行控制。LEO或GEO等卫星星座具有已知或可预测的轨迹，这种优势有利于对与地面站的连接进行路由。低空或高空平台系统 (LAPS或HAPS) 等机载站可能不在预测的飞行路线上，因此需要对馈线链路的路由和转向进行一些控制。针对支持NTN的RAN部署，3GPP内部讨论了两种可能的架构选项：透明模式 (第3.10.2章) 和再生模式 (第3.10.3章)。Rel-17主要探讨透明模式架构。出于完整性起见，将用更多章节来深入研究用于回传连接支持的NTN方面、星间链路方面以及通过 NTN 连接进行的双连接 (DC) 功能扩展。

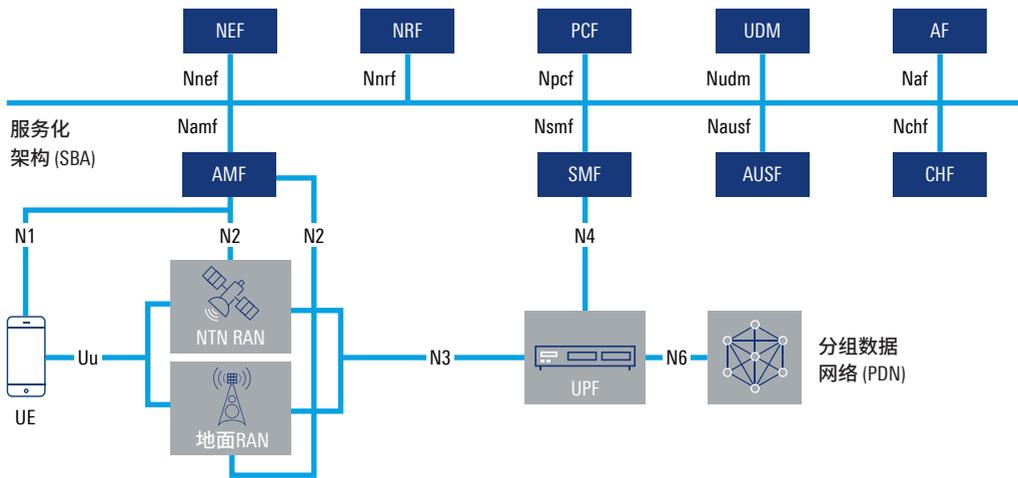
### 3.10.1 5G系统架构、核心网和服务化架构

2018年，3GPP启动了一项研究，调查当前的PLMN系统架构能否扩展以支持NTN连接，以及会产生哪些可能的影响。主要目标是尽可能重用功能和架构实体。作为重要的架构特性，5G系统放弃了演进的分组系统 (EPS) 点对点接口概念，引入了网络功能概念，其中系统实体或网络功能提供可由其他实体或功能检索的服务。只有部分接口重用了传统的点对点模型。不过，许多概念和系统功能与EPS中的概念和功能相似，例如控制面和用户面分离。[Ref. 11] 中对通用5G架构方面进行了恰当的概述。

基于 [TR 22.822] 中列出的用例和服务要求，3GPP架构组确定了主要的网络功能、这些功能的相互联系以及它们交换的信息。研究的一个主要环节是明确NR-NTN接入对5GC网络的潜在影响，即明确与地面NR相比在功能行为和接口方面的潜在差异。

具有主要网络功能的5GC参考架构如图21所示。

图21：支持NTN的系统架构



在5G系统架构中，一般认为引入NTN所致的主要影响出现在RAN中，其中可能采用支持透明或再生架构的架构模型。在上图中，我们对地面RAN和NTN RAN进行了逻辑拆分；它们可以作为共享RAN或并行运行，比如在双连接中的情形，也可单独运行，由不同或相同运营商进行编排。用户面连接性保持不变，因为用户面功能 (UPF) 向UE提供数据连接性。次要影响在于，UPF可能会与并行建立多个PDU连接的功能相互作用，并且在会话管理方面，UPF需要容许与NTN连接相关的长时间延迟。当数据传输通过用户面 (UP) 连接进行时，在失去地面覆盖、RAN通知或SMF信令决策的条件下，UE或网络可以通过另一个RAN激活另一个UP连接。

5G值得注意的一个方面是强大而复杂的服务质量 (QoS) 框架，其中定义了不同的QoS流，并引入特定协议 (SDAP) 来利用、维护和管理QoS功能。该框架保持不变，但有一些小幅增强，其中尤其重要的是通过定义额外的QoS服务等级，能够容许更大的端到端延迟，这一点在许多情况下可能超出现今标准化5G QoS等级所允许的范围。特别是在GEO星座的情况下，分组延迟预算导致在 [TS 23.501] 中引入5QI值10，其中延迟预算增加至1100 ms。

表8：5G NTN服务质量

参数	值
5QI值	10
资源类型	非保证比特率 (非 GBR)
默认优先级	90
分组延迟预算	1100 ms
分组错误率	10 <sup>-6</sup>
默认最大数据突发量	-
默认平均窗口	-
服务示例	视频服务 (缓冲流媒体)、基于TCP的服务 (例如万维网、电子邮件、聊天、FTP、P2P文件共享、渐进式视频) 及任何可通过卫星接入类型使用的具有这些特性的服务

为了支持与地面RAN中可能存在的QoS配置有所不同的各种QoS配置和QoS流，3GPP建议引入全新信息元素RAT类型，该类型是全局RAN节点ID中gNB ID的一部分。除了现有“NR”和“LTE”值外，建议增加“NR (LEO)”、“NR (MEO)”、“NR (GEO)”和“NR (OTHERSAT)”这些值。借助该RAT类型，核心网功能（例如AMF和SMF）可为给定的QoS 请求选择最合适的RAN。对现有概念可能有一项修正，要求策略控制功能 (PCF) 和应用功能 (AF) 就卫星接入或卫星回传的使用发送通知，告知服务部门RTT可能较长。URLLC等需要短延迟的服务可能会尽可能避免使用NTN连接。现今的3GPP系统具有差异化计费控制功能 (CHF) 和PCF功能，例如可以通过Wi-Fi等非3GPP RAT提供5G连接服务。目前正在讨论是否要扩展这种方法，以便区分地面NR和NTN，例如LEO或GEO，因为它们提供不同的服务配置文件。如前所述，建议引入新空口接入技术 (RAT) 类型值。这会让用于会话管理 (SMF)、PCF、CHF以及服务层（例如AF）的5GC网络功能知悉UE何时使用卫星接入 [Ref. 10]。

由于星基通信会造成较大时间延迟，需要扩展现有定时器来进行移动性和会话管理，以避免由于响应消息挂起而导致的连接超时；参见第5.5章。

主要扩展发生在接入和移动性管理功能 (AMF) 方面，原因是传统地面网络提供单一国家/地区内的覆盖，满足各自管理组织的法律方面的要求。基于卫星的通信系统不会在边界上停止覆盖，3GPP现正研究用于在跨国或国际海上信号覆盖内支持NTN的扩展。一项可能的扩展是将 RAN连接到位于不同国家/地区的几个AMF或5GC，这取决于UE在特定覆盖区域内的位置；另见第5.11章。网络资源库功能 (NRF) 允许动态地发现其他网络功能，因引入NTN而构建的扩展允许NRF协调选择正确的AMF以实现跨国NTN连接，或者NRF支持选择正确的服务管理功能 (SMF)。一般认为对安全和鉴权功能的影响较小，比如统一数据管理 (UDM) 和鉴权服务功能 (AUSF)；可能的扩展可为特定UE类型或USIM配置文件定义一些接入策略或禁止规则，以阻止或允许NTN连接。与网络开放功能 (NEF) 的行为类似，可将监测或调配功能等网络能力开放给外部应用，例如向外部应用程序发出通知，说明某UE已可用 [Ref. 11]。可能的影响是将会指示更长的超时时间。

[TR 23.737] 进一步详述了PLMN选择，特别是跨国覆盖的情形。举例来说，通过NTN RAN 建立连接时，AMF从UE执行位置请求程序，以保障UE位于允许的区域或国家/地区。

### 3.10.2 透明NTN NG-RAN架构

此架构也称为弯管方法，工作原理类似于空间中继器，简言之可以表述为“有起必有落”。透明架构的主要方面是将传统术语“基站”分解为卫星、地面网关和gNB功能这些组成部分。卫星功能在上行和下行两个方向实现射频滤波、频率转换、射频放大和射频收发。一项关键特性是波形或RAT按照不变的有效载荷在服务链路和馈线链路之间重复。

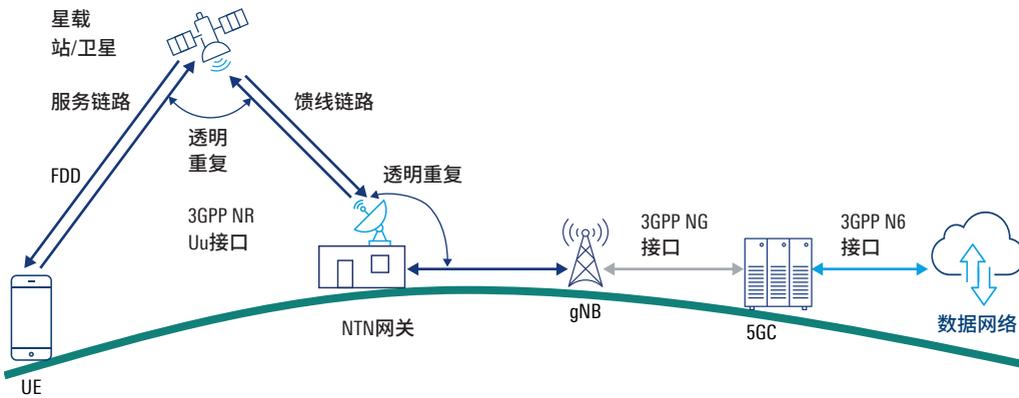
通过类比和简化，卫星站的功能对应于模拟射频中继器的概念。应用频率载波更改可能是为了避免服务链路和馈线链路之间的干扰，但这取决于制造商和运营商。文档 [TR 23.737] 将透明有效载荷的功能定义为从地球表面发射并由卫星接收天线转换成电信号的电磁波，该信号经过信道滤波并由低噪声放大器 (LNA) 放大，然后进行频率转换。

大功率放大器 (HPA) 最终将信号传递至发射天线，向接收网关所在的地球表面生成重构电磁波。透明架构的优点在于无线波形的独立性，因此其中任何修改均无需在星载站中做出更改。缺点包括由于卫星不执行信道均衡或噪声消除而导致噪声放大，架构易受干扰攻击，以及缺乏用于流量引导的ISL连接。

相对于协议锚点的5G NR空中接口 (Uu) 在地面gNB功能中终止。5G NR在网关功能方面没有明确的任务；可能采用具有波束赋形功能的抛物面天线或天线阵列，旨在对通往卫星站的馈线链路予以转向。无法部署大范围天线，因为会引起卫星之间的干扰。图22中描述的架构仅具有符号化意义，可能存在某些偏差。例如，可将网关和gNB纳入到同一硬件机柜中，或者将gNB功能提供给多颗卫星。唯一相反的情况是，卫星仅连接至单一gNB用于明确协议终止点。为避免误解，卫星可以连接到多个网关或gNB，但在这种情况下，会对有效载荷进行逻辑拆分。从UE角度出发可以提供更好的解释：通过单一网关或gNB对与5GC的特定UE数据连接进行路由。例外情况是多连接场景。

UE和地面gNB之间的连接至少包括服务链路和馈线链路，而在未来的扩展中，两者之间还可能纳入多个ISL。[TR 38.821] 指出，初始ISL实现需要再生有效载荷，因此ISL并未在图22中示出。

图22：透明NTN NG-RAN架构

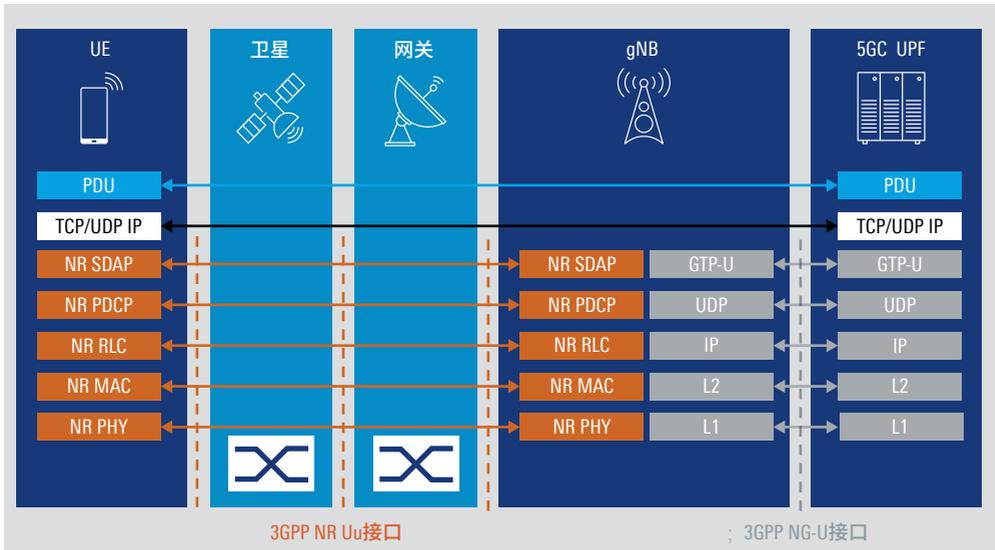


[TS 38.300] 更详细地定义了非地面RAN中的gNB架构，例如，gNB可以细分为非NTN基础设施gNB功能和NTN服务链路预配系统，我们用术语“卫星”来描述。基础设施模型的NTN部分进一步细分为NTN服务链路预配系统，即NR用户面和控制面以及NTN控制功能。

NTN服务链路预配系统可能包括一个或多个NTN有效载荷和NTN网关。引入术语“NTN有效载荷”是为了提供一些灵活性和未来可升级性；术语描述了星载（或机载）飞行器上的架构组件，这些组件为卫星（或HAPS）提供结构、功耗、指挥、遥测、姿态控制，还可能提供适合的热环境和辐射屏蔽。NTN控制功能用于控制空间飞行器以及NTN基础设施的无线资源。换言之，可以认为它是网络SMO功能的一部分。它向gNB的非NTN基础设施gNB功能提供控制数据，例如星历或其他飞行控制信息。随后向gNB提供NTN飞行控制数据，这已超出3GPP的范围，可能是特定供应商的功能。

关于5G NR协议架构，地面RAT层模型与NTN并无太大不同。唯一的区别是协议层模型中附加的中间实体卫星和地面网关，它们对数据流保持透明。如前所述，在透明架构下，无线接口在地面gNB内终止。这是关于延迟或RTT方面的一个重要主题，因为单向延迟包括服务链路和馈线链路。与5G NR一样，使用IP传输层的用户面协议在端到端（E2E）实体UE和5G用户面功能（UPF）中终止。可以应用专有映射程序，将SRI或网关上的5G无线接口映射到gNB传输接口，以实现隧道和传输服务。用户面透明协议架构结构如下图所示。

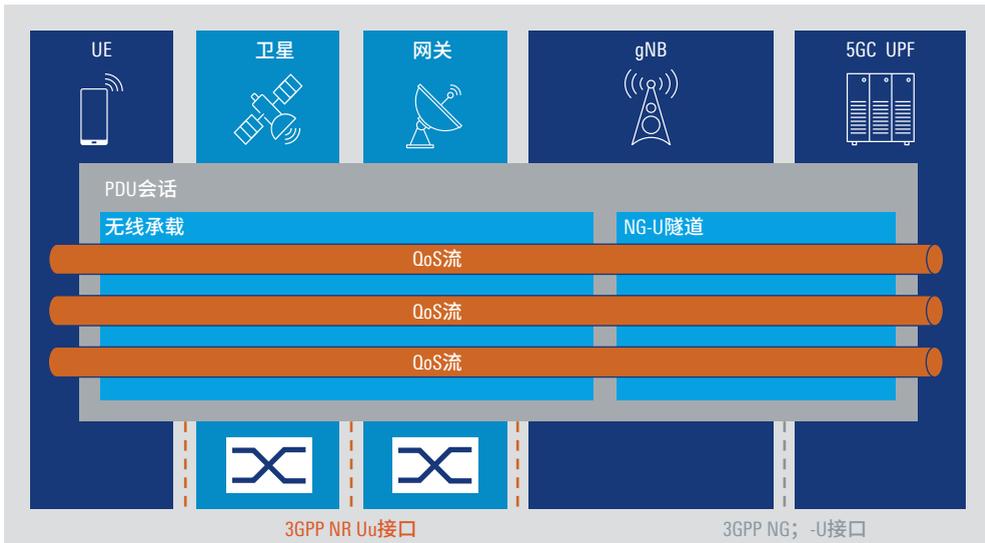
**图23：透明NTN NG-RAN协议架构 – 用户面**



控制面协议结构具有类似的模型：RRC协议层通过卫星和网关在UE和地面gNB之间进行隧道，NAS控制消息在AMF或SMF等5G核心网功能中终止 [TR 38.821]。

与5G NR一样，5G NTN也增强和利用了QoS方面的优势。继承特定QoS配置的连接称为QoS流，终止于两个端点UE和UPF，从而提供E2E QoS管理，以带来灵活、敏捷、动态的服务。5G系统中的已知网络切片或QoS管理处理等方面不会因为NTN的集成而改变。对现有QoS配置进行修改，以适应更长的RTT。gNB需要将QoS流映射到包括NTN链路在内的相关无线承载上，并在无线承载的QoS流与核心网连接的相应NG-U隧道之间进行转换。

图24：透明NTN NG-RAN架构 – QoS和承载模型



简言之，透明有效载荷架构不会要求对现有5G NG-RAN架构模型进行大幅修改。需要进行若干更改，特别是一些物理层定时器，以适应馈线链路和服务链路的长延迟。有关这些挑战以及如何应对这些挑战的信息，请参见后续章节。

### 3.10.3 再生NTN NG-RAN架构

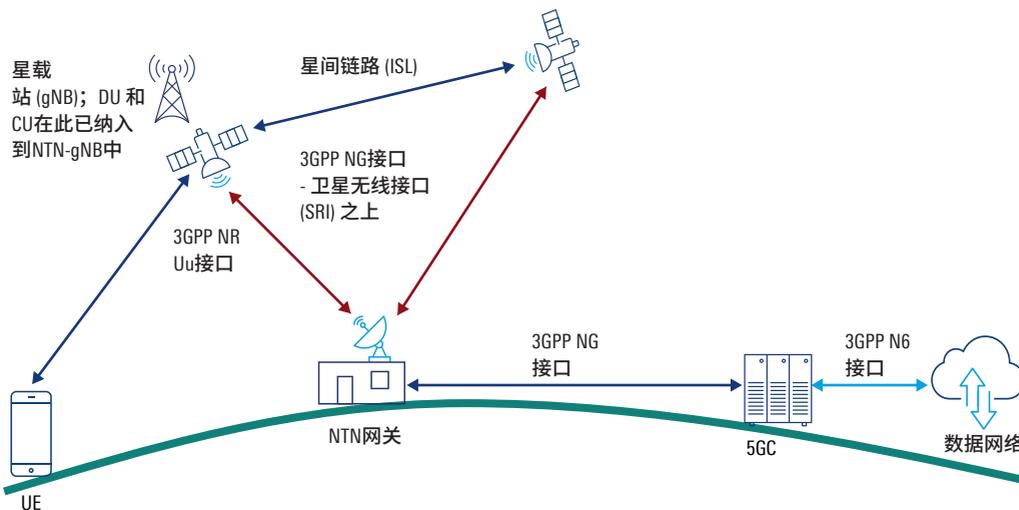
再生架构涉及卫星、网关和gNB三大组件，也允许适当组合。与透明有效载荷架构的主要区别在于将gNB功能纳入到卫星中。再生架构模型会增加卫星硬件和计算功能的复杂性，3GPP 内部在Rel-17中以较低优先级探讨了这种架构，预计也会在后续版本中沿用。可以有选择地对gNB功能进行分解，将其进一步划分为分布式单元 (DU) 和集中式单元 (CU)。再生有效载荷架构支持两种架构模型：卫星节点可以直接合并DU和CU，通过到网关的馈线链路与5G核心网 (5GC) 直接连接；卫星也可以仅包含gNB的DU功能，因而到地面网关的馈线链路通过SRI承载F1接口，CU则基于地面。文档 [TR 23.737] 将再生有效载荷功能定义为在LNA和HPA之间插入内置处理器 (OBP) 的实现方式。OBP支持在上行和下行之间转换空中接口。可以纠正比特错误或分组错误以避免重传，或者在波束之间路由分组。得益于OBP（包括gNB CU或DU，或附加到5GC的任何功能），最终能够实现各项网络功能，但会牺牲功耗和质量。

再生架构的一个优点是减少了延迟，因为Uu接口终止于包含整个NTN gNB功能的卫星，故而单向延迟仅包括服务链路。缓冲区管理、链路控制或重传需要在再生模式卫星中实现，这增加了上述实现的复杂性。

另一个优点是可以在卫星之间部署具有多个ISL连接的NTN，特别是只有少数LEO卫星可以接入网关的LEO星座群。DU和可能的CU功能在卫星中的实现赋予它们更好的自主性，不过要以更高的复杂性为代价。复杂的ISL流量引导方法利用泛在信号覆盖，并且可在未来部署中进行智能高效的流量管理。为简单起见，图25并未示出其中CU基于地面的gNB DU有效载荷处理情况。作为优先事项，[TR 38.821] 要求对可选ISL部署使用再生有效载荷。

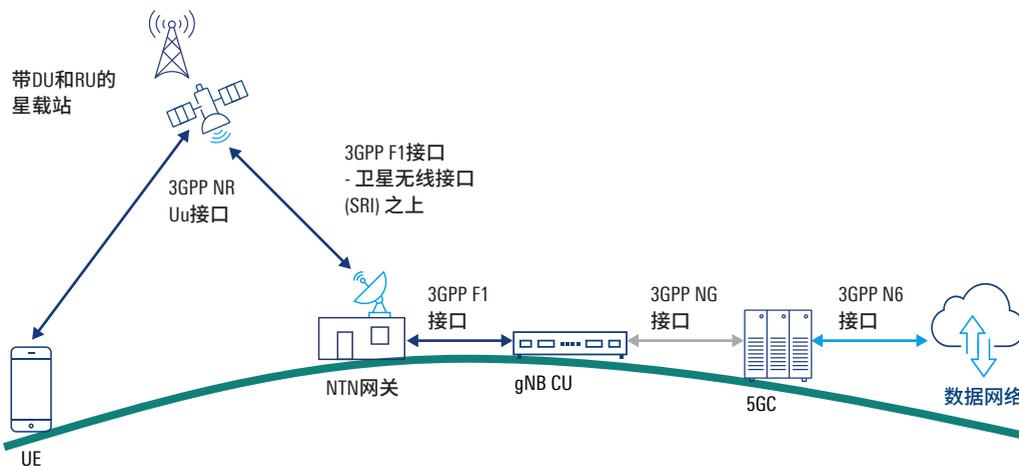
最后是第三个优点，我们想指出，通过再生架构可以实现服务链路和馈线链路之间的独立性，能够支持以甚高吞吐量使用毫米波或FSO馈线链路。

**图25：再生NG-RAN架构（卫星中的DU和CU）**



为完整起见，下图描述了再生架构，其中只有gNB DU功能在卫星中实现，而gNB CU仍基于地面。本文将不再进一步探讨此架构。更多详细信息请参阅3GPP文档，例如 [TR 38.821]。

**图26：再生NG-RAN架构（地面上的CU）**



再生架构可以提供更好的延迟管理，但其缺点是需要指定SRI链路。它是网关和卫星之间的传输链路，可在DU和CU之间承载F1接口，或在gNB和5GC之间承载NR-U接口。由于F1和NG-U接口均为3GPP架构中的中程或回传连接，通常使用以太网或光纤等电缆连接，有必要对能够通过卫星将数据传输到地面接口的无线链路进行标准化。随着5G引入网络功能虚拟化概念，未来可能会出现一颗卫星中包含多个gNB的部署方式。

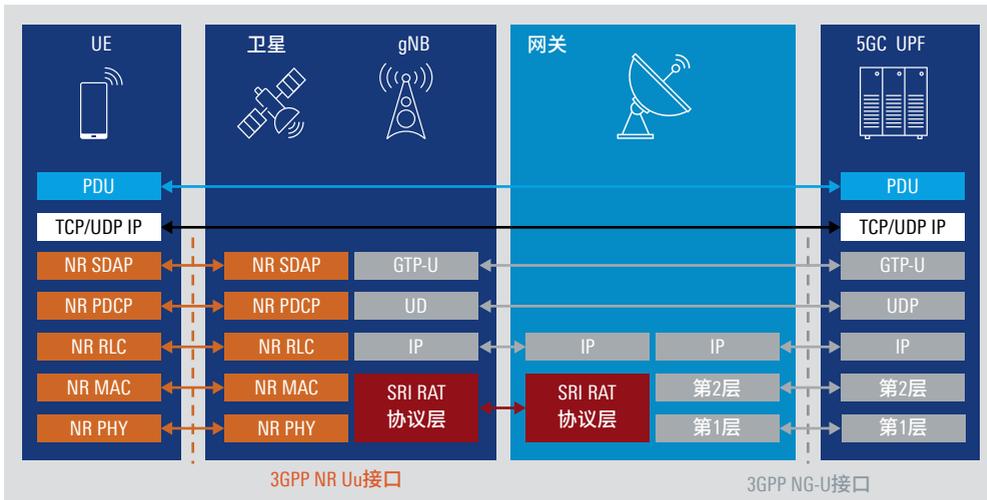
这种再生有效载荷选项被考虑用于3GPP Rel-18及后续版本的标准化，提供三种可能的设计选项 [Ref. 12]:

- ▶ 内置完整gNB
- ▶ 地面部署gNB-CU、卫星部署gNB-DU，这种选项需要应对F1接口处理方面的挑战
- ▶ gNB位于地面，应用类似于O-RAN的架构，其中低层分离 (LLS) 用于连接DU和RU。无线单元 (RU) 位于卫星上，这种选项需要应对3GPP中未标准化前传接口（例如O-RAN联盟提案）方面的挑战

在协议层架构中，我们可以观察到Uu接口终止于包含所有NTN gNB功能的卫星，并且存在 SRI链路，用于通过网关将用户面和控制面数据从再生模式卫星传输到5GC。为实现透明的用户面数据传输，用户PDU在包含所有gNB功能的卫星和5GC之间的隧道程序中通过GTP-U协议传输。

控制面的架构与用户面类似。RRC在卫星gNB功能中终止，我们在此也假定RRC特定无线链路控制流程的反应时间更短，不过代价是卫星本身需要更高的计算能力。在替代分解架构中，卫星承载DU功能而CU仍在地面，RRC协议层等控制面也在地面终止，因此普遍存在像透明架构中那样的长延迟。为了在gNB和5GC功能AMF或SMF之间传输NAS消息，NG-AP协议通过网关和SRI链路在两者之间建立隧道。

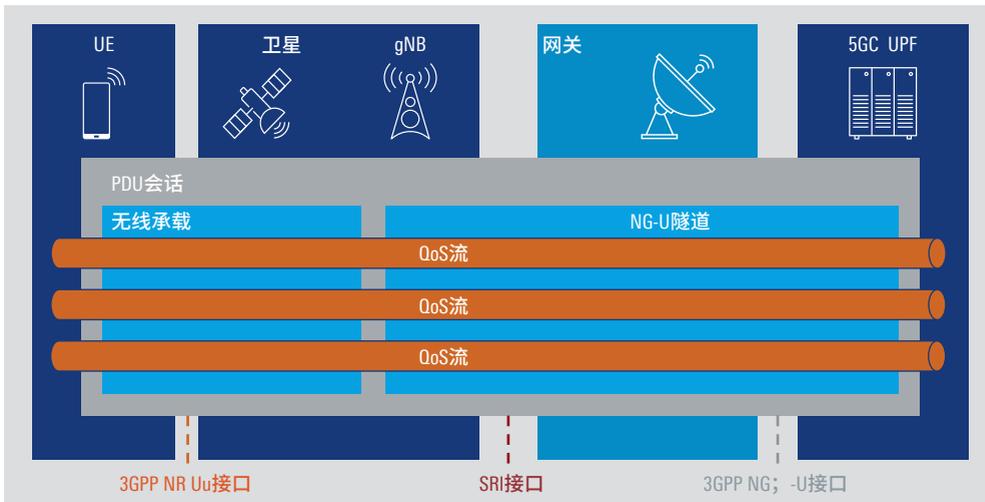
**图27：再生NG-RAN架构 – 用户面协议栈**



与透明有效载荷架构类似，再生有效载荷也增强了QoS支持，并利用具有特定配置的各种 QoS流。不同之处是无线承载在星基gNB中终止，并且从卫星gNB到5GC UPF的NG-U隧道“更长”。缺点在于NG-U接口包括新SRI链路，并在QoS管理方面进行了一些调整，在这种未来的部署中可能需要SRI之上的网络切片。

尤其重要的是应谨记在这种架构中，NG-U接口包括网关和卫星之间的NTN馈线链路，因此预计会有更长的延迟，并需要相应调整定时器和计数器。

图28：再生NG-RAN架构 – 承载和QoS流方面



我们对再生架构的说明侧重于gNB处理，包括CU和DU功能。如需详细了解仅DU功能基于卫星而CU位于地面的分解架构，请参阅 [TR 38.821]。

### 3.10.4 NTN回传和IAB

本小节侧重于完成方面，将描述基于卫星的回传的可能性，以及结合NTN来应用集成接入回传 (IAB) 方法的选择。这两种方法都未被3GPP列为最高优先级，例如IAB卫星过量目前已在Rel-17中排除。在回传概念中，地面基站或gNB通过星基连接与5GC相连，或者未来部署支持通过HAPS网关的蜂窝回传 (CBH) [Ref. 23]。这不会直接要求更新当前RAT，现有NG接口将通过卫星来路由，即地面RAN通过卫星上的N1、N2和N3接口连接到5GC功能AMF、SMF和UMF。进行部署时，需要考虑RTT增加以及相邻小区潜在缺失等方面，这些问题可能导致小区边缘无线链路中断。与5G NTN相比优势在于，地面gNB相对于卫星具有固定位置，并可采用诸如通过TX时间提前量进行RTT预补偿等方法，还可应用具有高增益的高度定向天线。为简明起见，我们将不会进一步深入探讨NTN回传基础设施。

回传的一项特定子功能为术语“中继”，对应于向聚合节点而不仅仅是单个小区提供基于卫星的高吞吐量。

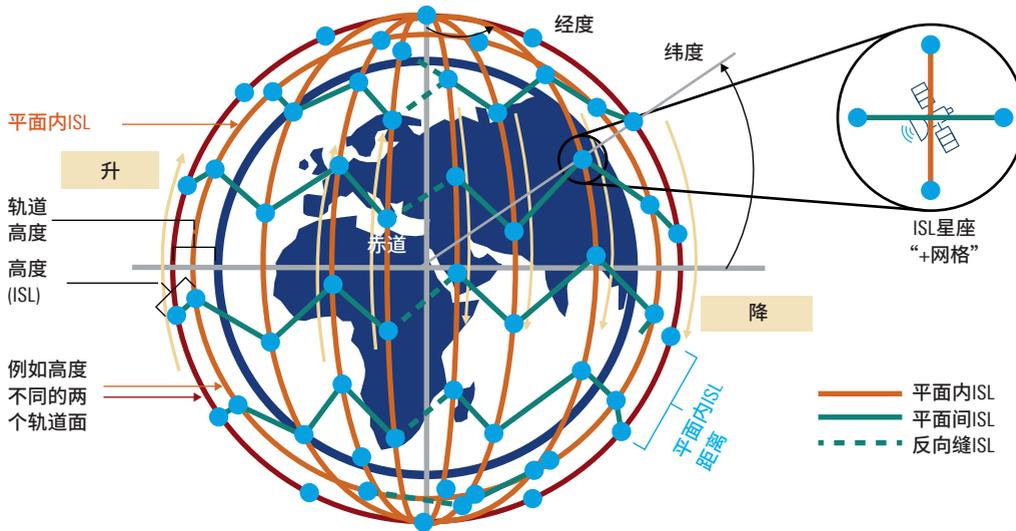
NTN的未来部署不仅包括额外的空中和空中平台，还将结合使用集成接入回传 (IAB) 方法以及NTN的相应方法来动态部署更多小区。因此，IAB节点可以通过基于卫星的5G NR连接到其地面施主小区。这种架构的优点是能够灵活快速地部署用于提供地面覆盖的5G网络。相应的用例是公共保护和救灾 (PPDR)，其目标是在自然灾害发生后以非常快速的部署流程恢复并提供地面通信。研究将IAB节点视为飞行器，即通过NTN链路连接到IAB施主小区的UAV。由于这需要额外的复杂性，比如链路的路由、容量管理和这些IAB节点的动态处理，3GPP会在未来版本中考虑这些IAB NTN。

请注意，应用NTN回传连接的机会不构成垄断情况。我们还可以考虑NTN回传为RAN地面NG接口连接提供补充的情况，例如应用流量管理方法。

### 3.10.5 星间链路 (ISL)

ISL是卫星之间的传输链路，旨在传输高速数据并有选择地控制遥测和遥控 (TM-TC) 等有关卫星导航和飞行控制的信息。ISL可以是基于射频的WLAN（射频星间链路，即RF-ISL），例如IEEE 802.11n [Ref. 6]，也可以是基于光频率层的接口，例如激光（光学星间链路，即O-ISL）[Ref. 8]。本文中提及ISL的技术方面仅出于完整性起见，ISL技术的定义可以基于3GPP或非3GPP。NTN的技术演进将需要对所应用的ISL技术进行调整和修正。NTN透明架构需要使用ISL来进行卫星之间的用户数据传输，可能将用户数据转发到与地面站连接的卫星。因此，ISL在整个卫星星座中扮演不可或缺的角色，因为泛在覆盖还需要与地面站和5GC连接，这并非所有轨道星座点都能实现。在技术层面，这种地对星链路可用的情况称为卫星过顶。ISL可以有选择地携带TM-TC等附加控制信息，例如防撞机动控制。显然，在考虑卫星星座内部的整体系统容量时，ISL是一项重要的设计因素，未来的NTN不仅将ISL用于地面服务预配，还将其用于容量和负载平衡。详细说来，这种ISL可能是LEO卫星和静止GEO卫星之间的链路，也可能位于不同的LEO卫星之间，而且根据轨道星座和卫星速度的不同，这种ISL可能具有间歇性和波动性。可将其进一步区分为描述同一轨道面上卫星的平面内ISL和描述不同轨道面上卫星的平面间ISL。此外，卫星之间的ISL还可能沿着几乎相反的方向移动，术语“反向缝ISL”适用于这种情况。卫星星座（包括其ISL连接）可以在各种拓扑中调准。比较著名的示例是Walker Star LEO星座，其中一颗卫星具有“+网格”ISL结构。与“+”号字符对应，该卫星连接到同一轨道前后的卫星以及相邻卫星；参见图29。有关此类ISL星座和相应射频方面的进一步详细介绍，请参阅 [Ref. 31]。

图29: LEO卫星星座及ISL (Walker Star星座)



未来的技术扩展（如NTN再生模式）或全有机节点（纳入MEC和核心网功能）可能需要5GC 接口协议栈的传输能力，例如ISL上的F1或N2或N3接口。

基于射频方法实现ISL有其特定的优点，但也存在缺点。积极的一面是，与馈线链路和服务链路相比，用于RF-ISL的硬件实体具有共同的特性 – 三者均基于射频，频率范围也多半相近，因而可以重用某些射频组件。射频传播特性不要求TX和RX实体之间存在非常严格的定向传输或指向性，但更分散的RF连接可能会对其他RF-ISL连接造成干扰。RF-ISL不可改变的弊端是需要频率协调：ITU在WRC19报告中描述了ISL的某些频率范围，例如22 GHz至24.75 GHz、27 GHz至27.5 GHz或66 GHz至81 GHz [Ref. 7]。

光学ISL (O-ISL) 则不需要频谱协调，基于激光的光学链路不太容易受到干扰，而且更宽的光学链路带宽大概率支持更高的数据速率。其主要缺点是由于波束发散角偏窄，需要采用严密的捕获、跟踪和指向 (ATP) 系统 [Ref. 8]。大气和太阳条件为O-ISL系统设计师带来更多公认的挑战。不可预测的大气条件会降低链路的性能。影响O-ISL链路质量的另一个因素是太阳光相对于基于激光的发射机和接收机的冲击力，这会造成太阳背景光辐射，进而对系统性能产生负面影响。未来的NTN星座将向所谓的巨型星座发展，纳入数千颗LEO卫星。因此，预计ISL连接的邻域关系需要频繁调整，这也会导致动态ISL连接发生交换或切换，以及建立和释放ISL连接。此外，卫星之间的运动还会导致ISL多普勒频移。鉴于所要求的ATP精度，初始ISL连接设置需要一定的时间。目前估计最长可达50秒，重新建立现有ISL连接可能还需要20秒。但是，ISL连接将为软件定义网络、智能路由和此类巨型星座中的资源分配奠定基础。

### 3.10.6 地面与非地面网络之间的互通及多连接方面

通过添加NTN作为附加RAT，可以扩展不同RAT之间的互通和5G系统内的多连接方面，从而允许在同步或非同步程序或某些移动性场景对多个链路进行多种理论上的组合。在第一种方法中，我们希望考虑地面和NTN连接之间的互通方面。关于所提供的用例和服务，主要侧重点为服务连续性，因此3GPP要求保持地面和NTN之间的服务连续性。这可以通过移动性场景（例如异系统无线接入技术切换）或通过双连接场景来实现。请注意，对于5G系统有两种可能的模式：非独立组网 (NSA) 模式（LTE和5G NR之间互通）及5G NR独立组网 (SA) 模式。3GPP决定不考虑支持NTN的NSA，因此基于NSA的方面（例如NTN gNB和地面eNB之间的Xn移动性、MR-DC、二级RAT数据量报告、轨迹等）目前在3GPP Rel-17活动中被列为低优先级 [Ref. 12]。未来的部署预计将在NTN和地面之间过渡，并预计将在LTE和5G NTN之间进行交互。

在第一阶段部署中，NTN和地面网络之间的互通遵循空闲和连接模式下UE移动性的现有程序。

在频谱使用方面（参见第3.2章），要在同一地理区域FR1范围内的同一频率上以共存模式运行地面和非地面网络，即使并非不可能实现，也是颇具挑战性的任务。这需要监管和协调，可能要由区域或国家/地区一级的监管机构来决定是否应使用特定的频谱频段以及用于何种目的。必须进行跨境协调，因为使用卫星的NTN覆盖了分布在不同国家的多个地区。对于FR2来说，有可能在某些限制下实现共存，因为FR2的传播受到较高路径损耗的影响，而得益于波束成形技术，可以实现区域性分布和限制。不过这些会在3GPP中进一步研究。即使在技术上可行，相邻服务的同信道或共存也应由区域监管机构加以管理和规范。

对UE有效的小区选择和重选规则与当前5G系统相比保持不变，但为了使地面和NTN小区在同一频段中部署，或使不同星座（例如GEO和LEO）在同一频段中部署，3GPP考虑引入新的系统信息参数“网络类型指示”。除了PLMN和小区ID或频率列表等现有术语之外，这种参数也能在小区选择/重选过程中为UE提供帮助。

多连接原则上是NTN和地面之间的一种NSA操作，例如运行一条与NTN的连接，以及另一条与地面的分支连接。这种情况目前并未从标准中排除，但可能构成潜在的挑战。在NTN gNB和地面gNB之间运行Xn连接本身就非常具有挑战性，因为存在UP流控制和其他因素等诸多限制。即使3GPP已决定在Rel-17的首次发布中不包括NTN双连接，未来的升级也令人期待 [Ref. 12]，本章将进一步深入探讨这种多连接操作的一些细节。仅出于完整性起见，在我们对多连接的理解中，将不包括占用两个UE并支持双注册的设备。这种多UE设备在UE用例中视为单一UE，但不会排除这种设备类型的网络接入。

就应用场景而言，我们对NR-NTN和IoT-NTN进行了区分，因为这可能对多连接的实现产生影响。对于NR-NTN，同时使用两种RAT是多连接的主要关注点，而在IoT-NTN情况下，通常认为UE支持两种RAT，但由于复杂性和节电的原因，不能同时运行。

为简明起见，我们将不在本白皮书中进一步讨论IoT-NTN多连接，因为这种情况不太可能实现。对于NR-NTN多连接，可能存在两种场景：

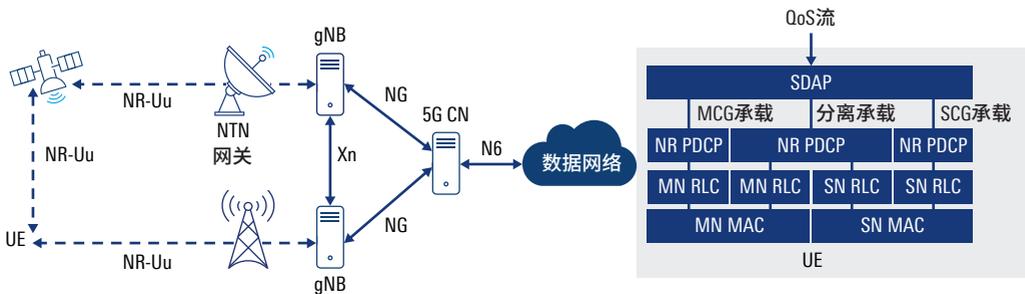
- ▶ 一条NR-NTN接入链路与一条基于地面的NR接入链路之间的多连接
- ▶ 两条NR-NTN接入链路之间的多连接

这类多连接场景中的NR-NTN不对透明和再生有效载荷加以区分。两种架构模型均可用，但要注意透明模式优先。

同时运行这类多连接设置的动机是可以获得更高的数据速率，特别是当考虑到地面接入服务不足的小区边缘的情况，以及在连接时间内以同质程序提供数据速率时。例如，不妨想象一列火车穿过地面RAT良好和服务不足区域时的情形。

关于这种双连接情况下的5G承载概念，包括MCG、SCG或分离承载，并未发生明显变化 [Ref. 1]。唯一的区别是，伴随承载在NTN链路上移动的QoS参数需要进行相应的调整，以应对长延迟、缓冲区管理和频率漂移等挑战。

**图30：NR-NTN与地面5G NR之间的多连接及承载模型**



在此背景下，多连接可定义为5GC对给定UE同时建立多个会话的能力，所有这类会话都在前向和/或返回方向上利用不同接入网（地面和卫星）的特性（如信号覆盖、广播能力）。[TR 23.737] 通过区分GEO和NGSO接入以及潜在的地面接入，扩展了图30所示的视图。因此，多连接涉及地面、GEO和NGSO这三种RAN的特定组合。

NTN有几种部署选项，首先会提出由谁来运营这类NTN星座的简单问题。可以是具有地面 PLMN的传统移动网络运营商 (MNO)，他们通过添加NTN组件并提供共享网络运营服务来扩大其业务，也可以是特别关注NTN的新参与者，称为卫星网络运营商。对于后者的情况，NTN可以在一种漫游场景中运行。地面和NTN之间关于运营商部署的流动性和互通程序由现有PLMN选择策略进行定义，比如正像我们今天从漫游场景中了解的那样，对UE内的优选受访PLMN (VPLMN) 进行配置。

例如，共享NTN可以应用在地面网络中已可实现的等效本地PLMN设置的配置细节 [TS 23.122]。如前所述，关于UE能力的假设是UE拥有GNSS的功能。有关UE位置的知识也可用于限制PLMN选择过程。例如，我们假设UE和AMF双方都知道UE的位置是A国，并由此得到逻辑可用的可能的PLMN列表，且AMF可以通过NAS注册许可或拒绝信令来影响正确的 PLMN选择。研究 [TR 23.737] 提出一种针对特定国家/地区或区域的PLMN选择，以解决这种跨境覆盖所导致的复杂性增加问题。与紧急呼叫、合法拦截、收费和计费以及公共警告通知有关的问题可以通过这种基于区域的PLMN选择协议进行控制和管理；详见 [TR 23.737]。这适用于直接卫星网络覆盖或NTN仅用于地面RAN回传的情况。[TR 23.737]、[TS 23.501] 和 [Ref. 12] 中提供了此类网络间协调、服务等级协议、紧急呼叫处理、合法拦截和漫游场景等其他方面。为简明起见，我们将不会进一步深入探讨这些部署场景。

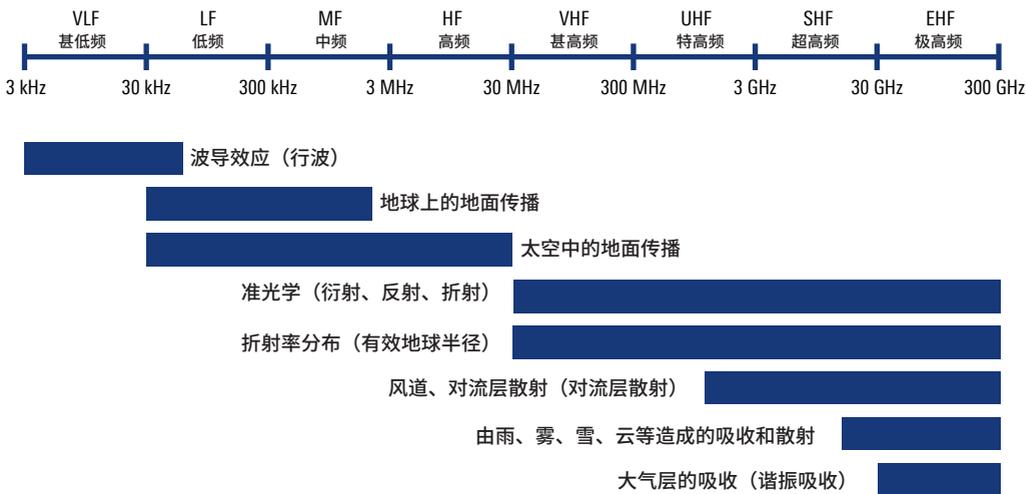
# 4 NTN射频和挑战

5G系统最初是为地面网络设计，用于表述传统公共陆地移动网络 (PLMN)，从Rel-17开始将加入增强功能，使5G NR也能支持非地面网络通信。显而易见，NTN使用不同频率范围进行无线通信。本章探讨射频传播及其带来的挑战，重点讨论NTN传播，与地面传播条件下我们所熟知的信道模型或衰落分布进行对比。首先，我们将基于Rel-15期间进行的3GPP研究 [TR 38.811]，介绍考虑NTN时一些信道模型和传播细节。由于NTN本身的性质，我们还面临其他挑战，本章也将详述这些挑战。地面UE和卫星之间距离遥远，因而会影响链路预算或造成高路径损耗。此外，这种超远距离也是造成较大时间延迟 (RTT) 的原因，该值因时间和仰角而异。相较于地面网络（我们使用“基站”一词来表示其静止性质），这是一种范式变化，LEO卫星以一定的速度运行，由此将导致频率载波偏差，也称多普勒频移。最后，电离层的无线电波传播会造成波形极化旋转，学术界称之为法拉第旋转。

## 4.1 NTN信道模型

本节主题为NTN信道模型，我们首先给出无线电波传播的快速提示，将特别说明由ITU采用一般传播特性与载频对照方法提出的表述。该观点考虑了电缆传播或波导传播的波、地球上的地面传播，比如我们熟悉的多径传播 (MPP) 以及大气等因素。

图31：主要传播特性与频率



无线信道的劣化类型包括通常称为干扰的已知影响，即小区间、小区内、相邻或共用信道以及带外无用发射所造成的干扰。为简明起见，我们将不会进一步深入探讨这些干扰。从更高层面来看，衰落分为大尺度衰落和小尺度衰落。大尺度衰落也即对数正态衰落或阴影，主要取决于TX和RX之间会导致衰减 (FSPL) 的距离以及两者之间的无线电波传播。小尺度衰落受到多径传播情况和载频多普勒频移的影响。它取决于信号带宽、相对速度以及散射和反射环境。考虑NTN链路，我们将其区分为受遮挡传播或无遮挡传播。

无遮挡链路考虑的是不体现散射环境的散射分布中的视距 (LOS) 优势。就频率而言，假设使用具有定向天线阵列的VSAT型UE，则优选在载频超过10 GHz时提供无遮挡链路。受遮挡链路考虑的是非LOS室外情况和来自UE附近散射体的影响。请注意，NTN主要用于室外连接。描述传播分布时将使用长期信道效应和动态信道效应。为了简化信道传播抑制和建模，引入了相关区域的概念。这种相关区域是指假定具有相似衰落特性的“区域”，并已简化为在这种相关区域内所有UE都会经历类似的到NTN gNB的传播。

### 无遮挡链路传播细节

长期信道效应（一阶统计量）：

- ▶ 降水（雨、雪、冰雹等）引起的衰减
- ▶ 气体吸收（氧气、蒸气等）
- ▶ 云雾衰减（ITU 的液态水模型）
- ▶ 对流层闪烁（快速衰减、折射率变化）
- ▶ 信号去极化（法拉第旋转）
- ▶ 天空噪声增加（先前的影响可能导致噪声增加）
- ▶ 总衰减（例如自由空间路径损耗）

动态信道效应：

- ▶ 降雨衰落导致的AWGN动态变化
- ▶ 二阶统计量的统计模型，如衰落斜率、衰落持续时间

受遮挡链路不一定考虑散射分布中具有较高优势度的LOS甚至非LOS。就频率而言，优选在载频低于6 GHz时提供受遮挡链路。

### 受遮挡链路传播细节

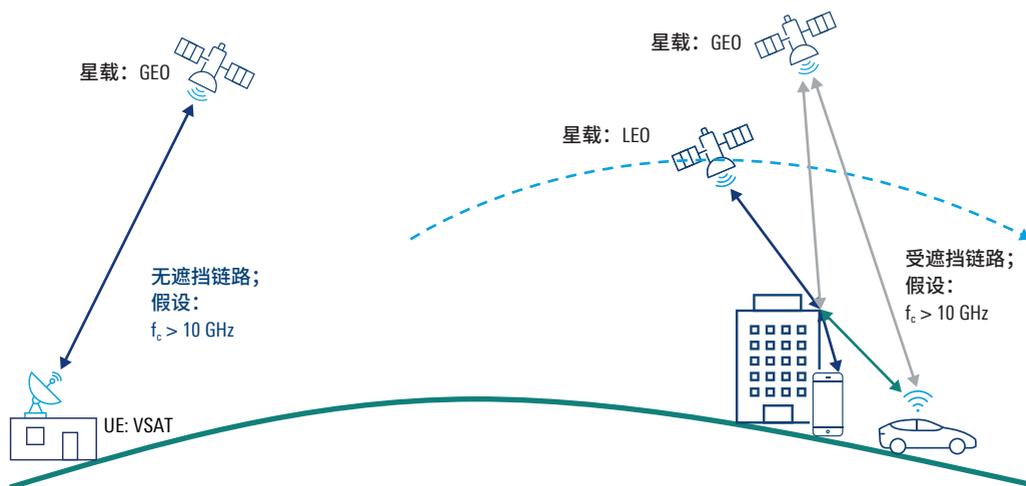
具有两个主要信号分量的长期信道影响（一阶统计量）：

- ▶ 直接信号，最可能为LOS信号
- ▶ UE附近的漫射多径或NLOS散射体

动态信道效应：

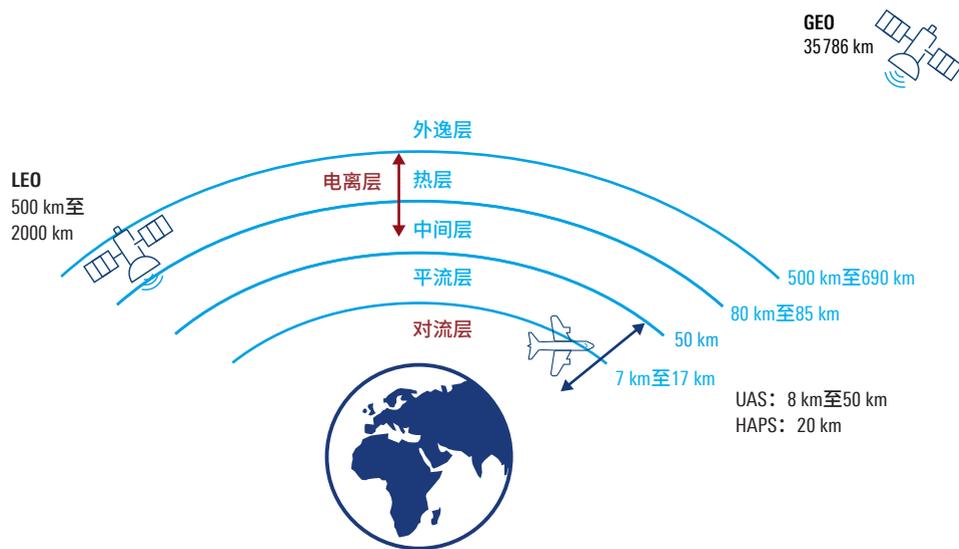
- ▶ 信号的时间色散，窄带 – 宽带
- ▶ 信号变化率：非常慢、缓慢和快速（城区、郊区、乡村、山区、海上等）
- ▶ LEO的移动：统计分布组合，无恒定统计信道模型
- ▶ 多普勒频移

图32: 受遮挡和无遮挡的NTN链路场景



GEO或LEO无线传播还受到大气效应的影响。因此，衰落模型也需要考虑大气因素。

图33: 衰落仿真总体概览：大气影响



在其研究项目 [TR 38.811] 中，3GPP考虑了基于这两项ITU建议的信道模型：

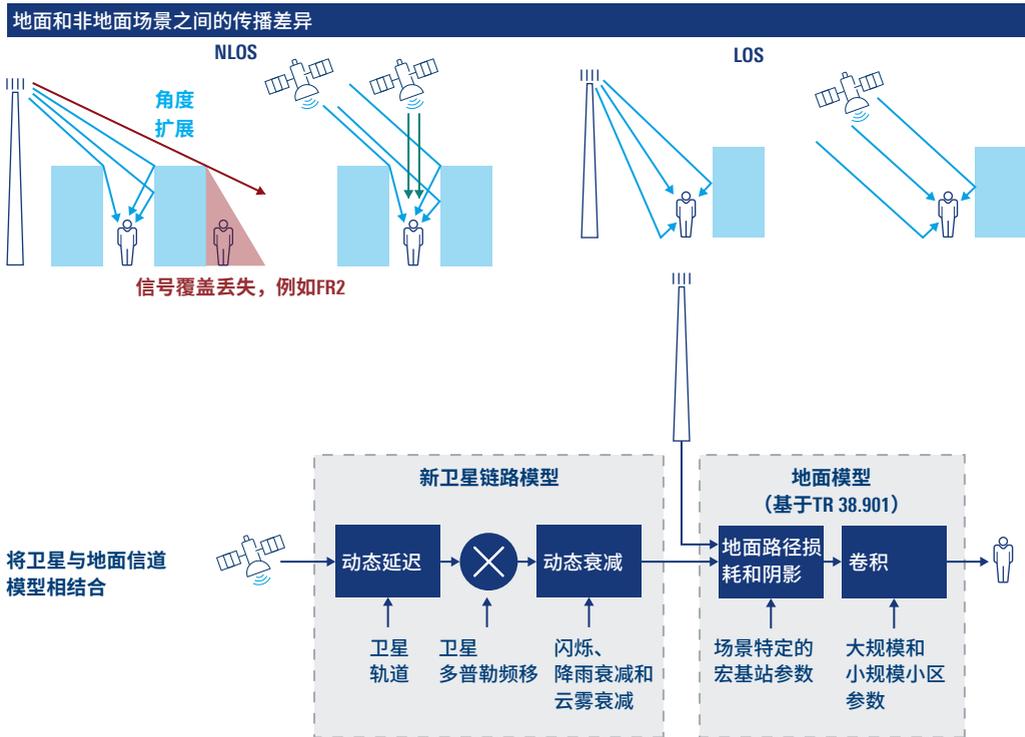
- ▶ ITU-R P.681，其中定义了最高测量频率为20 GHz的陆地移动卫星信道
- ▶ ITU-R P.618，其中描述了气体衰减、闪烁、降雨衰减和云雾衰减等大气效应。

### 地面和NTN信道建模之间的差异

地面信道建模与NTN之间存在一些细微差异，例如，NTN主要假设LOS场景及附近物体产生的MPP。另外，也有可能出现NLOS情况。卫星看到的角度扩展几乎为零，而在地面场景中，则覆盖了一定的角度范围，如图34左侧所示。可见主要差异在于除了附近的散射，卫星信号的传播大体趋同。

我们的想法是采用将地面衰落模型 [TR 38.901] 与卫星信道相结合的混合概念架构，如图34 下半部分所示。

图34：结合两种模型来看地面和NTN的衰落差异



推动3GPP研究项目 [TR 38.811] 的主要目的是基于现有传统地面信道模型开发NTN信道模型。研究调查了侧重于NTN部署场景（包括城区、郊区和乡村）的信道模型。

在典型地面传播场景中，多径传播 (MPP) 是我们熟知的典型现象，信道模型适用于城区、密集城区、乡村或丘陵地形等场景。即使是高速列车等移动场景，也有其适用的特定信道模型。对于卫星，信道传播的主导因素则是TX和RX之间造成高衰减的长距离。同时如图34所示，长距离会导致一种平面波传播，不同路径几乎平行，因此角度扩展接近于零。因此，大尺度参数（视距概率、角度扩展、延迟扩散等）与地面情况不同，并且取决于服务卫星的仰角 [Ref. 10]。

就路径损耗而言，这主要受到自由空间路径损耗 (FSPL) 分量的影响，而另外还有附近环境的影响，比如建筑物、山丘、树叶等，由此产生的分量可能导致杂波损耗和阴影衰落。与地面传播相比，在NTN中，我们会遇到另一个有关衰减的影响参数。路径损耗在数学上可以描述为仰角的函数。第4.2章和 [Ref. 10] 提供了更多详细信息。该仰角在未来的信道模型中也将发挥重要作用，这些模型假设将HAPS或UAV而非更高海拔卫星作为机载gNB，因为仰角在后者情况下将有很大不同。从UE角度看，卫星/HAPS的LOS路径与地面地平线的仰角将是这类信道模型中最相关的参数。

信道模型还包括考虑大气气体吸收以及电离层和对流层闪烁损耗的参数。这些损耗可能仅在低仰角和/或某些其他条件下（例如在低纬度地区、处于太阳高峰期等）才有意义。这些模型讨论了闪烁损耗的动态特性、仰角及其与各项参数的依赖关系，指出结果将导致整个路径损耗发生一定的抖动。

[TR 38.811] 中介绍的研究开发了两种快速衰落模型。更为通用的频率选择性模型基于地面模型，但根据卫星的几何结构进行调整，延迟和到达角具有不同的值和相关性。与杂波损失和阴影衰落类似，在表格中列出了不同仰角以及频率范围FR1和FR2的值。另外，假定平坦衰落的更简单的二态模型可用于研究某些情况（例如低频、大仰角和近视距）[Ref. 10]。对于这种平坦衰落条件，通常认为链路级仿真的信道模型不具必要性 [TR 38.811]。

为实现传播和衰落效应仿真，3GPP另外开发了用于NTN链路级仿真的群集延迟线 (CDL) 和抽头延迟线 (TDL)（如下所述）。关于覆盖方面，源于LEO或GEO卫星星座的另一个主题对垂直和水平覆盖加以区分。我们假定基于地面的天线发射的波平行于地面传播，无线传播受到建筑物、树叶和非平坦表面的阴影效应的影响，导致当前RAT中存在已知覆盖盲区。将GEO卫星建模为一种垂直位置，其相对于地球表面产生垂直覆盖，由于水平和垂直覆盖高度相关，因此可能会利用城市地区的覆盖。

#### 4.1.1 大尺度衰落

[TR 38.811] 中的研究定义了信道仿真的一些细节，并考虑了这些大尺度参数对仰角的依赖性。涵盖的方面包括：

- ▶ LOS概率，用于描述UE和星载站之间视距状况的百分比，取决于仰角和密集城区、城区和乡村的情况。[TR 38.811] 提供了包含详细百分比值的表格。
- ▶ 路径损耗和阴影衰落，描述了UE和SAT之间链路上的路径损耗，受到四个因素影响：自由空间路径损耗 (FSPL)、大气气体引起的衰减、电离层和对流层闪烁引起的衰减以及可选的建筑物入口损耗；第4.2章提供了更多详细信息。
- ▶ 来自TX的角度扩展，如图34所示；假设NTN中的角度扩展近似为零并呈现平面波行为。可能的反射来自附近的散射体和反射体。
- ▶ 延迟扩展，作为大尺度参数，通常描述由多径传播引起的功率延迟分布。NTN的特点是TX和RX之间的绝对延迟将占主导地位，由MPP引起的延迟扩展与绝对延迟相比被认为较低。

- ▶ 室外到室内 (O2I) 穿透损耗，考虑了取决于建筑类型的附加衰减，但由于NTN主要用于室外，因此相关性较小。由于室外到室内穿透损耗的各个方面独立于NTN，并且也会发生在传统地面网络中，因此这些方面中的大多数已在文献中进行了讨论和说明，例如ITU建议 [ITU-R P.2109] 即包含了建筑物入口/出口损耗模型。
- ▶ 完全由吸收引起的大气气体衰减，主要取决于频率、仰角、海拔高度和水蒸气密度（绝对湿度）。ITU建议 [ITU-R P.676] 描述了用于计算气体衰减的这种大气衰减。在低于10 GHz的频率下，通常可以忽略该方面影响。
- ▶ 降雨衰减和云雾衰减，基于ITU建议 [ITU-R P.618-13]，在 $f < 6$  GHz时则可忽略不计。
- ▶ 电离层闪烁，对应于所接收信号振幅和相位的快速波动。应仅对频率低于6 GHz的情况考虑电离层传播。闪烁影响的细节包括电离层位置、频率和具体时刻。[TR 38.811] 描述了特定的模型。
- ▶ 对流层闪烁，对应于所接收信号振幅和相位的快速波动，仅对较高频率考虑该因素。对流层闪烁是一种引起卫星通信系统信号振幅和相位快速波动的现象。与电离层闪烁不同，对流层闪烁的影响随着载频的增加而增加，在10 GHz以上尤为显著。在此情况下，出现信号波动的原因在于温度、水蒸气含量和气压变化所致的折射率突然变化。除了随载频增加以外，闪烁的影响也会随着低仰角而增加，这是因为信号的路径更长，而接收天线的波束宽度更宽。

文档 [TR 38.811] 描述了体现卫星或地面衰落分布之间微小差异的一些频率选择性衰落模型。主要区别在于仰角对卫星连接和局部散射的影响。

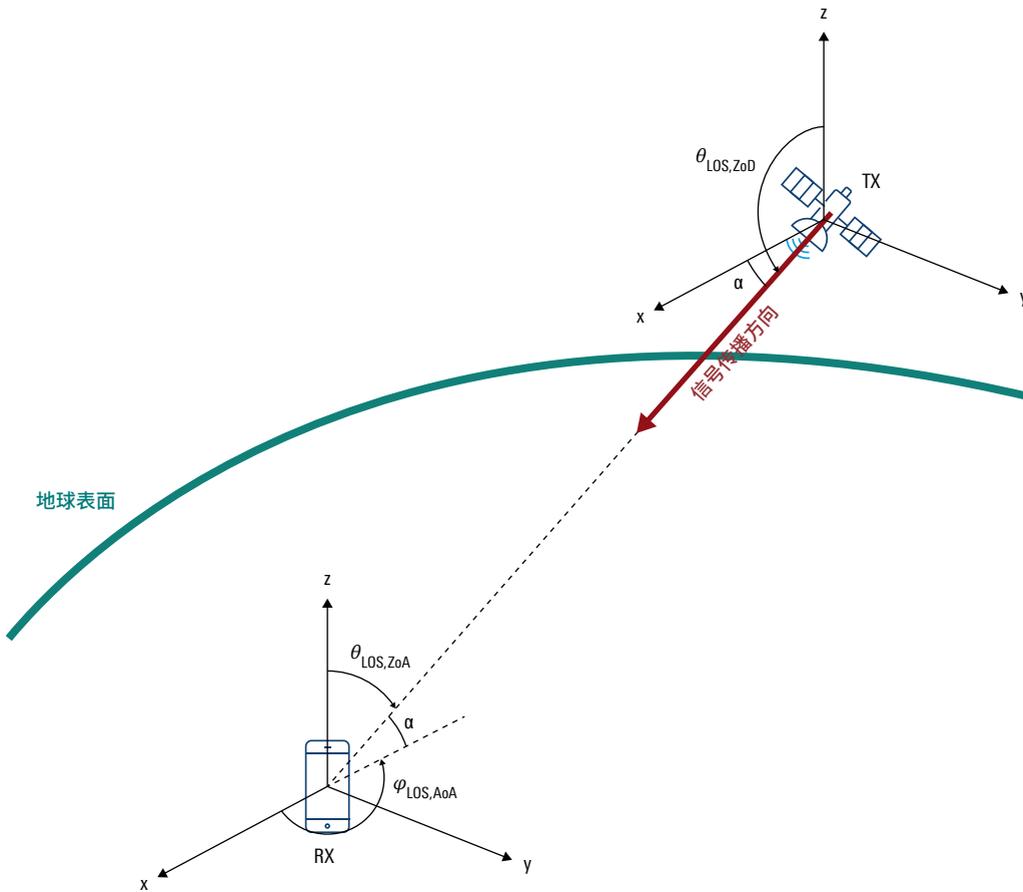
#### 4.1.2 用于链路级仿真的小尺度信道模型

小尺度信道模型也称为快速衰落，用于描述动态信道行为。[TR 38.901] 和 [TR 38.811] 这两份文档描述了对链路级仿真讨论的两种信道模型：抽头延迟线 (TDL) 和群集延迟线 (CDL)。

##### 群集延迟线 (CDL)

CDL信道模型适用于S和Ka频段的频率，提供用于描述仰角和方位角传播的三维模型。与TDL模型不同，CDL在时间（例如延迟扩展）、频率（例如多普勒频移、频率选择性衰落）以及空间信息（例如AoA）描述信道。群集延迟线 (CDL) 是一种信道模型，其中接收信号由多个单独的延迟群集组成。每个群集包含多个具有相同延迟但AoD和AoA不同的多径分量。提供 LOS模型和NLOS模型，所有模型都包含UE和卫星之间的仰角，也包含方位角，以及方位角和仰角的角度扩展。NTN信道模型的特点是省略了某些角度，即由于距离较远，忽略了方位角和天顶角的离开角角度扩展 (AsD和ZsD)。

图35: UE和NTN gNB之间的仰角



LOS和NLOS的CDL信道模型根据仰角 $\alpha$ 以表格形式给出，表中各行描述了信道系数参数以及每个群集的附加参数。CDL模型的一个主要特性是包含AoD、AoA、ZoD和ZoA等空间属性。该表通常以如下结构给出，具体值请参阅 [TR 38.811]。

表9: CDL参数

群集编号	延迟	功率 (衰减)	AoD	AoA	ZoD	ZoA
1	...	...	...	...	...	...
每个群集的附加参数						
	AsD	AsA	ZsD	ZsA	XPR	
	...	...	...	...	...	...

每个群集的附加参数包括方位角和天顶角（AsD、AsA、ZsD、ZsA）的到达角和离开角角度扩展（以度为单位）以及交叉极化失配 (XPR)（以dB为单位）等指标。

文档 [TR 38.901] 定义了LOS和NLOS条件下频率范围从0.5 GHz到100 GHz、最大带宽为2 GHz的CDL模型。存在几种地面模型，在各种延迟和延迟扩展以及角度扩展场景中有所不同。对于NTN情况，[TR 38.811] 为每种LOS和NLOS情况引入两个额外的模型，不同之处为较短或较长的延迟扩展假设场景和LOS情况的角度功率谱配置。

### 抽头延迟线 (TDL)

本质说来，抽头延迟线属于硬件实体，可生成具有至少一个“抽头”的延迟线，信号捕获是在延迟线输出之前于该抽头处进行，位于延迟线上的某个位置。该抽头可以有选择地缩放并与其他抽头进行内插。常见示例为多径传播场景仿真，其中每个抽头对应于散射情况或功率延迟分布的一个多径分量 [Ref. 1]。地面TDL模型定义的频率范围为0.5 GHz至100 GHz，最大带宽为2 GHz。

LOS和NLOS的TDL信道模型根据仰角 $\alpha$ 以表格形式给出，表中各行描述了用于多径分量仿真的各个抽头的信道系数参数。该表通常以如下结构给出，具体值请参阅 [TR 38.811]。

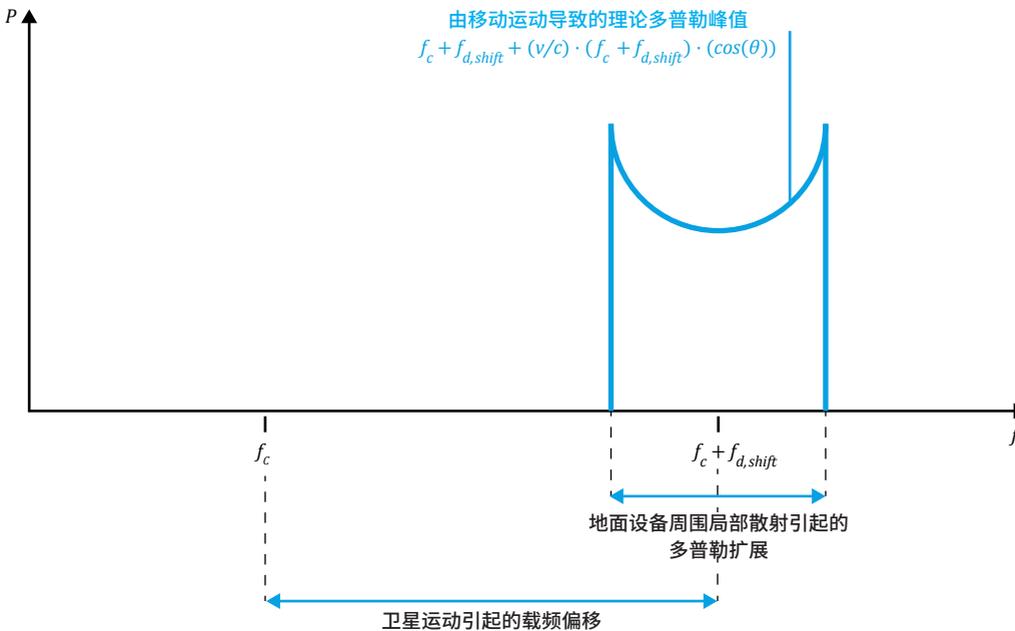
表10: TDL参数

抽头编号	延迟	功率 (衰减)	衰落分布
1	...	...	...

LOS和NLOS模型之间的区别在于衰落分布，在LOS分量占主导地位的情况下，衰落分布可能基于Rayleigh或基于Rician。

NTN的TDL模型从假定各向同性UE天线的CDL模型中筛选得出，并可通过缩放实现所需的延迟和延迟扩散。与地面模型不同的是，引入了卫星运动引起的额外多普勒频移。影响多普勒频移的参数是卫星速度、仰角、载频、UE周围的局部散射和UE运动速度（参见图36），考虑的是相对于卫星的情况。仿真中使用的TDL模型只对应于少量TTI持续时间，因此应将卫星速度、卫星仰角和UE速度视为恒定值。请注意，对于较长的连接时间，情况并非如此（参见第4.4章）。

图36: NTN LOS条件下的多普勒功率谱



## 4.2 路径损耗和链路预算

显然，UE和卫星之间的长距离将引发和导致较高路径损耗。在3GPP中进行了若干链路预算讨论，并对某些示例参数和仿真结果进行了研究，例如 [TR 36.763] 或 [TR 38.811]。随着天线技术的演进，目标是通过提供高天线增益的高度定向天线来解决路径损耗问题 [Ref. 21]。影响总路径损耗或链路预算的因素包括传播信道的路径损耗、RX和TX的天线增益和功率电平、两个实体的噪声系数，以及最后但同样重要的附加损耗。

### 路径损耗

某些参数会影响链路预算，主要是众所周知的自由空间**路径损耗 (FSPL)** 等式 [Ref. 2]。

$$P_{RX} = P_{TX} G_{TX} G_{RX} \left( \frac{\lambda^2}{4\pi} \right) \left( \frac{1}{4\pi d^2} \right)$$

在该等式中，接收机功率 $P_{RX}$ 取决于发射功率 $P_{TX}$ 、发射天线增益 $G_{TX}$ 、接收天线增益 $G_{RX}$ 、波长 $\lambda$ 、TX和RX天线之间的距离 $d$ 以及表示两种天线之间介质损耗的指数 $\gamma$ 。为简化起见，我们使用的值 $\gamma = 2$ 对应于仅将空气作为介质的情形 [Ref. 3]。

在研究阶段，3GPP假定组合路径损耗基于以下分量：对应于普通空气FSPL的基本路径损耗 $PL_0$ 、大气气体引起的衰减 $PL_g$ 、大气闪烁引起的衰减 $PL_s$ 以及建筑物入口路径损耗 $PL_e$ 。

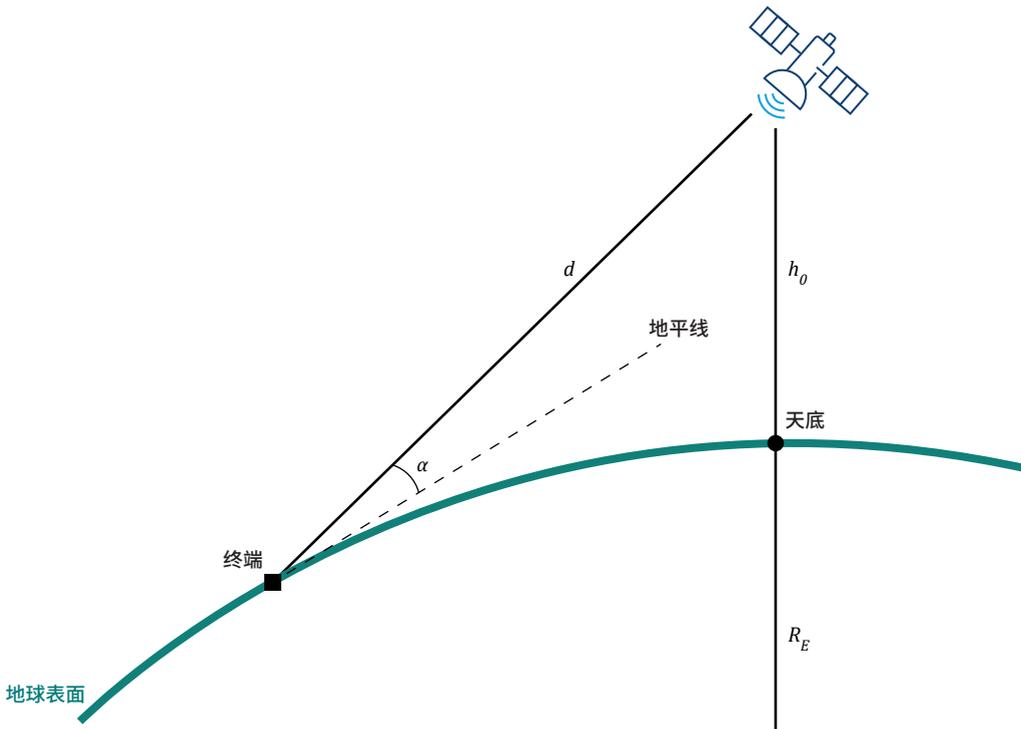
$$PL = PL_0 + PL_g + PL_s + PL_e$$

为了实现快速简单的计算，在 [TR 38.811] 中将FSPL定义为UE与卫星之间的距离 $d$ 和载频 $f_c$ 之间的函数：

$$FSPL_{d,f_c} = 32.45 + 20 \log_{10} f_c + 20 \log_{10} d$$

UE和卫星之间的距离 $d$ 基于仰角 $\alpha$ 和卫星高度 $h_0$ 计算得出。

图37：UE和卫星之间的距离d是仰角和轨道高度的函数



$$d = \sqrt{R_E^2 \sin^2 \alpha + h_0^2 + 2h_0 R_E - R_E \sin \alpha}$$

$\alpha$ : 仰角 (UE看到卫星的角度, 例如最小仰角, 约 $10^\circ$ )

$R_E$ : 地球半径 = 6371 km

$h_0$ : 卫星高度

在该计算中将地球视为完美球体, 其半径 $R_E$ 为恒定值6371 km。

除了FSPL之外, 链路仿真还考虑了由周围建筑物和地面物体引起的杂波损失 (CL) 和阴影衰落 (SF), 后者是具有标准偏差的零均值正态分布 [TR 38.811]。

### 天线增益噪声温度比 (G/T)

在卫星通信中, 性能评估指标 (FoM) **天线增益噪声温度比G/T**用于表征接收或发射链路的性能。在G/T项中, 参数G表示接收频率下的天线增益 (dB) (详见 [Ref. 2]), 参数T对应于射频链路的等效噪声温度 (K)。与仅用于评估天线的增益不同, 此FoM代表整个链路的性能。射频链路由天线本身 (= 天线增益) 和后续射频链路 (例如LNA等放大器, 以及带通滤波器、电缆等处理链实体, 具有一定的NF) 组成。G/T是一种抽象模型, 其中天线噪声温度T表示天线输出的噪声功率等于温度为 $T_A$ 时电阻器中产生的热噪声功率。请注意, 天线温度是接收链实体 (例如天线、射频链路) 的天线温度的总和, 并不对应于天线的物理温度, 而是用于解释在天线法兰处可检测到的噪声功率。根据物理学, 每个物理温度高于0开氏度的物体都会辐射能量或所谓的噪声。换句话说, 每根天线在给定环境中都会产生噪声。辐射的能量通常由等效温度 $T_b$ 表示, 也称为亮度温度。

该亮度温度是载频、发射能量极化、发射率和物体分子结构/温度的函数 [Ref. 3]。总之，天线温度是描述天线产生多少噪声的参数，取决于天线增益模式和热条件等给定环境，因此天线温度有时也称为天线噪声温度。就天线的接收情况而言，天线可接收来自不同来源的辐射或噪声，包括其他发射机等产生的人为噪声，或者太阳辐射、天空噪声、银河噪声和大气噪声等来自自然来源的辐射，其中大气噪声由闪电引起，由氧气和水蒸气分子吸收，然后重新发射辐射。应当特别注意以UE发射的UL信号为目标的卫星接收天线。在该情况下，地球已经提供一定的噪声基底。来自这些来源的噪声可能通过所有三个维度进入接收机，或多或少因该特定方向上的空间方向增益  $G(\theta, \varphi)$  而降低。因此，在天线理论中，我们可以将天线温度  $T_A$  (K) 描述为所有亮度温度发射球面积分的函数，并考虑天线在该方向上的空间增益分量，使用方位角  $\theta$  和仰角  $\varphi$  来描述球体 [Ref. 3]：

$$T_A = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi T_B(\theta, \varphi) G(\theta, \varphi) \sin \theta \, d\theta d\varphi}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi G(\theta, \varphi) \sin \theta \, d\theta d\varphi}$$

假设天线本身和接收机之间没有损耗，可将传输的噪声功率  $P_r$  (W) 表示为：

$$P_r = k T_A \Delta B$$

在该等式中， $k$  对应于玻尔兹曼常数 ( $1.38 \cdot 10^{-23}$  J/K)， $T_A$  为天线温度， $\Delta B$  代表分析带宽。请注意，在实际系统中，我们还必须将接收机温度  $T_R$  纳入整体考虑，因此  $G/T$  项中的温度  $T$  表示为  $T = T_A + T_R$ 。

$G/T$  参数是天线增益除以天线温度的比值。在 [TR 38.811] 中，3GPP 采用以下公式计算  $G/T$  值：

$$\frac{G}{T} = G_A - NF - 10 \log \left( T_0 + \frac{T_A - T_0}{10^{0.1 \cdot NF}} \right)$$

在该等式中， $G_A$  描述天线增益 (dBi)， $NF$  为噪声系数 (dB)， $T_0$  为环境温度 (290 K)， $T_A$  为天线温度 (290 K，增益为 0 dBi，或 150 K，增益 > 30 dBi)。仅补充说明一点，应注意环境温度的变化取决于卫星是朝向太阳还是位于地球阴影面。因此， $G/T$  计算可能会考虑多个环境温度条件。

### 噪声系数

请注意：噪声系数 (NF) 是由射频链路中的实体所引起的 SNR 劣化的度量。例如，我们将射频链路视为接收链，并使用通用术语  $T$  表示天线温度。我们假设理想的接收机有两个端口：输入和输出。在这里，输入端 SNR 与输出端 SNR 相同。遗憾的是，真实的接收机会产生内部噪声伪影，使得接收机输出端 SNR 被认为低于其输入端 SNR。NF 等于输入端 SNR 除以输出端 SNR (dB)，描述了接收机对噪声源噪声贡献的额外噪声量，作为性能指标（另见图 15）。

另一种观点认为NF是噪声功率的增加量，是指由接收链组件引起的接收机噪声，假设环境温度  $T_0 = 290$  K，接收机噪声温度T。

$$NF = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{SNR_i}{SNR_o} \right) = 10 \cdot \log_{10} \left( 1 + \frac{T}{T_0} \right)$$

为简明起见，我们将引用 [TR 38.811] 中给出的几个数字，这些数字描述了S频段频率的G/T，对于GEO星座约为  $14 \text{ dB} \cdot \text{K}^{-1}$ ，对于LEO星座约为  $-12 \text{ dB} \cdot \text{K}^{-1}$ 至 $-18 \text{ dB} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

### 链路预算

综上，应考虑如下影响链路预算的参数：

- ▶ UE功率等级，例如20 dBm或23 dBm
- ▶ UE噪声系数，例如假定约为9 dB
- ▶ 卫星发射功率，例如对于LEO卫星为33 dBm/MHz EIRP
- ▶ 卫星天线增益，例如对于LEO卫星为30 dBi
- ▶ 信道带宽和载频
- ▶ 其他损耗；请参阅 [TR 36.763]

**表11：链路预算 – 其他损耗**

其他损耗	GEO (35 786 km)	LEO (1200 km)	LEO (600 km)
闪烁损耗	2.2	2.2	2.2
大气损耗	0.2	0.1	0.1
极化损耗	3	3	3
阴影裕量	3	3	3

- ▶ 极化损耗3 dB假定UE上为线极化，卫星上为圆极化
- ▶ UE在波束内的位置，例如中央波束的波束中心或最外侧波束的波束边缘
- ▶ 路径损耗，例如LEO约为160 dB，GEO约为190 dB

卫星和UE之间的传输链路所产生的载噪比 (CNR)如 [TR 38.821] 中所述：

$$CNR = EIRP + G/T - k - FSPL - PL_g - PL_s - PL_e - PL_{AD} - B$$

其中EIRP为等效全向辐射功率，G/T为天线增益噪声温度比，k为玻尔兹曼常数 ( $-228.6 \text{ dBW} \cdot \text{K}^{-1} / \text{Hz}$ )，FSPL为自由空间路径损耗， $PL_g$ 为大气气体引起的衰减， $PL_s$ 为大气闪烁引起的衰减， $PL_e$ 为阴影裕量， $PL_{AD}$ 为透传架构中馈线链路损耗引起的可选劣化，B为信道带宽。下表给出了用于说明LEO链路预算结果的示例 [TR 38.821]。

**表12：链路预算结果**

传输模式	DL	UL
频率	2 GHz	2 GHz
TX: EIRP	78.8 dBm	23 dBm
RX: G/T	-31.6 dB · K <sup>-1</sup>	1.1 dB · K <sup>-1</sup>
带宽	30 MHz	0.4 MHz
自由空间路径损耗	159.1 dB	159.1 dB
大气损耗	0.1 dB	0.1 dB
阴影衰落裕量	3 dB	3 dB
闪烁损耗	2.2 dB	2.2 dB
极化损耗	0 dB	0 dB
附加损耗	0 dB	0 dB
<b>CNR</b>	<b>6.6 dB</b>	<b>2.8 dB</b>

由于存在高路径损耗，UE接收功率电平可能处于较低范围，例如 < -110 dBm。这对UE中的RX链路的设计者提出额外的挑战，因为在设备架构中，不太可能在当前架构之外共存一个用于这些值的单独RX链路。

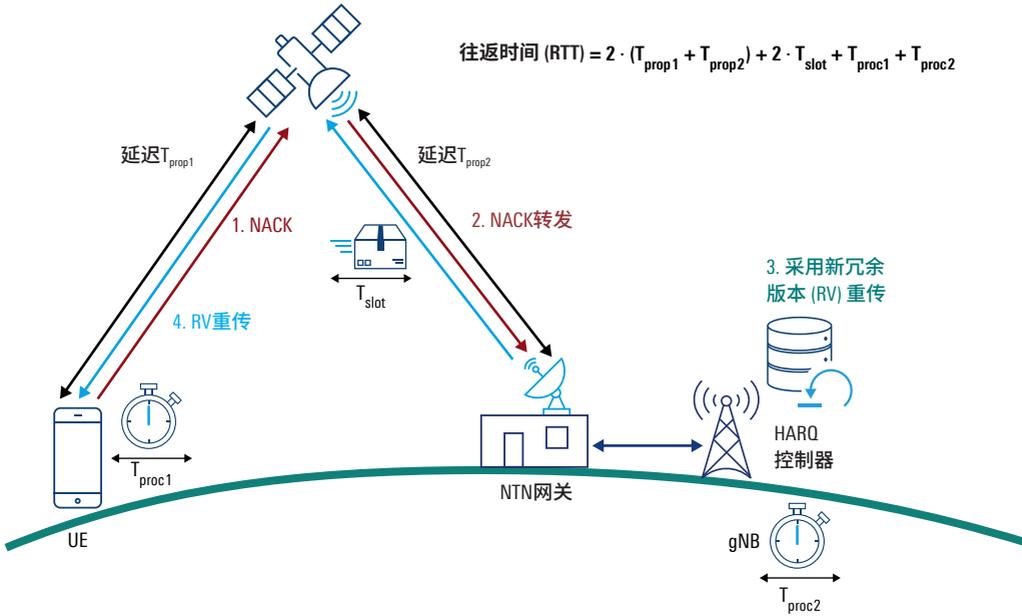
### 4.3 往返时间和差分延迟

在NTN NR中引入低延迟通信是最具挑战性的NTN特性之一，显然是由于地面UE和卫星之间距离较大而导致的较长往返时间 (RTT) 或长延迟。更糟糕的是，该RTT取决于仰角，并且具有时变性。典型的单向延迟值在LEO中为30 ms至40 ms，在GEO星座中高达544 ms。如我们在透传模式架构（参见第3.10.2章）中所述，总RTT是“UE到卫星再到地面gNB”路径的两倍。未来的架构模型将使用再生架构，甚至在卫星中纳入多接入边缘计算 (MEC) 方法，以此改善总体延迟，但鉴于光速不能加速，会始终存在由传播延迟造成的阻碍因素。更高层协议需要处理这些增加的RTT，详见后续章节所述。而NTN的目标并非5G服务的低延迟，NTN针对的是服务不足区域和无信号覆盖的问题。作为提醒，我们希望重申一点，自由空间中的电磁波以光速传播，相较于光纤速度更快，达到后者的1.47倍 [Ref. 31]，因此，与地面连接相比，通过卫星实现的远距离连接将可以提高速度。

#### 往返时间 – 定义

往返时间受到各种参数的影响，计算方法如图38所示。在该设想中，假定在UE侧接收带有负CRC校验的PDU。因此，RTT以NACK报文传输开始，并以接收PDU重传结束。在这里应用了透传架构。除了UE与卫星和星地网关之间的传播延迟外，还需要考虑一些系统参数和处理时间。在总RTT中，时间 $T_{slot}$ 是指对应于PDU或NACK报文持续时间的系统时间，并与5G中的子帧或时隙持续时间对应。总处理时间 $T_{proc1} + T_{proc2}$ 包括UE和网络反应时间。UE反应时间是指从CRC校验到NACK报文传输之间的时间。gNB反应时间是指从接收该NACK到传输采用可选更新冗余版本 (RV) 的重传PDU之间的时间。

图38：往返时间 – 定义

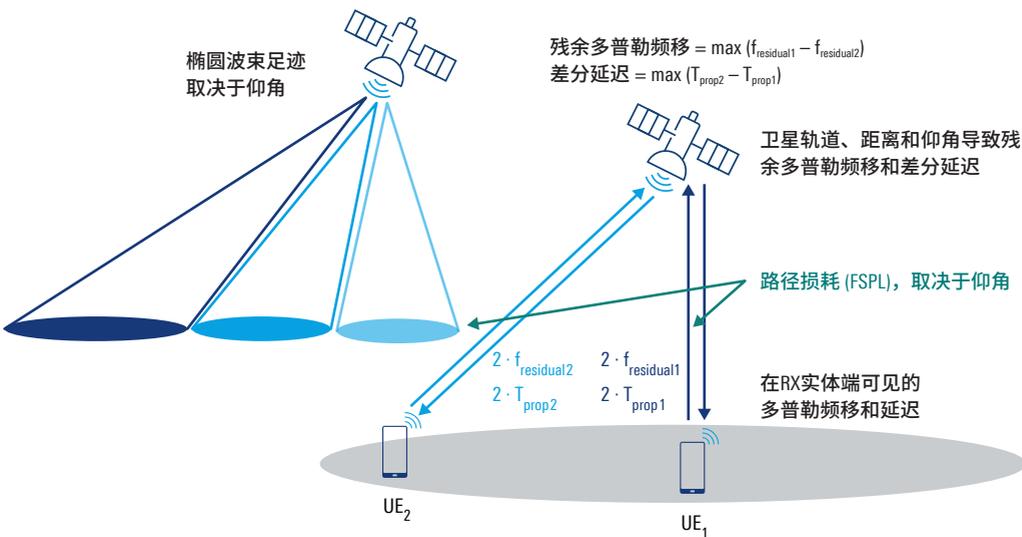


对RTT和延迟的详细分析揭示了更进一步的挑战：

- ▶ 整个连接期间的时变延迟和变化的RTT
- ▶ NTN gNB和波束足迹覆盖区域内所有UE之间由椭圆形性质和仰角影响导致的差分延迟

从NTN gNB角度考虑RTT，我们首先来看最有可能出现的与覆盖区域或小区大小相对应的波束足迹椭圆形（参见图39）。该椭圆形取决于仰角或入射角。结果，NTN gNB在UE之间经历不同的传播时间。从卫星角度来看，RTT取决于UE是位于波束中心的零天顶角还是天底位置（参见图39中的UE<sub>1</sub>），或者UE是否位于波束边缘（参见图39的E2）。差分RTT或差分延迟定义为最长延迟和最短延迟之间的延迟差值。

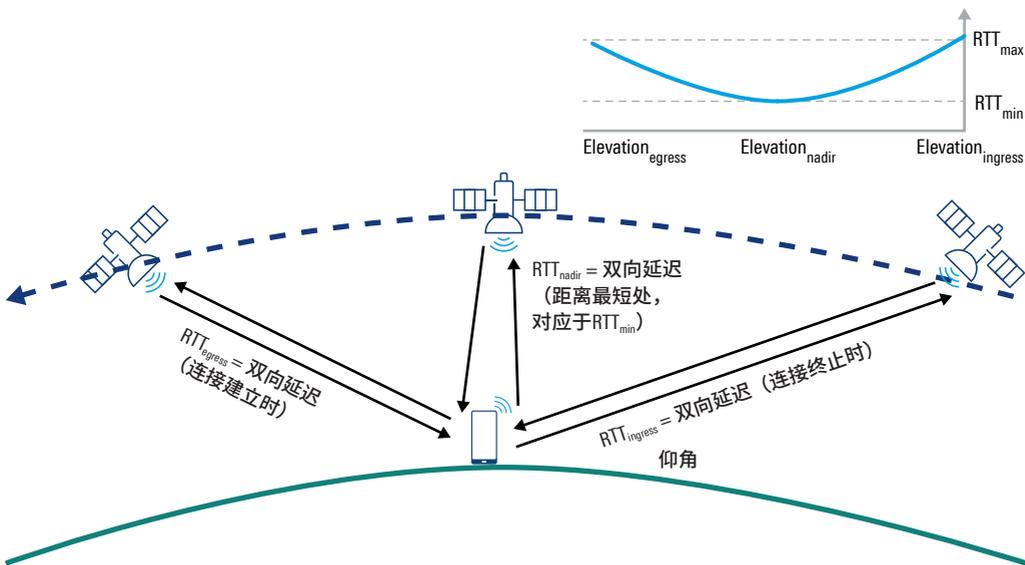
图39：从NTN gNB角度来看往返时间和波束足迹



差分RTT不仅取决于星座或卫星高度，还取决于波束宽度或波束足迹大小，在此无需赘述。在 GEO卫星仿真中，计算出的RTT差异约为16 ms。对于LEO星座，3GPP定义的最大差分延迟约为10 ms。这种限制之所以影响设计，原因是在更高层实施的缓冲区管理。特别是在gNB MAC层，需要在其中对准PDU并将其转发到RLC层。MAC层使用HARQ操作等方法来管理和控制所有活动连接的可靠性和定时。因此，应当实施全面的缓冲区管理概念。

**从UE角度考虑RTT**，可以观察到RTT在连接期间随时间变化。为避免误解，这一事实不仅与 UE视角有关，我们还假定gNB以适当的时间提前量控制来补偿RTT的变化。由于卫星轨道的性质，UE会经历时变RTT行为。如图40所示，假设最大RTT在连接开始时出现，即当LEO卫星在地平线处最小仰角之上出现时，称为入口，反之亦然，在连接终止时，称为出口。当LEO卫星垂直于UE时，应在天底位置观察到最短RTT。总体而言，可以预计RTT的抛物面时变行为。这将影响MAC层的缓冲管理和HARQ操作，因为我们会在传输和重传之间以及连接过程中接收的PDU之间遇到轨道星座时变情况。

**图40：从UE角度来看往返时间**



#### 4.4 载波频移（多普勒频移）

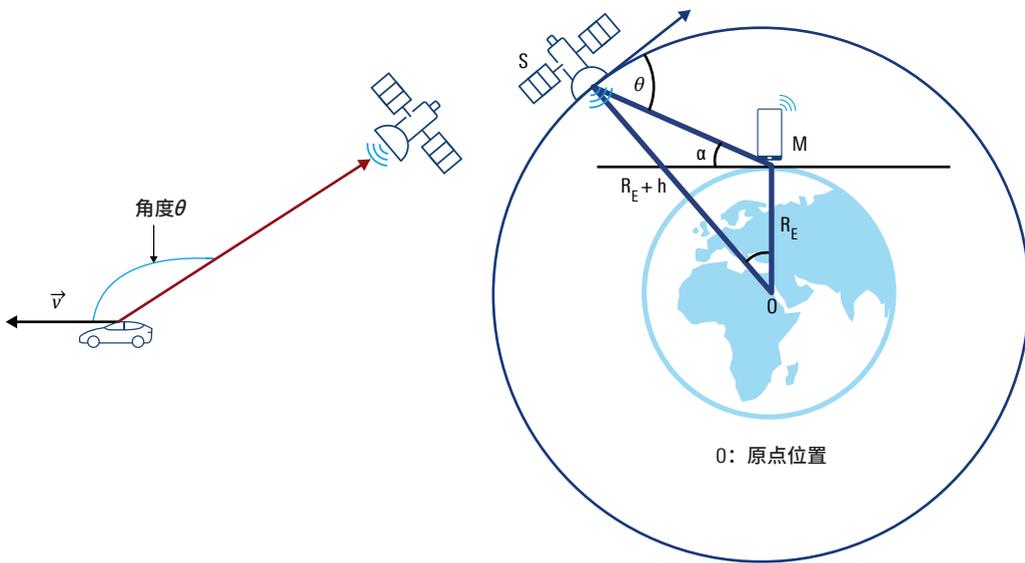
要实现具有良好终端用户QoE的NTN连接，一项巨大的挑战是载频偏差，也称为**多普勒频移**。移动基站或卫星与可选移动UE组合的范式变化造成整个连接时间内的时变多普勒频移。这种时变多普勒频移也称为**多普勒变化率**，或简称多普勒率。请注意，我们在此考虑的是UE和卫星之间的相对速度 $v$ 。

##### 多普勒频移

出于更具通用性的设想，我们必须考虑在作为接收机的卫星上发生的多普勒频移，或是在作为接收机的UE上发生的多普勒频移。此外，可以考虑某些场景 [TR 38.811]，例如GEO或LEO卫星星座；还可考虑静态UE或以更高速度飞行的UE，例如飞机或所谓的通用飞行器 (UAV)。一般认为，发生的多普勒频移基于速度 $v$ （UE和卫星之间的相对速度）、载频 $f_c$ 和速度矢量与信号传播方向之间的角度 $\theta$ 来计算。

$$\Delta f = f_c \cdot v \cdot \cos(\theta) / c$$

图41：多普勒频移、通用因素和角度 $\theta$ 的定义



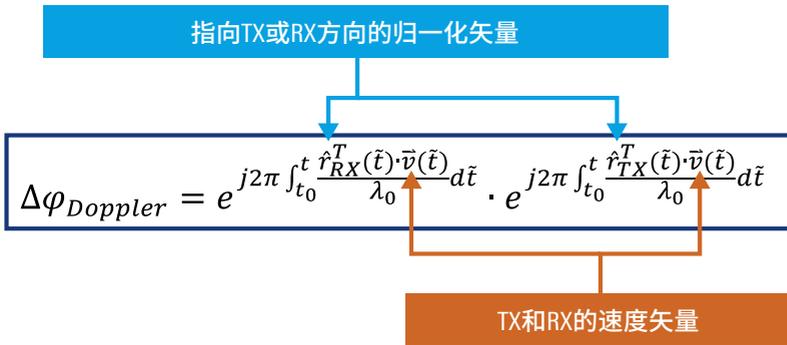
多普勒频移 $\Delta f$ 在发射机从接收机离开时为负值，而在发射机向接收机移动时则为正值。

图41中的略图描述了一般的多普勒频移。左侧为有关角度 $\theta$ 的多普勒描述。在我们的设想中，假定UE和卫星的两个速度为相对于地球的速度，因此它们可以累加。图中右侧显示了系统的几何结构：假设卫星S在高度为 $h$ 的圆形轨道上运行，位置M处的UE位于圆形轨道上，该圆形轨道被描述为地球表面，具有总体恒定的地球半径 $R_E$ ，地球中心位于原点位置O。为简化起见，我们假设UE为静止状态；如果需要，UE的任何移动都可以与卫星速度累加，得到更新的 $v_{sat}^*$ 。为了计算相对于仰角 $\alpha$ 的多普勒频移，我们以另一种形式来书写多普勒频移公式：

$$f_{d,shift} = \left(\frac{v_{sat}}{c}\right) \cdot \left(\frac{R_E}{R_E + h} \cos \alpha\right) \cdot f_c$$

在 [TR 38.811] 所述的信道模型中，仰角 $\alpha$ 设定为 $50^\circ$ 。多普勒频移通常取决于信道的时演进，并与UE和卫星的累积速度矢量以及TX和RX之间的方向或仰角有关。在更具通用性的术语中，由多普勒频移引起的相位旋转是相对于 [TR 38.811] 中  $t_0$  时刻的参考相位计算得出。

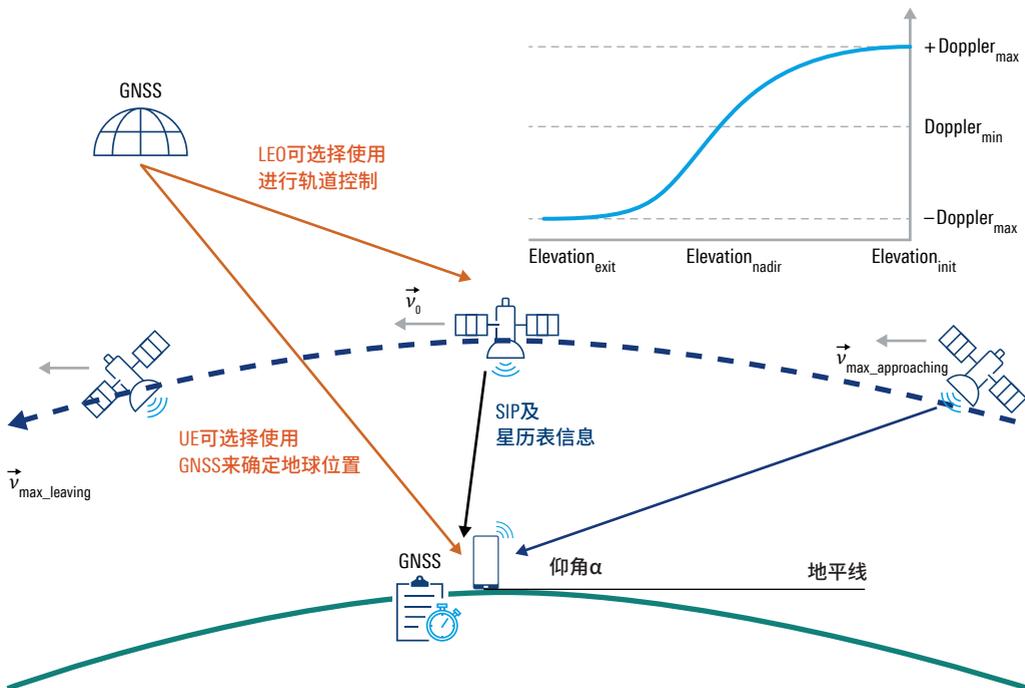
图42：时变多普勒频移引起的相位旋转 – 一般形式



### 多普勒率

在NTN中，我们不仅要考虑多普勒频移，即某一时刻发生的载频偏差，还要考虑多普勒率或多普勒频移变化，因为在连接时间内，多普勒频移可能发生变化。在LEO星座中，仰角 $\alpha$ 会在连接期间发生变化，卫星相对于UE的相对速度也会变化。图43显示了这样一种场景：UE会在LEO卫星上升到连接入口处的最小仰角之上时检测到该卫星，在该卫星下降到连接出口处的最小仰角之下时则无法检测到。此外显而易见的是，在该场景中，卫星相对于UE的相对速度从接近变为离开，造成多普勒率。这适用于移动波束或地球固定波束这两种波束足迹场景（参见图14）。

图43：LEO场景中的多普勒频移率



[TR 38.811] 针对行驶中的列车、飞机、静态UE、各种卫星星座和频率载波等不同多普勒场景开展了各种研究。例如，在用于模拟LEO卫星星座静止模式的设备上以三种不同频率进行多普勒频移仿真。

**表13：三种不同载频下的预期多普勒频移参数**

频率	2 GHz	20 GHz	30 GHz
多普勒频移	±48 kHz	±480 kHz	±720 kHz
多普勒变化	544 Hz/s	5.4 kHz (S)	8.1 kHz (S)

作为补偿UL中多普勒频移的方法，UE将对其位置进行估计（例如基于GNSS定位），并接收系统信息 (SIB) 和卫星星历表信息。作为结果，UE随后将自适应其上行载频，以调整卫星接收机的载波频率，从而可以忽略上行链路方向的多普勒频移影响。

[Ref. 33] 中提供了逻辑高效递归多普勒率估计的示例算法。

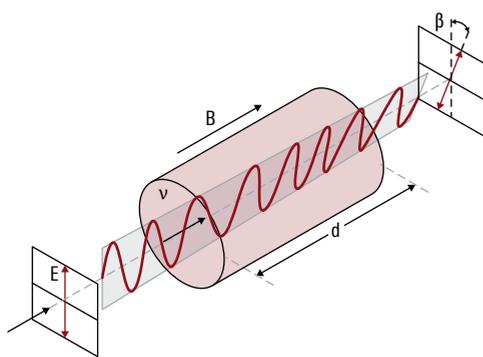
在Rel-17中，假定馈线链路上的多普勒频移以及下行和上行的任何应答器频率误差都将由地面网关和卫星有效载荷进行补偿，而不会产生标准规范方面的影响。

未在3GPP范围内包含的一点是，LEO卫星也可选择使用GNSS信息来进行轨道管理和飞行控制，以支持多普勒补偿。

#### 4.5 NTN中的法拉第旋转和极化

大气层的结构可由所谓的电子总量或总电子数 (TEC) 来表示，这种结构可以形成一种由学术术语“法拉第旋转”描述的效应。引入法拉第旋转用于描述由电磁波与地球磁场中的电离介质沿路径的相互作用所导致的极化旋转 [TR 38.811]。

**图44：法拉第效应对极化的影响**



第n个群集的第m条路径在电离层上方的法拉第旋转

$$F_r = \begin{bmatrix} \cos(\psi_{n,m}) & -\sin(\psi_{n,m}) \\ \sin(\psi_{n,m}) & \cos(\psi_{n,m}) \end{bmatrix}$$

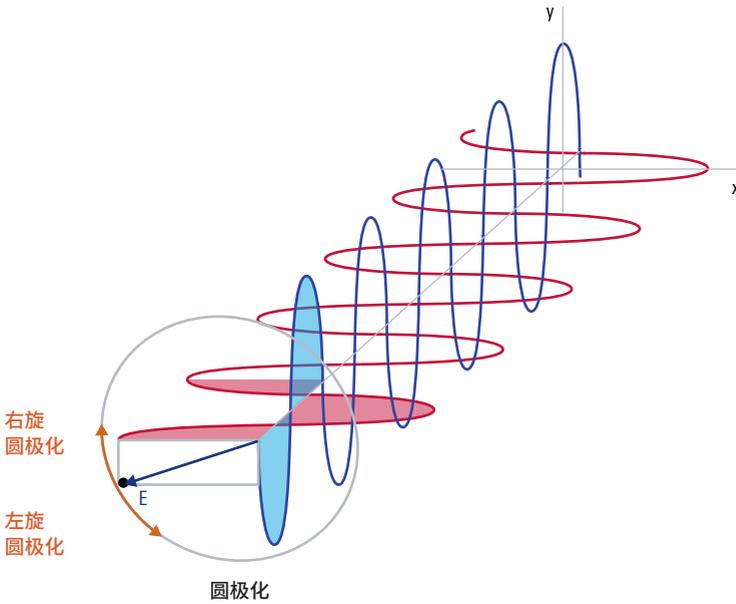
ITU-R P.618-13建议:  $\psi = \frac{108}{f_c^2}$

在链路级模型中，当假定传播具有相似性并对其进行群集时，信道脉冲响应参数的计算应与  $F_r$  进行后乘，以生成第n个群集中多径场景下第m条路径的信道系数。ITU建议 [ITU-R P.618-13] 建议根据载频  $f_c$  的平方来定义法拉第旋转。

请注意，术语“极化”描述了电磁波E面相对于地球表面的方向 [Ref. 3]。

地面通信通常使用线极化（水平和/或垂直极化）。在简化模型中，天线的几何结构为准静态，即UE和基站天线相对于彼此固定 [Ref. 2]。在NTN情况下，卫星相对于固定的地面站高速移动（我们在此不考虑UE的速度，因为它低于卫星速度），线极化对准可能丢失。作为应对措施，圆极化经常出现在天基应用中。电场矢量大小恒定，但方向会发生变化，并围绕传播方向按顺时针或逆时针方向旋转，由此产生**左旋圆极化 (LHCP)** 或**右旋圆极化 (RHCP)** [Ref. 2]。

图45：圆极化



设计TX和RX布置的一项主要挑战是可能的极化失配。TX和RX侧采用相同圆极化时不会有影响，因为完全匹配；但假设一侧使用线极化，将会出现3 dB的极化失配损失，如果有争议地应用圆极化，由于LHCP和RHCP彼此准正交，极化失配将接近无穷大。建议采用带有两个RX分支的UE架构，以实现组合增益（参见第3.3章）。

请注意，通常认为NTN可以选择与地面5G NR在双连接模式下运行，或者至少需要保证支持5G NTN的UE也支持地面5G NR。即使不是同时支持，但至少就其设计而言，它们需要支持两种RAT。现在的问题是制造商将如何实施新的圆极化方案。一种选择是为圆极化加入新的射频前端设计，并在它们之间进行切换，或者降低传统线极化的影响，并接受之后可能出现的极化损耗。

为了支持小区间干扰缓解或改进频率复用机制，并避免这种极化损耗，网络将向上行和下行发送极化方案的信号。至于极化的指示是否延伸到单个SSB指数及其各自SSB波束的粒度（参见 [Ref. 1]），还有待于今后的研究来确定。

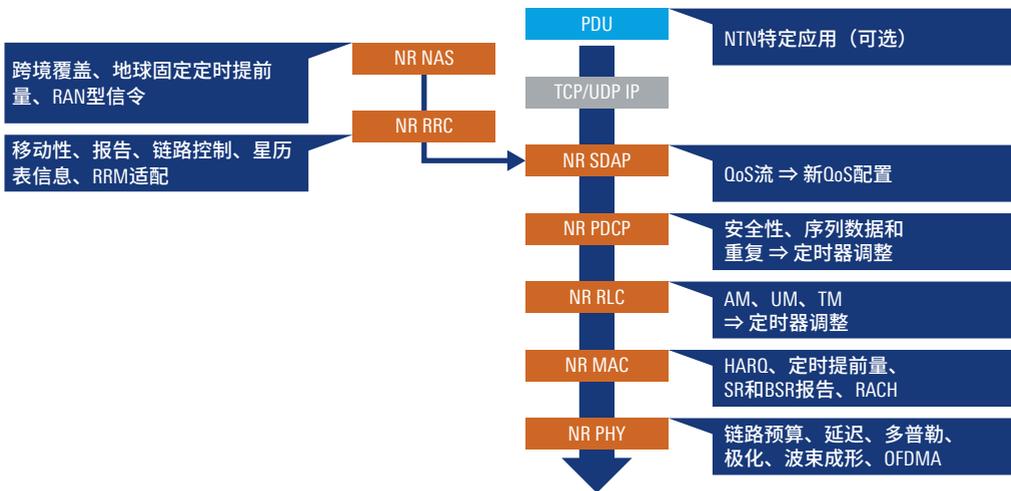
# 5 NTN信令流程和协议栈

引入NTN需要更新和修改某些协议流程，以应对前述的延迟、多普勒频移等挑战。3GPP通过几项研究，对现有5G NR协议结构和流程可能的扩展和更新进行了调查。本章旨在概述最具相关性的流程，并简要介绍可能的对策。

## 5.1 5G NTN协议栈

3GPP进行的讨论考虑5G现有协议结构，并本着3GPP提出的引入对现有系统设置影响最小的 NTN连接这一主要目标，就如何修正协议结构以支持NTN得出了一些结论。物理层需要应对出现的新挑战。3GPP研究了媒体接入控制 (MAC)、无线链路控制 (RLC)、分组数据汇聚协议 (PDCP) 和服务数据适配协议 (SDAP) 的潜在更新；有关5G协议结构的更多详细信息，请参阅 [Ref. 1]。为优化信令架构，3GPP对无线资源控制和NAS协议层进行了一些调整和扩展。下面介绍其中的一些扩展。

图46: NTN协议栈



### 物理层

如前文所探讨，通常认为NTN对物理层的主要影响是长延迟、多普勒频移、高路径损耗和极化旋转。物理波形不需要根据NTN做出具体修正，这是基于综合复杂度、时间线和可行性的折衷考量。3GPP决定继续将OFDMA作为主要波形，原因是这项技术已用在5G NR中，并且也适用于NTN连接。业界对此不乏异议和讨论，因为OFDMA具有较高的峰均比 (PAPR)，一些现有卫星通信系统也正是出于这一理由而决定不使用OFDM。另一项具有挑战性的参数是OFDMA对多普勒频移的敏感性，因此需要进行预调整和载频校正（参见4.4章）。但就系统影响和未来可能出现的地面和非地面之间的双连接场景而言，基于卫星的连接的OFDM重用由于影响最小，将会带来多项优势。

5G系统中可能会启用新频段，以及引入更高发射功率、圆极化或复杂的波束赋形方法等细微的变化

无需进行彻底的标准规范更新。5G NTN将重用现有参考信号和物理信道结构。

由于NTN可以使用FR1和FR2频段，物理层在使用的频谱方面保持灵活性。在讨论用于NTN的Ka频段时，定义了处于FR1和FR2之间缺口内的上行区域，或者换句话说，该区域将位于3GPP未定义的频谱内，从而导致复杂性增加。这也是NTN的FR2遭到推迟的原因之一。第二个原因是适用于NTN的双工模式FDD。TDD系统需要在TX和RX开关之间定义保护间隔。由于NTN存在较长延迟，这种保护间隔需要非常长，也会导致频谱分配效率低下。因此，3GPP决定在NTN的FR2频率上采用FDD，这是一种新做法，因为目前的FR2频段均采用TDD。为使FDD也能用在FR2中，需对现有标准规范进行调整，而由此会造成规范组的延迟，这也在Rel-17中尚未考虑FR2频段的另一个原因。

关于同步网络初始接入，目前规定的使用同步信号和信道（例如SSB块）的概念在NTN中保持不变。假设UE将遵循S准则，最佳小区将通过测量功率（例如RSRP）和信号质量（例如RSRQ）来确定。出于小区重选的目的，也可以考虑星历表信息和UE位置。标准规范包含基于SSB的RRM测量定时配置窗口（称为SMTC）的定义，根据网络来更新UE的SMTC配置，以适应地面和非地面小区之间的不同传播延迟，或减轻两个SAN之间的相对时间变化。对于Rel-17，可以配置与单一频率关联的一个或多个SMTC配置，并有选择地链接到一组小区。除了传统SMTC配置之外，还可以使用不同的偏移量（另见图59）。

5G NR已应用自适应调制与编码，这将在NTN中保留，其中首选采用最高16阶的相移键控调制方案。UE和卫星支持QPSK和16QAM，也可选择使用64QAM。由于RTT较长，可能的链路质量反馈（例如CQI）会延迟到达gNB调度器，但对于NTN，SNR的最大影响因素是自由空间路径损耗（FSPL），这可以通过星座几何结构进行预测。在卫星速度较高和分组持续时间较长的情况下，路径损耗可能会出现波动，因此随后可以根据QoS配置来选择更稳健的MCS方案。

基于多天线技术（MIMO）的频谱效率提升受到主要LOS和较长距离的影响，导致秩指标反馈延迟，一般认为NTN MIMO将留待日后改进。卫星天线附近没有散射体，往往会使卫星与UE之间所有信道的衰落具有空间相关性。

## MAC层

更长的延迟会影响到由MAC层控制的流程。研究得出的一致结论为，需对随机接入（RACH）、节电或不连续接收（DRX）、定时提前量（TA）、调度请求（SR）及混合自动重传请求（HARQ）等流程提供MAC增强[R2-1818511]。HARQ反馈可能会被略过，导致对可靠性造成影响，因此建议通过更稳健的MCS选择和更高层（如RLC和PDCP）的支持来解决可靠性问题。RACH扩展可确保在出现较长延迟的情况下正常运行。定时提前量更新不仅可以处理较长RTT的绝对值，还可以减轻由于波束足迹和卫星运动的椭圆性质而造成的时变和浮动RTT等影响。

## RLC层

与其他协议层类似，RLC也必须应对RTT延长的巨大挑战。RLC实体提供三种不同的传输模式：非确认模式 (UM)、确认模式 (AM) 和透传模式 (TM)。由于延迟较大，很难满足AM的要求，在RLC AM处于信令无线承载默认模式的情况下尤其如此。MAC层可能在不开启HARQ的模式下运行，为此RLC AM应当确保可靠的数据传输。请注意，这可能导致需全面配置 $maxRetxThreshold$ 参数，该参数将设定QoS配置中延迟和可靠性之间的最大重传次数和桥接次数。在确认模式下，RLC层使用轮询机制。TX实体发送包含轮询请求的PDU，并启动定时器 $t-PollRetransmit$ 。RX实体以状态报告进行回复，在定时器到期的情况下重复轮询。 $t-PollRetransmit$ 定时器当前可配置的最大时间为4000 ms，该数值对于NTN GEO RTT也算绰绰有余。接收数据单元的流量控制由 $t-Reassembly$ 定时器控制，其最大时间为200 ms。该定时器检测可能的低层RLC PDU丢失。初步建议指出，由于情况与传统网络没有区别，因此无需进行更新。但不排除扩展，特别是在MAC层上启用HARQ的情况下，扩展会有所帮助，因为正在运行的 $t-Reassembly$ 定时器还要包括HARQ重传。3GPP工作组RAN2建议将该重组定时器扩展至2200 ms，而为了适应未来的需要，已在Rel-17中增加了 $t-ReassemblyExt$ 信息元素。这也适用于 $t-statusProhibit$ 定时器（时长设为2400 ms即视为足够），同时适用于NTN。一项建议认为应考虑RLC序列号字段（目前最大长度为18位）的可能扩展，以及用于描述缓冲区状态的 $AM\_Window\_Size$ 的扩展。这两个值也被认为可以满足NTN的要求，但未来的技术演进有望支持更大的子载波间隔（例如120 kHz），由此将缩短时隙持续时间，另外还支持载波聚合或双连接等方法，这些方法随后可能导致由于超出缓冲区而引发卡顿情况 [R2-1818512]。

## PDCP层

用户面协议层支持数据传输，包括序列内提供、丢弃函数、调度、加密和复制。一般认为无需因为引入NTN而更新PDCP层的加密功能。此外，PDCP层需要处理更长的RTT，并与RLC层密切合作提供QoS支持。PDCP参数 $discardTimer$ 设置了向TX RLC实体发送丢弃通知之前的最大时间，此外在扩展重传的情况下，建议扩展该定时器作为有用的修正。为了适应未来的需要，Rel-17中引入了长度为2000 ms新信息元素 $discardTimerExt$ ，并提供未来扩展选项。在RX实体中， $t-Reordering$ 定时器会影响重新排序功能。当前3000 ms的最大持续时间对于RLC UM模式来显然足够，但假设RLC AM重传次数更多，则可能扩展该定时器值会非常有帮助。与RLC层一样，PDCP序列号的潜在扩展（目前为18位）以及给定为 $Window\_Size$ 的缓冲区大小将对NTN有利。无需直接进行此类修改，但支持更短时隙持续时间、更大子载波间隔的未来场景以及载波聚合场景可能会从这类修改中受益，从而避免发生卡顿情况 [R2-1818513]。

## SDAP层

SDAP层负责QoS流和数据无线承载之间的映射，不受NTN中出现的较大往返延迟的影响。如为更大的RTT，3GPP引入了容许更长延迟的新QoS配置。对于SDAP，研究发现没有必要引入任何修改来支持NTN [Ref. 10]。

## 无线资源控制层

关于RRC信令，与空闲模式和连接模式相关的流程和信令的一些适配都需要更新，包括系统信息、注册、寻呼、使用卫星星历表信息、位置信息、测量配置、用于调度的无线资源管理 (RRM)、链路适配、MCS控制和切换流程等。例如，引入 NTN要求使用新的系统信息块（例如SIB19），该信息块提供关于星历表、共同定时提前量参数、UL同步的有效性信息、小区停止信息、小区参考位置和历元时间等方面的信息。当UL同步信息过期时，UE需要再次获取SIB。RRM流程支持两颗卫星之间的移动性。举例来说，允许灵活配置RRM相关测量流程，比如SMTC窗口。以下章节将提供更多详细信息。

## NAS信令

对NAS层的主要影响是跨境覆盖的扩展和由此产生的PLMN选择进程，以及纳入调整当前 NAS信令的适配措施，例如注册设置使用更长的RTT。主要的后果是定义了新值**RAT类型**，该值将向AMF发出信号，让核心网功能了解UE和相应的服务数据流将使用NTN连接，因此需要容许更长的RTT。以下章节将提供更多详细信息。

## 5.2 HARQ

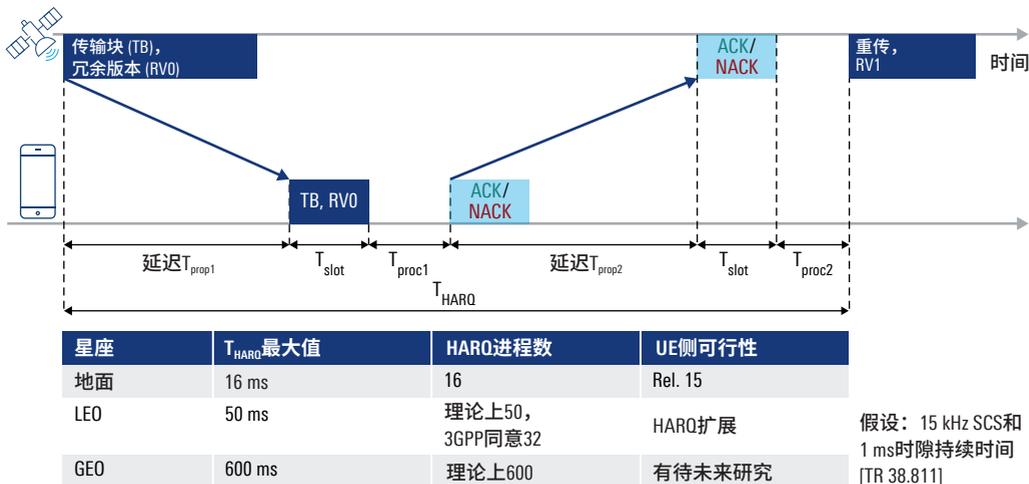
在Rel-6中引入的混合自动重传请求 (HARQ) (引入HSDPA) 支持基于快速确认和重传的可靠连接，并采用冗余版本适配等增量冗余方法。这种HARQ进程的缺点是具有“停止等待”性质：发射机需要等待，直到收到肯定的确认后才能发送下一个数据分组，否则会发生重传 [Ref. 1]。为了克服卡顿情况，多个HARQ进程将在多任务模式下运行。在5G NR Rel-15中，每个UE最多可以有16个HARQ同时运行，并由多个定时器来控制RX与确认和重传之间的周期等行为。由于NTN会导致更长的延迟，需要对当前HARQ机制进行调整，3GPP讨论了三种可能的适配：

- ▶ 将现有HARQ进程数量扩展到32个进程
- ▶ 禁用HARQ反馈并将重传转移到更高层，例如RLC AM
- ▶ 配置自动重传，例如TTI绑定功能

由于存在存储器限制以及支持的并行信道数上限，简单地线性增加HARQ进程数量并不可行。例如，RTT为544 ms的GEO星座将需要如此众多的HARQ进程。对于LEO星座，3GPP同意根据UE的能力，将HARQ进程总数增加到32个。这需要将调度报文DCI HARQ ID字段更新为5位大小。作为可选项，RRC参数*harq-ProcessNumberSizeDCI*会显示是否将DCI字段HARQ进程数扩展到5位。为了支持NTN，而不对处理能力和UE存储器提出过多要求，3GPP同意允许禁用HARQ反馈，可通过RRC参数*HARQ-feedbackEnabling-disablingperHARQprocess*对每个HARQ进程进行配置。发射机从而得以使用HARQ进程进行连续的数据传输，不必被迫等待反馈，也不会造成卡顿情况。RRC还可以选择性地启用PDU 的自动重传以提高连接的可靠性。这种与任何反馈无关的盲重传类似于传统无线通信中已允许使用的TTI绑定等功能。

综上，网络可以选择以下三种调度选项之一：禁用（即无HARQ重传）、盲重传或扩展的 HARQ反馈。为避免UE对PDSCH过度监测，这种自动重传只允许在PDSCH PDU第一次传输后的特定时间窗口内进行。对调度机制可能产生的影响是，会导致MCS选择的目标BER降低，并且连接可靠性也会受到在确认模式（AM）下运行的RLC及PDCP层序列号计数过程的影响 [Ref. 10]。

图47: NTN的HARQ操作



为了适应更长的延迟，延长了HARQ反馈的响应时间。承载HARQ ACK/NACK的PUCCH由 HARQ定时器  $K_1$ 和附加NTN定时器  $K_{offset}$  予以推迟。大型RTT需要在DRX情况下对HARQ定时器进行一些更新；详见第5.12章。

未来的更新和研究主题包括用于减少确认的自适应HARQ进程ID定义和码块组聚合等 [Ref. 30]。在当前标准中，HARQ进程由传输块调度、接收过程及后续重传组成，由HARQ进程ID号标识。该ID允许在时域中灵活调度重传，但缺点是HARQ进程的扩展需要定义额外的 HARQ ID。自适应HARQ是一项研究课题，将在HARQ进程ID之间加入一些绑定或联络规则，从而减少使用更多HARQ进程时所需的ID数量。长延迟情况下的信道编码增强功能针对的是码块组聚合和减少确认的研究方向。5G NR支持将传输块划分为码块，并基于多个码块的聚合进行确认。当前的定义侧重于低延迟，缺点在于确认或HARQ仅与单个传输块相关。

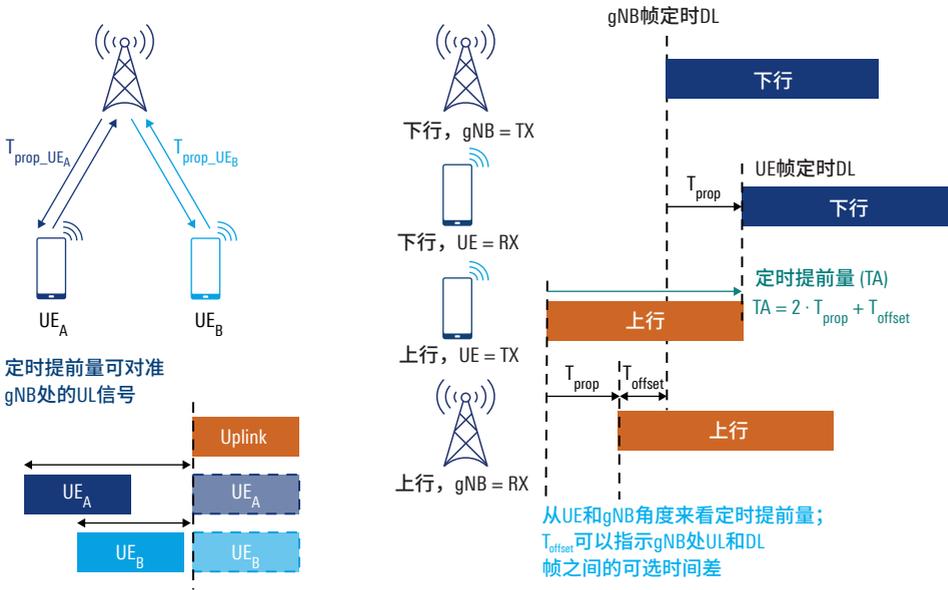
多个研究方向正在探讨跨不同传输块的信道编码，这种方式将允许减少确认 [Ref. 30]。

### 5.3 定时提前量

借助TX定时提前量 (TA)，蜂窝无线技术将实现一种机制，可以补偿传播延迟，并做到跨各种 UE同步接收所有上行信号。这种对准最初在连接建立（即RACH流程）期间执行，随后当连接建立并持续时，MAC层将在其控制下保持该时间对准并永久更新（参见 [Ref. 1] 了解TA的一般方面）。此处请注意，图48中的略图描述了定时提前量的目的及其可能的配置。

左上部分显示的情况是，gNB面临到UE<sub>A</sub>和UE<sub>B</sub>的两种不同的传播延迟，各TA值可在接收gNB时确保上行帧的时间对准。这简化了蜂窝网络中需要定时提前量的原因。图中右侧显示，TA需要补偿两倍的传播时间T<sub>prop</sub>，因为其在UL和DL之间对称。图中还指示了可选值T<sub>offset</sub>。通过该可选配置参数，gNB可以应用时间差作为DL帧和UL帧之间的偏移量。例如，稍后描述的NTN参数K-Mac或N<sub>TA,offset</sub>即为这种可选配置参数。

**图48：用于补偿传播延迟的定时提前量**



引入具有长传播时间特性的NTN需要修正现有定时提前量控制流程。随机接入流程需要处理这种较长的延迟，以避免丢失或失败的随机接入尝试，并提高与网络容量相关的效率。其次，在NTN连接期间，系统需要支持更长的定时提前量值以应对延迟。通过一些策略可以解决此问题。

地面网络中的随机接入时间对准流程分为两个步骤。首先，UE发送非同步PRACH信号，该信号到达时的延迟大约为基站天线传播延迟的两倍。长保护时间是PRACH时隙内定义的PRACH前置码的特性，可以防止这种延迟，也即使用SIB关于应当应用哪种前置码格式的指示，网络会间接指示其最大小区范围。由于对现有5G系统影响不大，有关新PRACH前置码的扩展和定义不在讨论范围内。在随机接入期间的第二步中，基站会测量延迟并在其响应报文(Msg2)中控制定时提前量调整 [Ref. 1]。NTN情况下大延迟的缺点是需要PRACH保护间隔，可能通过定义具有较长保护时间的新前置码格式来设置，导致整个系统变得效率低下。在随机接入流程中，较长延迟的解决方案是基于UE内部对卫星距离估计的先验定时提前设置，其次是引入定时器扩展，根据这种较长的延迟来对准报文流。相关解释请参阅第5.4章。

第二个影响不仅在于由UE到卫星的距离导致的长RTT，还在于由大波束足迹导致的高差分延迟（参见图39）。这些问题需要在连接期间永久保持时间对准，与地面网络类似，但这种时间对准需要处理更长的绝对定时提前量时间。关于更新定时提前量以及允许更长时间或更大TA更新值的最佳机制，已经进行了一些讨论。[TR 38.811] 讨论了gNB下行和上行之间的对准方面，这将导致UE侧RX和TX之间的较大偏移量，如图49上部所示。另一项建议讨论了gNB侧上行和下行之间更宽松的时间对准。例如，gNB可以应用系统帧序号移位作为时间偏移；参见图49中的建议。这是处理较长绝对延迟的两种机制，允许较长的定时提前量设置。

在考虑TA调整时，5G系统需要应对差分定时提前量问题，由于波束足迹较大，卫星和足迹内各UE之间的延迟并非恒定值，导致需对每个UE进行单独的定时提前量控制。NTN定时提前量调整的重点方面是拆分为小区或波束特定部分和UE特定部分。网络可以选择波束特定参考点，并通过SIB广播应为此RTT调整的定时提前量作为共同值。在下面的图49中，使用馈线链路上的延迟 $T_{feed}$ 和参考点处服务链路的延迟 $T_{serv\_ref}$ 来综合计算共同TA：

$$TA_{common} = 2 \cdot (T_{feed} + T_{serv\_ref}) / c$$

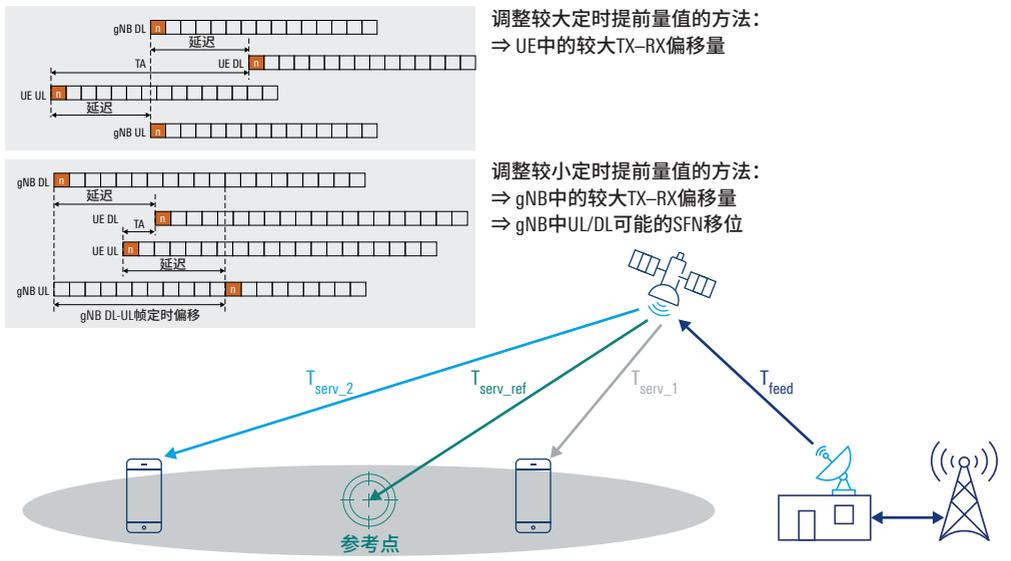
为了补偿由于波束足迹的几何形状而产生的不同延迟，可以使用 UE 特定的定时提前量值。

随后可以使用UE特定服务链路延迟 $T_{serv\_UE}$ 与到参考点的服务链路延迟 $T_{serv\_ref}$ 之间的差值来计算UE特定TA。

$$TA_{specific} = 2 \cdot (T_{serv\_UE} - T_{serv\_ref}) / c$$

剩余定时提前量为 $T_{Acommon}$ 和 $TA_{specific}$ 之和。

**图49： NTN中的定时提前量**



这些讨论的结果是，定时提前量值的定义取决于四个主要参数：UE估计的TA作为先验近似值；整个小区范围内使用的共同TA值和一种通过SIB广播的TA；TA计算的共同偏移；最后是闭环控制UE特定定时提前量。

NR-NTN UE在RRC\_IDLE/INACTIVE和RRC\_CONNECTED中应用的定时提前量由 [TS 38.213] 给出：

$$T_{TA} = (N_{TA} + N_{TA,offset} + N_{TA,adj}^{common} + N_{TA,adj}^{UE})T_c$$

其中：

$N_{TA}$ 对于PRACH定义为0，并根据RACH流程期间报文中2中的TA命令字段和连接期间的MAC控制元素命令(MAC CE TA) 进行更新。

$N_{TA,adj}^{UE}$  是用户自行估算的TA，用于预先补偿服务链路延迟。该值由通过GNSS定位估计的UE位置和基于UE拥有的星历表信息估计的卫星位置得出。

$N_{TA,adj}^{common}$  是网络控制的共同定时提前量，可包括网络认为必要的任何定时偏移。该值由更高层参数  $TACommon$ 、 $TACommonDrift$ 和 $TACommonDriftVariation$ 得出（如果已配置），否则支持其值为0。

$N_{TA,offset}$ 偏移是已在地面5G网络中用于计算定时提前量的固定偏移量。该值由更高层发出信号，取决于双工方案和频率范围。其目的是允许基站在上行帧之后调整其发射机，特别是与TDD网络相关时。时间偏移  $N_{TA,offset}$ 直接对应于在gNB观察到的上行和下行帧之间的时间差，例如，如果该值为零，意味着UL和DL帧在时域中绝对对准。该值与3GPP引入并在第5.5章中解释的参数K-Mac具有相似的行为。

综上，在定时提前量方面，NTN UE在接入网络时将预先补偿延迟（和多普勒频移），通过四个主要步骤进行：

1. UE确定其地面位置（例如通过GNSS或RAT定位）
2. 卫星在SIB广播中提供轨道信息、速度信息和共同参数
3. 基于估计的UE和卫星位置，由UE执行传播延迟计算
4. 最后，UE得出初始无线接入的初始定时提前量和频移。根据SIB设置，UE在RACH流程期间报告定时提前量

## 5.4 随机接入

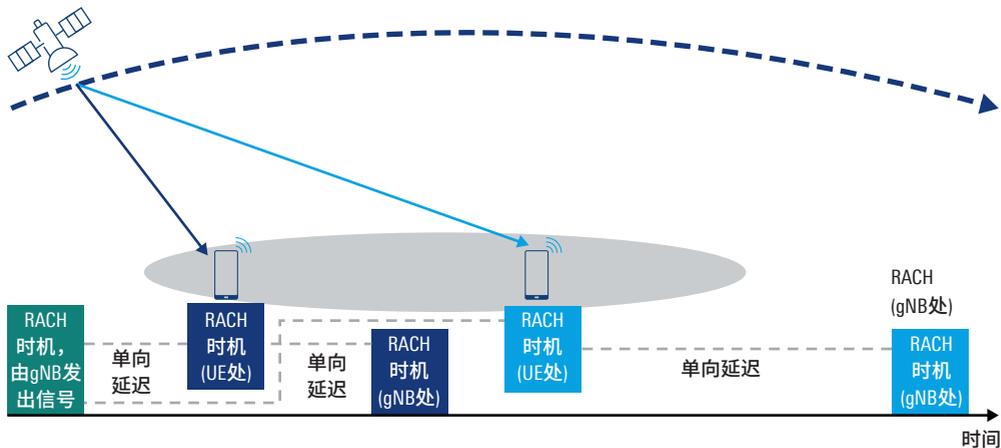
长RTT值影响NTN中的随机接入流程。我们可以确定大延迟对gNB和UE双方造成的各种影响。在gNB侧，长RTT可能导致一些浮动RACH窗口效应，并可能造成RACH模糊性恶化。UE会经历更长的呼叫建立时间，争用解决信令流程也会受到该更长RTT的影响。

### gNB的RACH损伤：浮动RACH窗口

首先，我们考虑发生在gNB侧的影响，该侧将显示浮动RACH时间窗口，即gNB预期会从UE接收PRACH信号的窗口。我们来更详细地研究该主题。gNB将这些时间窗口作为RACH时机窗口进行广播，即与帧结构对准，当允许UE发送PRACH序列时，gNB将指示时隙和帧 [Ref. 1]。由于波束足迹几何形状的性质和卫星相对于UE的相对运动，在gNB处接收这种PRACH取决于个别延迟。图50描述了此问题：具有不同延迟的两个UE将在gNB通知的RACH时机与gNB对上行RACH的相应接收之间产生明显的时间差异。

图50：影响RACH流程的差分延迟 – gNB视角

卫星轨道和波束足迹的形状需要浮动RACH窗口：  
gNB的RACH时机 → UE的RACH时机 → gNB的RACH RX ≠ 常量



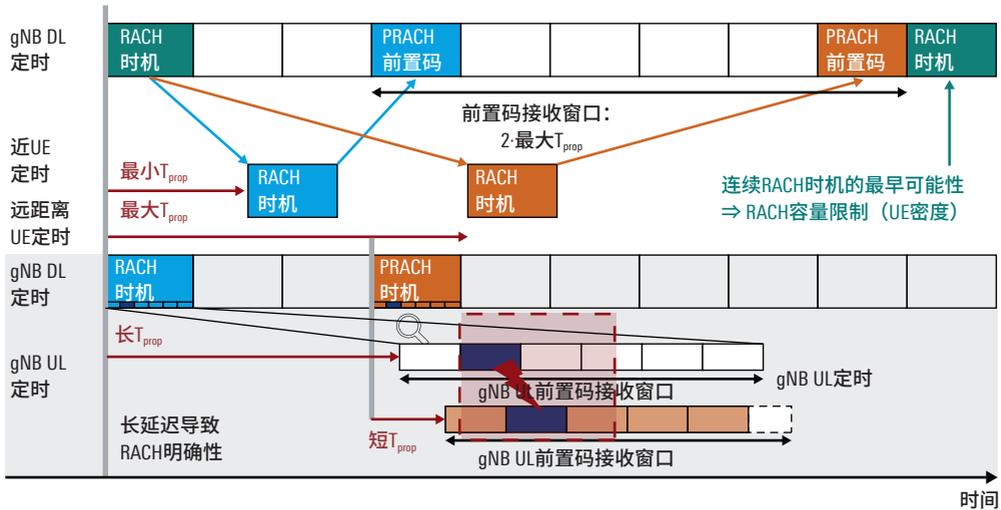
有关gNB差分延迟问题的后果和负面影响在于与RACH相关的容量方面，因为gNB可能需要为PRACH配置更长的接收窗口。同一NTN小区中的UE经历的差分延迟会导致前置码到达gNB处的时间不同。

在当前场景中，网络不能在最后一个可能的PRACH前置码到达之前调度连续的RACH时机。换言之，小区覆盖范围或波束足迹导致该覆盖区域内UE之间的最大差分延迟，并影响gNB处的前置码接收窗口时间。假设小区覆盖范围较大，UE数量较多，将存在随机接入碰撞和拥堵的风险，因此差分延迟方面在NTN部署的设计中起着关键作用。

### gNB的RACH非理想特性：PRACH时机的明确性

图51下半部分所示的第二个方面为PRACH歧义性。网络会通知PRACH时机，简单地说，这是为UE提供发送随机接入的各种机会的资源池。用作PRACH的信号序列前置码与相应的 PRACH时机之间存在直接关系 [Ref. 1]。图中下半部分显示了挑战：假设网络指示了PRACH 时机，并假设存在较大延迟，可能会导致这种关系、所选PRACH前置码和相应的PRACH时机之间的歧义性问题。较大延迟导致上行前置码接收窗口与连续的PRACH时机重叠，从而产生明确性。

图51：长延迟导致的PRACH歧义性影响

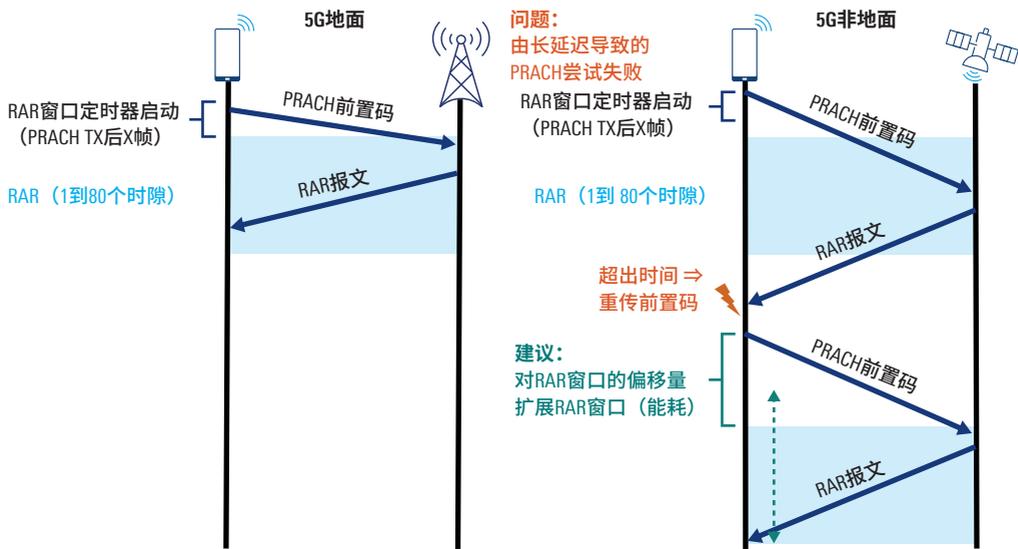


### UE的RACH损伤：RACH扩展和响应定时

从UE角度来看，长延迟对RACH流程的影响将作用于随机接入流程的第一步，即第一个连接建立信令流程。我们先快速回顾一下5G中的随机接入流程（有关RACH流程的更多详细信息，请参阅 [Ref. 1]）。UE在上行方向发送随机接入前置码 (PRACH)，并等待随机接入响应 (RAR) 报文 (Msg2)。Msg2响应将调度上行资源，使UE能够提交预定的传输，称为报文 3 (Msg3)，该报文将由下行方向的争用解决报文4 (Msg4) 应答。

NTN中的长延迟对随机接入流程会造成哪些直接影响？在发送PRACH前置码后，UE预期会在一定时间窗口内从gNB获得RAR。该RAR窗口在由 $msgB-ResponseWindow$ 给出的更高层配置时间开始，并且具有预配置长度。最坏的情况是，由于长RTT导致窗口外接收延迟，UE将错过gNB RAR报文，并且它将再次重传PRACH前置码。最初的建议是借助应用于参数 $ra-ResponseWindow$ 的时间偏移等指标来推迟RAR响应窗口的开始时间，或通过更长的 $msgB-ResponseWindow$ 来延长其持续时间，随后导致将会影响UE功耗的更长PDCCH监测。规范 [TS 38.213] 定义了RAR窗口在  $(T_{TA} + K-Mac)$  毫秒后的第一个符号处开始，其中 $T_{TA}$ 对应于定时提前量， $K-Mac$ 是由更高层发出信号的可选参数（参见第5.5章）。

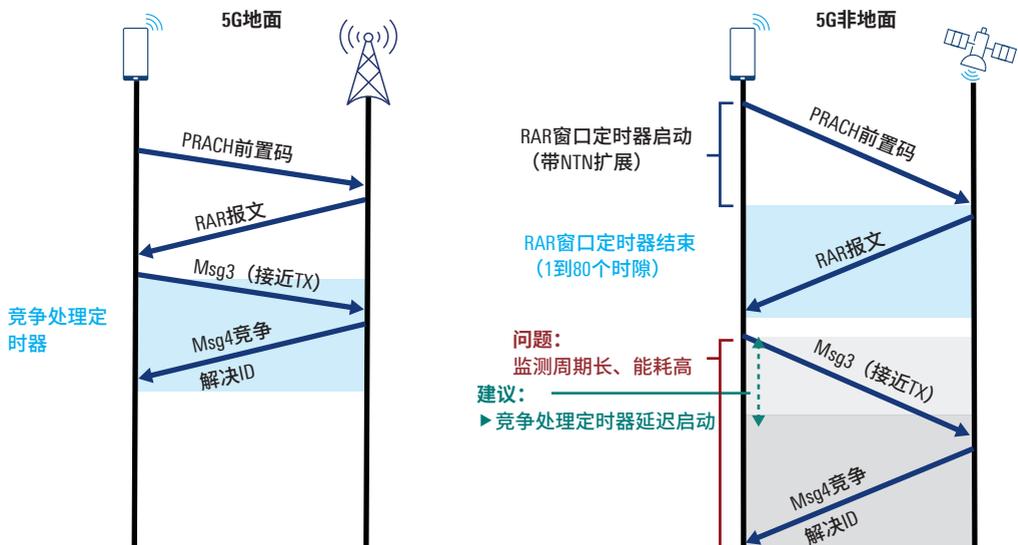
图52: 长延迟对随机接入流程的影响; 随机接入响应调整



### UE的RACH非理想因素: RACH竞争处理

当考虑基于竞争处理的流程时, 对随机接入流程的第二个影响是UE发送UL报文3 (Msg3) 作为对RAR的响应, 并从网络接收竞争处理标识作为报文4以解决竞争问题。定时器 $ra-ContentionResolutionTimer$ 定义了UE需要监测竞争处理反馈Msg4的时间段。对于长RTT 值, 该定时器应通过偏移量实现推迟或延长, 形成更长的监测周期。

图53: 长延迟对随机接入流程的影响; 竞争处理响应调整



## NTN中的其他RACH方面

在此应探讨的一个次要影响（特别是在小数据分组的背景下）是可选的预配置上行资源 (PUR)，其允许UE在没有先前随机接入的情况下发送小PUSCH PDU。引入此功能是为了优化效率，尤其是在物联网中零星传输小分组的情况下。为了确保可靠的通信，UE将在PUR响应窗口期间监测确认。由于IoT-NTN延迟更长，此响应窗口也需要延长，这可能会导致更高的能耗。或者，也可定义可选的偏移定时器来推迟此监测操作。

目前正在讨论对于整个流程时间的一些改进，例如应用2步RACH流程而不是4步RACH。此外也考虑将这种改进用于配置的授权调度和缓冲区状态报告。

未来的NTN部署将研究与增强的Aloha随机接入流程相适应的随机接入机制。当需要降低丢包率时，传统Aloha可能会受到低吞吐量的影响，因为可能发生RACH碰撞。对竞争处理分集或异步竞争处理分集等更新机制进行了研究；参见 [Ref. 34]。

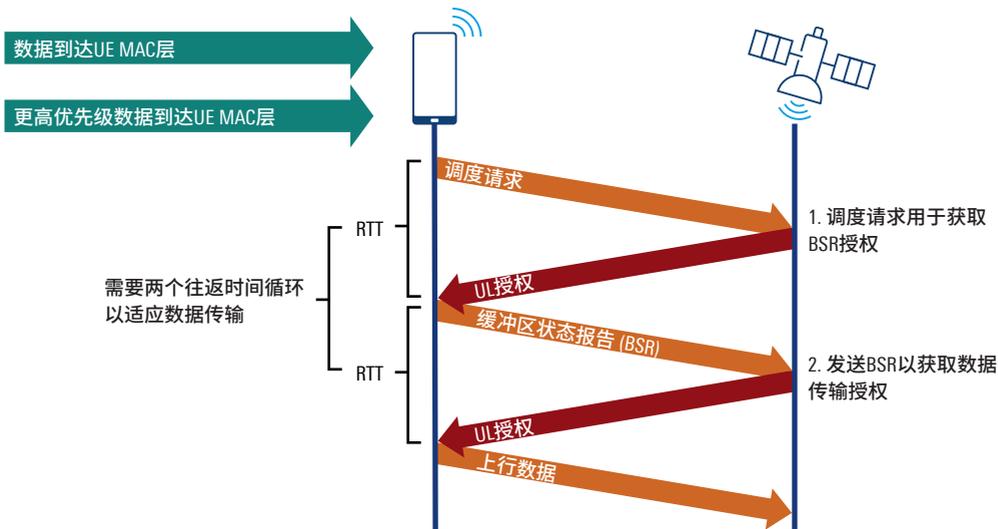
应用于PRACH的新波形不是当前规范工作的一部分，但会是未来研究的潜在前景。研究活动调查了具有更好的自动关联特性、优化的PAPR和带外发射的增强型PRACH波形，以减少 PRACH漏检数量 [Ref. 31]。

### 5.5 调度请求 (SR) 和缓冲区状态报告 (BSR)

UE的MAC层需要请求上行资源，以便在更高层应用的数据可用时立即传输。如果UE处于空闲模式，UE将使用RACH流程来发起连接。当已经处于RRC连接模式时，UE可以通过传输MAC控制元素调度请求来请求上行资源。数据传输流程的主要目的是维护和编排具有相关 QoS流的PDU会话。按照5G NR的定义，MAC层将RLC层的逻辑信道映射至MAC PDU或传输块并进行选择性复用。UE MAC层之所以发送调度请求 (SR) 报文以向gNB请求UL资源，可能有两方面的原因。一个原因是来自更高层应用的新数据到达TX MAC实体，第二个原因是来自更高层应用的数据以更高优先级到达MAC层。发送SR时，定时器*sr-ProhibitTimer*启动。在禁止定时器激活期间，不会再发起SR。*sr-ProhibitTimer*的到期时间目前可以在1 ms到128 ms之间配置。在延迟延长的情况下（例如GEO卫星），128 ms低于RTT，因此必须扩展参数范围 [R2-1818511]。调度请求ID (*schedulingRequestID*) 或开放调度请求的最大数量 (*sr-TransMax*) 等其他参数则视为满足要求。

除了可以通过SR请求新资源之外，提供潜在待处理数据状态信息的带内控制信息也已纳入MAC层。UE使用MAC格式作为带内信令，汇报作为缓冲区状态报告 (BSR) 的待处理数据量，以及作为功率余量 (PH) 的发射功率储备信息。借助更多细节，该BSR还将确定每个单独的已建立逻辑信道上的待处理UL数据量 [Ref. 1]。由于NTN具有更大延迟，对BSR重传 *retxBSR-Timer*的潜在修正可能会很有帮助。总之，较长RTT将影响连续的SR和BSR信令流程，导致整个流程时间延长。

图54：调度请求和缓冲区状态报告



### 5.6 定时关系增强

将与NTN引入5G相一致的一个必要目标是更新影响5G操作流程的定时关系，因为它们受到更长延迟的影响。例如：

- ▶ 上行传输时间的一般适配，也称为定时提前量（参见第5.5章）
- ▶ 与随机接入相关的定时行为（参见第5.4章）
- ▶ 与PUSCH的上行资源调度有关的定时
- ▶ 与PDSCH的下行资源调度有关的定时
- ▶ 与HARQ反馈对应的定时（参见第5.2章）
- ▶ 与UE报告控制信息有关的定时方面
- ▶ 与CSI-RS等参考信号有关的定时（这些信号应视为测量和报告的有效参考）
- ▶ 与UE对信道条件的假设有关的定时，例如TCI状态

3GPP内部已多次讨论如何以便捷高效的流程处理RTT的主要问题，并允许在部署方面具有一定的灵活性。简单说来，达成的一致意见包括定义定时偏移参数 $K_{offset}$ ，以及在gNB的DL和UL帧之间放置不对准的可选部署。对于后者，第二个时间偏移 $K_{Mac}$ 用于指示这种不对准。为应对差分及时变RTT，定时偏移量将小区特定部分作为第一部分，第二部分的值则可在直接信令中控制，具有UE特定性质。

#### 时间对准参数 $K_{offset}$ – 小区和UE特定参数

3GPP内部一致同意引入可选特定参数 $K_{offset}$ ，该参数由小区特定和UE特定部分组成。通过这种配置，网络能够解决延迟问题，也可解决差分延迟问题。例如，如图39所示，当UE位于波束足迹边缘时，小区特定偏移量将在波束足迹的天底方向对UE进行计数，而通过MAC层双边通知的附加UE特定偏移量将处理选择性发生的差分延迟。使用 $K_{cell,offset}$ 和 $K_{UE,offset}$ 之间的差值来计算 $K_{offset}$ 。参数 $K_{cell,offset}$ 由*ServingCellConfigCommon*提供，作为小区内系统信息广播的一部分，参数 $K_{UE,offset}$ 进一步提供了在初始接入后通过MAC CE元素单独调整该定时器的选项。

定时器 $K_{offset}$ 影响PUSCH的DCI调度、随机接入响应 (RAR) 流程和PUCCH的HARQ反馈。根据3GPP的讨论，它还影响CSI参考资源定时和非周期性SRS的传输定时。其单位为给定子载波间隔的时隙数。

目前正在进一步讨论 $K_{offset}$ 值是否可以按波束专门发出信号，以及是否可以使用MAC CE在初始接入后对该值进行更新。对于由时隙 $n$ 中收到的PDCCH命令发起的随机接入流程，UE会确定上行时隙 $n + K_{offset}$ 中的下一个可用的PRACH时机，以传输有序的PRACH前置码。

### 与PUSCH的上行资源调度有关的定时

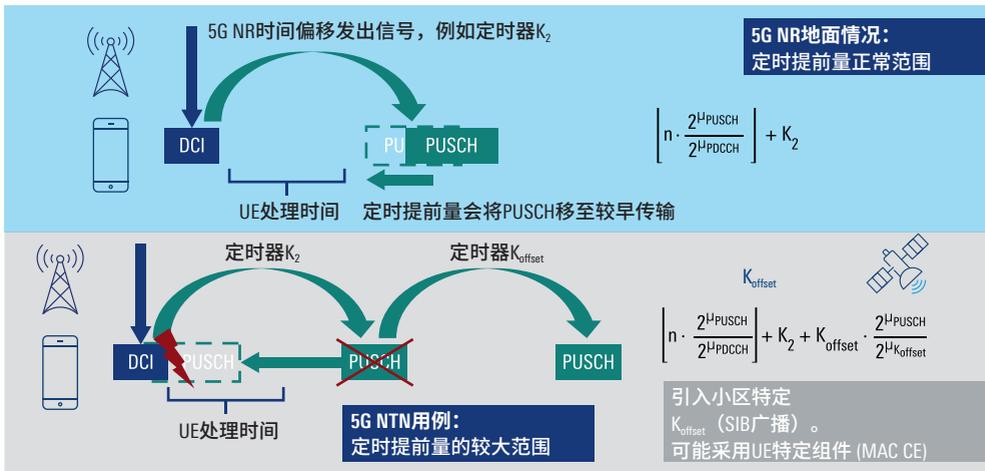
在考虑长延迟场景中的定时提前量校正时，会逐渐凸显对PUSCH调度定时方面的调整需求。图55上半部分显示了假设低延迟地面情况下的5G NR调度，下部则描述了经历长延迟时的各个方面。定时提前量校正将使TX在上行方向朝控制报文DCI的RX偏移。假设存在长延迟，定时提前量须为较大值，且可能与UE最小处理时间冲突。

规范 [TS 38.214] 将NTN中的调度时隙 $K_s$ 定义为：

$$K_s = \left\lceil n \cdot \frac{2^{\mu_{PUSCH}}}{2^{\mu_{PDCCH}}} \right\rceil + K_2 + K_{offset} \cdot \frac{2^{\mu_{PUSCH}}}{2^{\mu_{K_{offset}}}}$$

可以发出可选子载波间隔配置 $\mu_{K_{offset}}$ 信号，否则该术语仅将 $K_{offset}$ 视为时域调度的调整。

图5：PUSCH增强的DCI调度用于解决长延迟

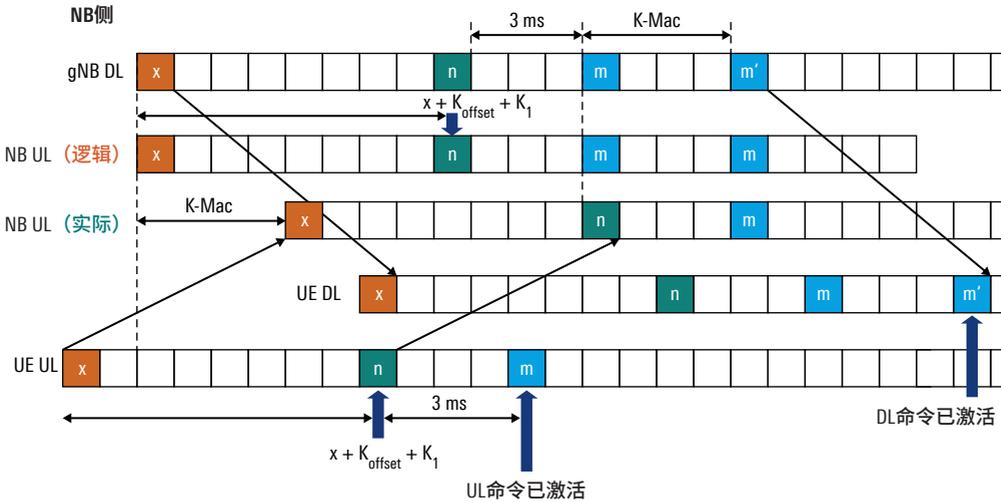


### 时间对准参数K-Mac用于支持网络UL和DL不对准

网络可以向UE提供可选的K-Mac值，该值说明了gNB侧DL和UL帧时间的不对准程度，并对通过MAC控制元素命令指示的下行配置很有帮助。定时器K-Mac对应于反应时间，即假设网络通过MAC CE发送一些应当执行的命令，UE应在一定时间内做出反应。首先考虑上行和下行帧在gNB内对准的情况，网络在时隙 $x$ 中发送MAC CE，UE在时隙 $m$ 中服从该命令，其中 $m$ 是基于定时器 $K_{offset}$ 和 $K_1$ 加上3个时隙的反应时间。在此情况下不需要K-Mac参数，其值被配置为零。

这种情况在下图中被描述为逻辑gNB UL。为缓解较大延迟，网络可以决定在gNB的UL和DL帧之间不对准，如下图所示的实际gNB UL。在此情况下，定时器K-Mac会以时隙粒度来解释这种不对准的程度。UE对时隙m'中的DL命令作出反应，其中m'相较于时隙m由定时器 K-Mac推迟。另一种使用参数K-Mac的情况是上行功率控制。

图56：网络UL和DL不对准K-Mac用于应对长延迟



### 用于报告控制信息的UE流程

为了在受遮挡无线条件下成功维护无线链路，要求UE对网络上报测量报告等控制信息。典型值为参考信号接收功率 (RSRP)、信道质量指标 (CQI)、信道状态信息 (CSI) 或秩指标 (RI)，以支持MCS、波束成形或MIMO等机制。由于与地面5G流程相比延迟更长，5G NTN存在边缘校正或自适应。UE使用PUCCH或PUSCH，根据 [TS 38.213] 中描述的规则来上报控制信息。为支持更长的延迟情况，网络可以选择性地向UE提供附加的定时适配参数  $K_{offset}$ 。假设向UE提供这样的参数，它将在时隙  $n + k + 2^{\mu} \cdot K_{offset}$  内传输相应的PUCCH/PUSCH反馈。请注意，如前所述， $K_{offset}$ 可能由小区特定部分和UE特定部分组成。UE在时隙  $k + 3N_{slot}^{subframe, \mu} + 2^{\mu} \cdot k_{mac}$  之后的时隙中应用UE特定参数  $K_{UE, offset}$ ，其中  $k_{mac}$ 由更高层作为K-Mac参数提供。

### 用于确定物理下行控制信道分配的UE流程

文档 [TS 38.213] 定义了使UE能够接收适当控制信息的流程和规则。引入NTN后，总体概念没有变化，即UE具有关于其控制和资源集 (CORESET) 的信息，同时UE也了解传输配置指示 (TCI)，比如参考信号之间的准同址指示。网络可以发送MAC控制报文来更新该TCI状态信息，指示UE需要稍后应用某个时间实例。对于NTN，这种定时关系现在略有更新。UE认为MAC CE激活命令适用于时隙  $k + 3N_{slot}^{subframe, \mu} + 2^{\mu} \cdot k_{mac}$ 。其中k为UE传输带有HARQ反馈的 PUCCH的时隙。支持更长的延迟场景，RRC层可以向UE发出K-Mac参数信号，用作此定义中的  $k_{mac}$ 。相同的定时规则适用于UE确定在连续上行TX的发射功率计算中应用的路径损耗值。

## CSI参考资源定义

信道状态信息参考信号 (CSI-RS) 允许UE执行与信道状态信息（例如RSSI和RSRP）相关的测量，特别是支持波束成形机制。需要进行澄清，定义TX方向上的CSI-RS与相关CSI报告之间的明确关系。[TS 38.214] 在时域中定义了这种关系：上行时隙n'中的CSI报告使用以下时隙中的CSI资源

$$n - n_{CSI\_ref} - K_{offset} \cdot \frac{2^{\mu_{DL}}}{2^{\mu_{K_{offset}}}}$$

$n_{CSI\_ref}$  对应于UE获得5G CSI 所需的最小测量时间；典型值为4个时隙 [TS 38.214]。NTN 中更长的延迟现在可以通过配置额外的定时器 $K_{offset}$ 来处理。利用指数系数 $2^{\mu_{K_{offset}}}$ ，PDSCH DL和CSI-RS之间可以使用不同的子载波间隔，从而允许未来的NTN网络配置中在SCS之间进行可选切换。如果不提供此适配系数，则该术语仅作为 $K_{offset}$ ，在仅限地面的情况下，该定时器可以设置为零。

## 与移动性和会话管理更新相关的定时器

对5G核心网功能的一个影响是，为了应对更长的延迟，会话管理和移动性管理中的某些定时器需要支持更长的值。初步意见为定义新参数**RAT类型**，通过向AMF指示NTN RAT来进行扩展。为此，在核心网功能和NTN UE中定义了扩展定时器来处理这种更长的延迟。

关于NTN导致的5G架构增强的研究 [TR 23.737] 建议更新属于会话和移动性管理的某些定时器。这些UE定时器持续时间的延长基于最坏情况下的往返时间 (WCRTT) 估计。建议参照下表。

**表14：受NTN影响的会话和移动性管理定时器**

	定时器编号	RTT传播延迟	建议增加的 (最小) 定时器值
<b>5GMM UE侧定时器</b>			
	T3510	5 FPS	5 WCRTT
	T3517	3 RTT	3 WCRTT
<b>5GMM AMF侧定时器</b>			
		无需更改，AMF会确定适当的值	
<b>5G SM UE侧定时器</b>			
	T3580	4 RTT	4 WCRTT
	T3581	1 RTT	1 WCRTT
	T3582	1 RTT	1 WCRTT
<b>5G SM SMF侧定时器</b>			
		无需更改，AMF会确定适当的值	

建议对以下定时器进行扩展和修正；有关定时器的一般信息，请参阅 [TS 24.501]。

- ▶ **T3510** 注册请求定时器，用于设置直到UE判断移动性管理情境 (5GMM) 成功建立为止的最大等待时间，如果定时器到期，则表示未成功建立。由于RTT较长，UE和AMF/SMF之间的报文传输需要较长时间，建议在终端内扩展此定时器
- ▶ **T3517** 服务请求流程定时器，用于指示5GMM从空闲模式转变为连接模式 [Ref. 1]。此定时器还会影响整个连接设置过程，需对其进行扩展，以避免较大RTT导致服务接受响应挂起，进而造成连接中断
- ▶ **T3580** PDU会话建立请求定时器，用于指示直到UE判断发起的PDU会话成功建立为止的最大等待时间，如果定时器到期，则表示未成功建立
- ▶ **T3581** PDU会话修改定时器，用于指示直到UE判断现有PDU会话成功修改为止的最大等待时间，如果定时器到期，则输出修改失败指示
- ▶ **T3582** PDU会话释放定时器，用于指示直到UE判断会话已释放为止的最大等待时间。当UE 发起会话释放时，定时器由UE启动。由于RTT较长，需要定义此定时器的扩展

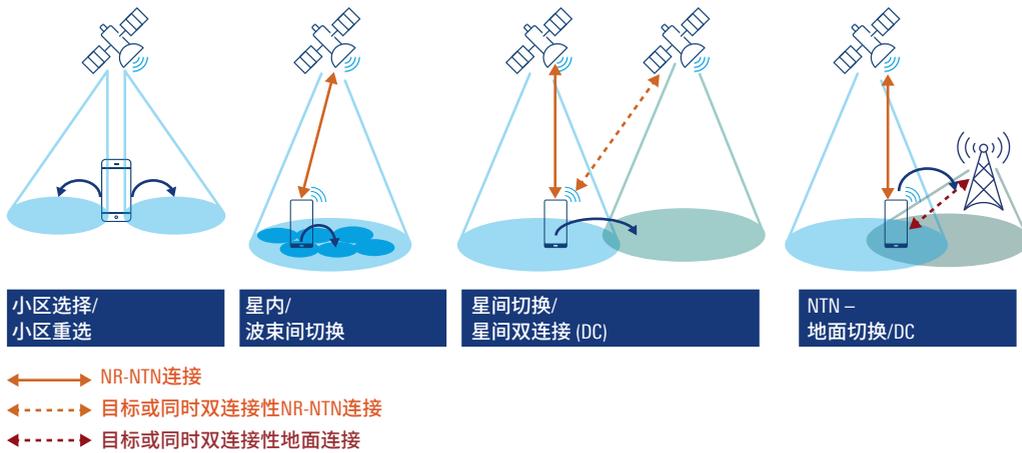
## 5.7 移动性场景

将NTN并入5G系统会影响当前对移动性方面的定义，如连接模式下的切换或空闲模式下的小区重选。一个明显的影响是由卫星运动触发的移动性流程。卫星本身的速度使其相对于UE快速移动，其次由于RTT更长，切换期间的中断时间可能更长，还可能导致可识别的服务中断。需要考虑以下几种移动性流程：

- ▶ UE处于空闲模式时的移动性流程，也称为小区重选，或者在更一般的情况下也称为PLMN 重选（参见第5.11章）
- ▶ 将连接从一颗卫星切换到另一颗卫星的移动性流程，即星间切换
- ▶ 星载 sNB与地面gNB之间的移动性流程
- ▶ 将连接从卫星内的一个波束切换到另一个波束的移动性流程，即星内切换
- ▶ 修改已分配无线资源的重新配置流程，即更改部分带宽 (BWP) 或频率信道

最后一项对应于可在5G内使用的一般重新配置流程。RRC层将控制无线链路，并可能执行重新配置无线资源的流程。常见示例为用于调度另一频率载波或BWP更改的RRC重新配置报文。从协议角度来看，NTN对这些过程没有直接影响，但较长的RTT可能会导致流程执行出现一定的延迟。

图 57: NTN移动性场景



初看起来，NTN的引入并不需要对现有的切换或小区重选流程进行新的信令更新，不过较长的RTT可能会导致一些延迟或中断时间增加。通过SIB广播的邻近小区信息可能会由邻近卫星的一些星历表和轨道信息进行扩展。在连接模式下，切换依赖于在上行方向发送的UE测量报告。就NTN而言，潜在的风险是，由于卫星快速移动，此类测量可能执行得太晚或报告不及时。总之，卫星速度会导致卫星可见性方面的问题，而长RTT会由于传播延迟而导致报文传输延迟。因此，网络可以使用预测切换等一些额外的技术来预测这种RRC流程。

在物理层上，如前所述，UE处确定的RSRP主要受FSPL影响，故而来自两颗卫星的两个RSRP之间不会存在巨大差异。因此，邻近小区的RSRP可能不是RRM移动性流程的唯一判断标准。移动性场景和流程在很大程度上取决于卫星星座的部署。从简化视角来看，可以将轨道信息知识视为移动性场景的支持参数。合理情况下，LEO星座通过至少两颗卫星影响一个小区区域的信号覆盖。由于卫星的星历表由卫星运营商控制，得益于卫星星座的优化设计，可以确保小区始终至少由一个有源波束服务。这意味着在切换期间，一个小小区应至少由两颗卫星同时可见，且切换流程作为RRC重新配置流程运行，用于更改服务小区。

两颗卫星之间移动性的主要变化是切换触发概念的变化。在地面网络中，切换由测量结果触发，例如UE向网络报告的RSRP，而NTN则可能需要额外的方法。图58左上部分描述了传统切换，即当基于车辆的UE从一个小区覆盖范围进入邻近小区覆盖范围时的情况。在这种情况下，我们常提到“X切换”，字符“X”表示先前服务小区接收功率电平RSRP下降，而新邻近小区RSRP功率增加。网络运营商会定义切换条件（例如这些功率电平之间的差值）作为切换触发准则。在NTN情况下，由于卫星的移动性，需要进行切换；但假设两颗卫星与UE的距离大致相同，则两种信号之间的功率电平差值微乎其微。

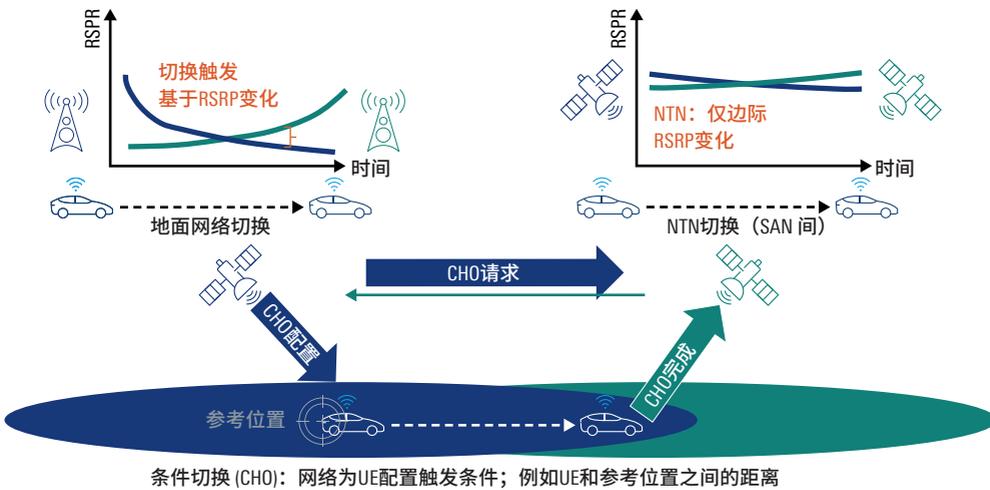
## 条件切换 (CHO)

为支持NTN切换，建议将3GPP中定义的方法应用到所谓的条件切换中。其理念是网络可以配置触发切换流程的特定条件。[TS 38.300] 将条件切换定义为当满足一个或多个切换执行条件时由UE执行的移动性流程。通过示例，这种潜在的切换条件准则可以描述如下：

最初，条件切换流程设置一些条件，例如，重新配置的候选小区收到的偏移量优于或劣于某个阈值（事件A3和A5），以允许UE侧具有一定的自主性，并减少信令开销，特别是对于只有零星移动性场景的UE。

在NTN情况下，这种条件可以是定义一个地面参考点，当UE当前位置偏离一定距离时，即满足切换条件，如图58下半部分所示。根据现有LEO卫星星座的经验，假设在NTN连接中大约每5分钟发生一次这样的切换。

图58：NTN移动性场景，条件切换流程

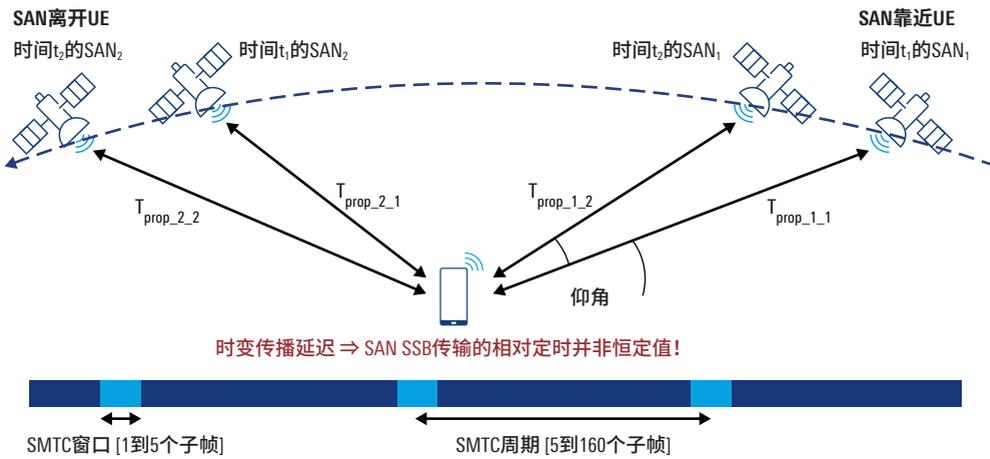


- ▶与参考点触发相关，另一个想法可以是UE和卫星之间的距离。简单而言，如果UE和卫星之间的距离超过最大距离，表示卫星离开可见范围，此时启动切换触发。
- ▶还有一种情况是，卫星连接只在一定时间内服务于某个区域，而LEO卫星的确定性运动将支持预期的切换触发。一个例子是UE角度的卫星轨道视图，如图40所示。假设UE具有卫星轨道的先验信息，可据此确定可见性，并针对定时器到期来定义条件切换。
- ▶与连接时间类似，另一个条件可以是配置卫星与UE之间的仰角作为准则。
- ▶类似于“UE与卫星之间的距离”触发，定时提前量值的信令也可触发条件切换。

### 移动性场景 – SAN变化

LEO星座中的移动性场景之一是不同卫星接入节点 (SAN) 之间的移动，与地面网络一样，UE 需要获取邻近小区的同步信息，例如SSB信号。5G NR定义了SSB测量定时配置 (SMTC) 以及连接中的潜在测量间隔，用于支持UE检测邻近小区的SSB。这种配置在地面网络中运行良好，来自服务小区和邻近小区的SSB的相对定时固定不变，传播延迟只会因UE的移动而变化。在LEO情况下，由于卫星的移动，传播延迟会随时间而变化。当考虑这种移动性场景中的多卫星情况时，SSB的相对定时也会随时间变化。在图59的示例中，我们假设UE监测两颗卫星。SAN1靠近UE，SAN2则离开UE。随着时间的推移，传播时间会因仰角和距离的变化而变化。SMTC模式的静态配置可能无法处理这种漂移，因为目标小区的SSB最终可能位于SMTC窗口之外。这可能导致UE不能检测和测量目标小区的同步信号。可能的应对措施是配置多个动态SMTC窗口。

图59：两颗卫星之间的移动性场景 – 小区接入的挑战



为了支持移动性流程，并符合卫星与地面非NTN gNB连接的透传模式结构，[TS 38.300] 定义了由卫星提供给gNB的几个控制参数。这些参数包括：地球固定波束的信息、该波束上的小区ID、小区参考位置（例如小区的中心和范围）、准地球固定波束、连续切换的时间窗口（馈线链路、卫星）、所有服务卫星和NTN网关的标识符和时间窗口、服务小区的标识符和时间窗口、地球移动波束、映射到NG接口上报告的固定地理区域的信息，包括关于波束方向和波束在地球上的足迹运动的信息。

### 5.8 测量和测量报告

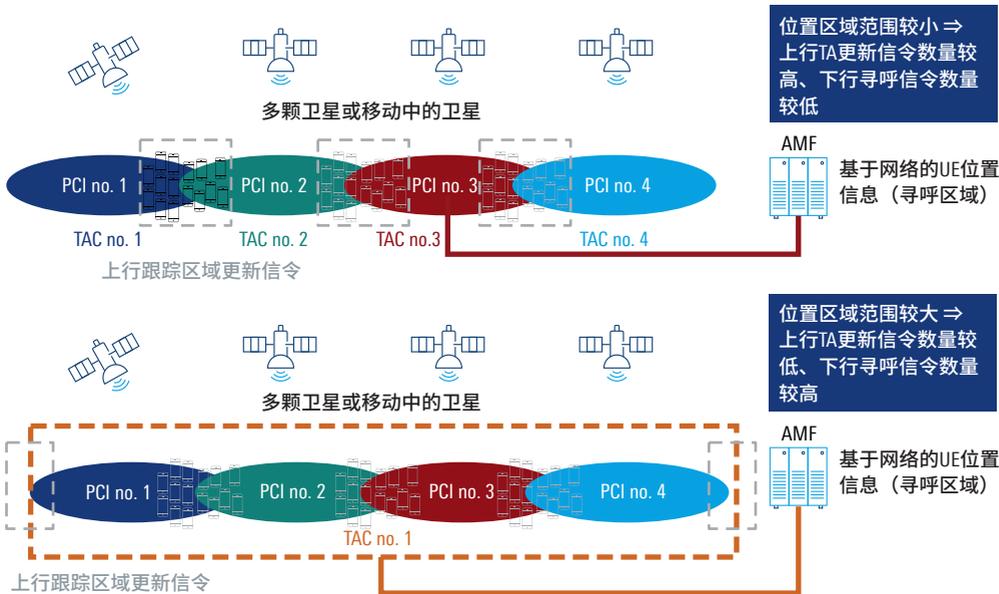
一般说来，引入NTN不会导致发生与UE执行的测量和这些测量的报告有关的重大变化。主要潜在风险是，由于存在长延迟，UE执行的测量会延迟到达gNB，这些测量因此过时。另外由于卫星的移动性，以及卫星可见时间较短，加剧了测量采集问题。因此，3GPP讨论了RRM 性能的一些优化方面。与其他流程类似，测量报告流程也可以利用UE先验已知的确定性轨道信息。

例如，这将允许基于UE位置或基于UE相对于服务卫星或邻近卫星的相对位置来触发此类测量报告。取决于法律方面和数据主权，UE还可以在发送至sNB的测量报告上附加其位置信息。将 UE位置与卫星的轨道信息相结合，可以预测即将发生的切换。网络可以将测量窗口的信号提前，从而补偿较大的传播延迟，并避免过时的报告。这种测量窗口提前可以通过系统信息广播或直接RRC信令予以通知。

### 5.9 跟踪区域更新 (TAU)

在地面网络中，引入跟踪区域 (TA) 弥补了存储在网络功能AMF中的UE行踪的流动性管理或位置信息与UE无线链路活动之间的差距，因为这会消耗电能。在空闲模式下，UE会监测系统信息广播中的跟踪区域码 (TAC)，并在TAC发生变化时发送NAS报文*TRACKING AREA UPDATE*。相比之下，网络在整个跟踪区域对移动终端呼叫使用寻呼过程。图60中的略图描述了用于跟踪区域更新的上行信令与用于移动终端呼叫建立的下行寻呼之间的权衡。假设TA 范围较小，如图中上半部分所示，上行信令数量较高，UE消耗大量电能，而网络对UE行踪有更准确的了解，这将减少寻呼的信令数量。在图中下半部分，假设TA范围较大，与TA更新相关的信令数量很低，而网络寻呼的信令负载较高。网络运营商会规划跟踪区域的大小，以最大限度降低上行侧和下行侧的信令负载。

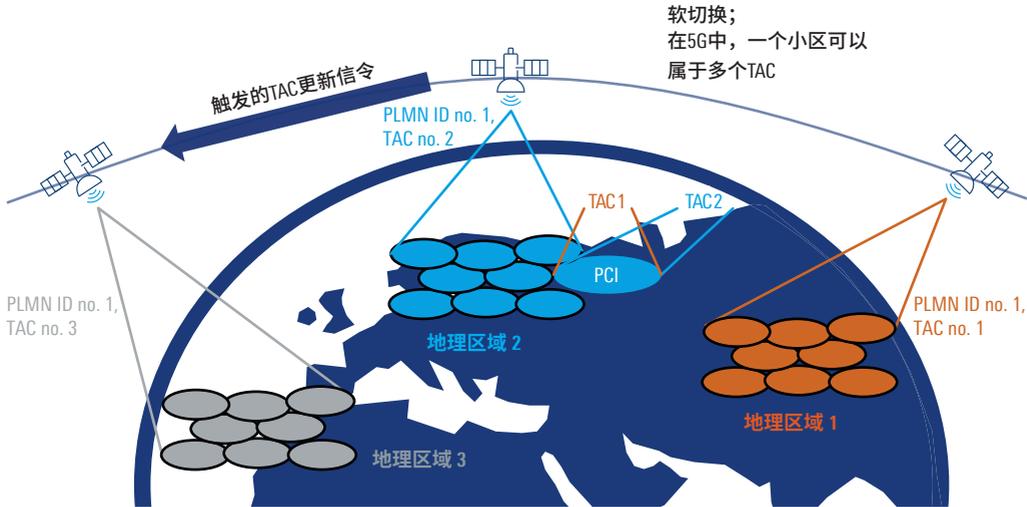
图60：跟踪区域大小与TAU和寻呼的信令



对于NTN，我们观察到一种范式变化，由于卫星相对于地球移动，举例来说，固定位置的UE 将在一段时间内检测到多个gNB变化，这可能导致NAS信令开销和低效率功耗。与地面接入网相反，NTN中的结果是，地理小区覆盖、物理小区标识 (PCI)、跟踪区域码 (TAC) 和注册区域码 (RAC) 的定义之间存在潜在脱节。

这可能会对与地理区域相关的功能产生一些影响，例如授权或计费 [TR 23.737]。为了解决这一潜在问题，3GPP中引入的对策是配置地球固定跟踪区域，即卫星gNB将适配广播的跟踪区域码（参见图61）。例如，当卫星飞过欧洲上空时，它会发送欧洲的跟踪区域信息，之后当卫星飞过北美上空时，则会发送与北美相关的跟踪区域信息。

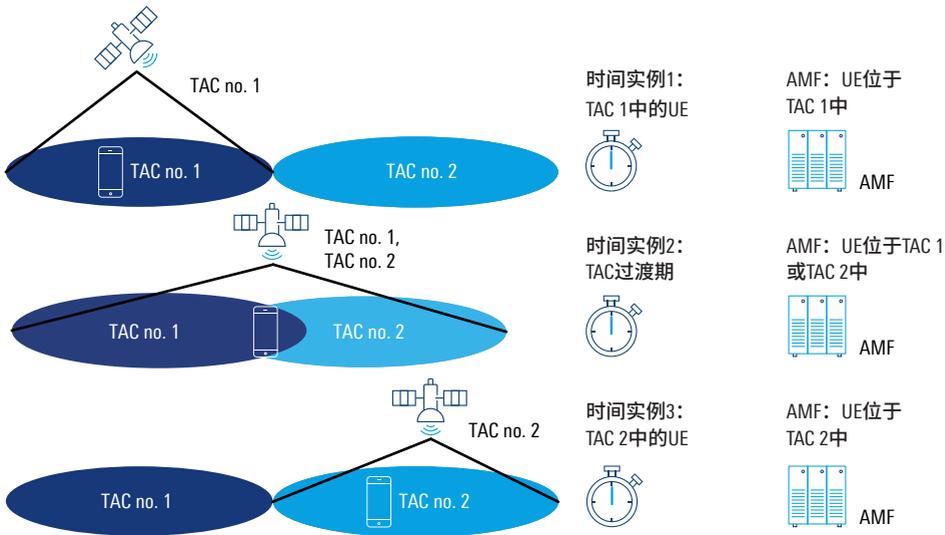
**图61：地球固定跟踪区域码信令**



如今一个gNB已经可以通过跟踪区域索引 (TAI) 列表发送不同的TAI，因此可以将多颗卫星 gNB归入单一TA。这将减少UE的注册区域更新信令，但会扩大网络拥有的关于UE行踪的位置认知区域。因此，为了弥合上行TAU信令与寻呼之间的广泛差距，需要执行全面的参数定义。[TR 23.737] 提出了一项流程建议，即当AMF识别出UE连接到NTN RAN时，将向UE发出注册/跟踪区域列表。由于关于卫星的星历表信息为先验已知，该TA列表将遵循接下来会出现哪个TA的预测。

此外，固定跟踪区域概念可以分为硬切换和软切换流程。使用硬切换时，SIB将广播单一 TAC，sNB在进入会带来不同地面覆盖的特定轨道位置后，将对TAC执行以旧换新。这种方法的缺点是存在一些波动或所谓乒乓跟踪区域效应的风险，需要潜在的TAU迟滞作为对策。在软切换流程中，一个sNB将同时广播SIB列表中的多个TAC。列表中TAC的添加和删除由与地面覆盖相关的定时器进行协调。其优点是NAS信令更为高效，特别是在TAC边界，而代价是寻呼协调方面可能出现一些不平衡。当允许这种多TAC概念时，AMF移动性管理中关于UE位置的信息会更不准确，这可能导致网络中NAS信令的复杂性增加。这种寻呼不平衡情况如图62所示，上下两部分的场景将UE的AMF位置信息描述为单一TA，而在中间部分，由于扫频和重叠跟踪区域，网络广播了两个TAC，网络信息更加不准确，对UE的寻呼报文需要在两个跟踪区域上进行广播。

图62：扫频跟踪区域码信令导致寻呼不平衡



为支持跟踪区域更新，现有流程可能进行扩展，增加时间信息，例如，卫星只在特定时间内可见（参见图40）。此外，为了支持小区重选和跟踪区域更新，卫星可能会广播生存时间信息，即卫星可见性可以持续多久的时间估计。

AMF支持UE移动性（例如切换）和移动终端可达性（例如寻呼）。目的是保持大部分现有小区重选和TA更新策略不变。鉴于采用地球固定跟踪区域的配置，并且由于物理小区标识（PCI）是指特定地理区域，5GC会在空闲模式下维护关于UE的位置信息。TA标识符和小区标识符在5GC和服务层中均用作关于UE位置的信息，即使在卫星gNB正在移动的情况下也是如此 [Ref. 10]。提醒读者注意5G中已有的一项功能：一个物理小区ID (PCI) 可能属于多个TAC或甚至PLMN ID，最初是为了支持跨运营商共享网络（例如MORAN）而引入。

### 5.10 馈线链路切换

如透传模式架构说明（第3章）所述，卫星通过地面网关与非NTN gNB相连。卫星和地面站之间的链接称为馈线链路，出于维护、容量管理或流量卸载等原因，以及非GEO情况下卫星移动的原因，可能有必要切换馈线链路。主要挑战在于，馈线链路切换可能导致针对所有受影响UE传输多个已建立的连接。此外，馈线链路切换可能需要在两个gNB之间过渡，或者更改AMF。因此，需要讨论几个流程性步骤。相应规范根据卫星能力的不同，在馈线链路硬切换和软馈线链路切换之间加以区分 [TS 38.300]。

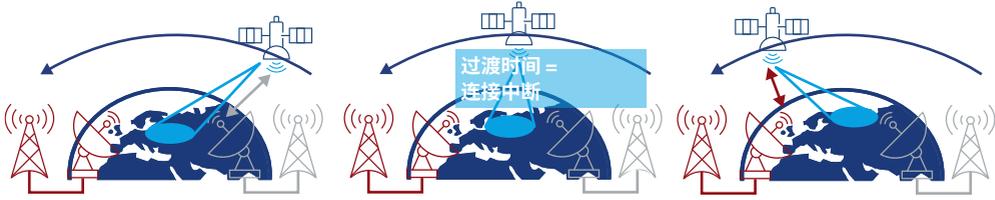
对于软馈线链路切换，NTN有效载荷连接能够在给定时间段内处理多个网关，即在馈线链路之间的过渡期内可以确保临时重叠。这要求卫星内部有能力维持至少两个馈线链路并行连接 [Ref. 30]。核心网架构中的更高层需要处理重复和分组丢失问题。

对于馈线链路硬切换，NTN有效载荷连接在任何给定时间都会建立到一个网关，即在馈线链路之间的过渡期内可能会发生无线链路中断。

因而需要对现有切换流程进行一些改进，相应地存在几种可能的情况。

图63：可能的馈线链路切换情况

采用连接中断和重选功能的馈线链路硬切换



采用双馈线链路的软馈线链路切换



采用网络辅助功能的馈线链路硬切换

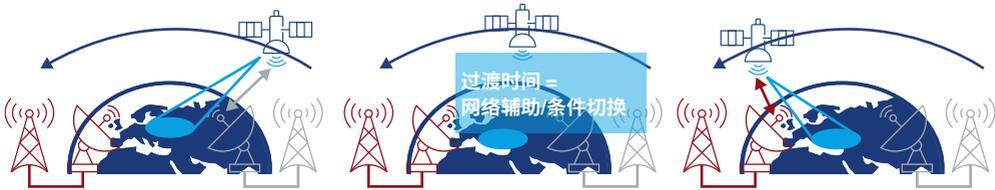


图63上部显示了透传LEO星座的馈线链路硬切换。所示的假设为地球上的地面站连接到不同gNB的透传情况，也即会从gNB<sub>1</sub>切换到gNB<sub>2</sub>，从而导致小区变更（即使波束足迹保持不变）。该场景假设卫星存在一次只能由一条馈线链路提供服务的能力限制。基于Rel-15 NR的假设，需要丢弃由gNB<sub>1</sub>提供服务的所有UE的RRC连接。馈线链路切换会导致连接中断，很可能还会导致小区变更。在gNB<sub>2</sub>接管后，UE能够找到对应于gNB<sub>2</sub>参考信号，并对属于gNB<sub>2</sub>的小区执行初始接入，重新建立连接。

图63中部显示了一种可能的解决方案，旨在实现软馈线链路切换的服务连续性。在过渡时间，卫星至少由两个网关提供服务，直到馈线链路切换完成。这种方法的优点当然是无缝服务的连续性，能够最大限度减少对UE的影响。除了要求卫星能够同时支持两个馈线链路，另一项挑战是，在地面上的两个网关都连接到不同gNB的情况下如何对小区进行处理。在涉及不同gNB的情况下，为支持这种软馈线链路切换，建议两个gNB可以利用卫星的不同无线资源，以确保两个gNB同时对UE可见（重叠覆盖区域）。在切换期间，未来的gNB<sub>2</sub>可能开始在与gNB<sub>1</sub>不同的同步栅格点上传输小区定义的SSB。UE将发起由RRC控制命令触发的从gNB<sub>1</sub>到gNB<sub>2</sub>的切换流程。该流程可能是在没有先前测量及其报告的情况下由网络指挥的盲切换决策，也可能是在已有测量报告的辅助下由RRC指挥的切换。还可以根据运营商的部署，选择应用条件切换（即CHO，参见第5.7章）的配置。

这种CHO参数化的一个例子可以是定义定时器到期，用于触发从gNB<sub>1</sub>到gNB<sub>2</sub>的切换。此外，基于CHO的移动性解决方案可能还需要减轻RSRP的依赖性。其原因是，由于参考信号发射自同一个卫星，UE可能会观察到源和目标gNB所提供服务链路的RSRP/RSRQ非常相似。一种解决方案可能涉及网络实施，例如为CHO设置适当的事件A5阈值以支持移动性。事件 A5定义了主小区变得劣于绝对阈值1，而邻近小区变得优于另一个绝对阈值2。此外，CHO 准则配置改为依赖于无线传播时间，或与RSRP/RSRQ无线测量相结合。

图63下部显示的也是透传LEO星座的馈线链路硬切换。与上部所示馈线链路硬切换的主要区别是，这里的网络将向UE提供辅助信息，以减少中断时间并支持连接重建，类似于早期RAT 世代中的网络辅助小区变更 (NACC) 等信令流程。如果假设在过渡期间仅有一个通过同一卫星服务的馈线链路连接适用，这意味着在过渡期间服务小区的信号将不可用。为了再次对服务单元提供UE接入，在此提出两种可能的方案：

- ▶ 基于精确时间控制和应用CHO信息的馈线链路硬切换流程。此流程的基准是网络内的精确定时控制和同步中断时间。网络能够预测并依赖过渡期的时间，即网络可以确切知晓在来自gNB<sub>1</sub>的信令停止后，来自gNB<sub>2</sub>的信令何时恢复。凭借这种精度和先验信息，网络可以配置以时间信息为触发条件的CHO流程。因此，UE不应在收到切换命令后立即发起切换流程。相反，UE应当在目标gNB可见后发起切换流程，因而切换激活时间应当包括在对所有已连接 UE的切换命令中。
- ▶ 馈线链路硬切换流程基于条件RRC重建。考虑到NTN小区覆盖范围较大，对于发起切换的 gNB来说，在短时间内向大量已连接UE发送多个切换命令可能是一项挑战。这可能会造成一些UE无法及时执行切换的问题。因此，可能会检测到无线链路失败 (RLF)，UE随后发起RRC重建流程。负面因素在于这种RRC重建将涉及RACH流程，并可能导致网络过载的情况。遗憾的是，这种硬切换可能需要很长时间来恢复RRC连接，这可能涉及RLF检测、小区选择以及潜在的重建失败。最后，这可能会对整体服务连续性产生负面影响。为了支持UE并避免服务连续性的这种长时间中断，改由网络提供辅助信息（例如下一个小区标识和/或重建条件）来触发UE的RRC重建可能很有帮助。在称为网络辅助小区变更 (NACC) 的方法中，关于目标小区的信息通过双边RRC控制面连接单独发送，与方法不同，对于NTN场景的情况，辅助信息可以通过SIB而非专用信令向UE发送，以减少总体系统开销。

当然，也可以将馈线链路切换前后的两个网关都连接到同一个gNB，理论上小区和连接可以保持有效状态，并且不发生切换。这需要大量细节，例如链路切换前后下行信道的精确时间，参考信号配置的维护，此外gNB还需要保持安全密钥不变，以使这种馈线链路切换对UE 尽可能透明。

与之相对，gNB发生变化时，馈线链路切换可能还包括核心网变更，即AMF更改，随后需要执行漫游中的PLMN切换等已知流程。为简明起见，我们将不会进一步深入探讨这些方面。

### 5.11 NTN和跨国移动性管理

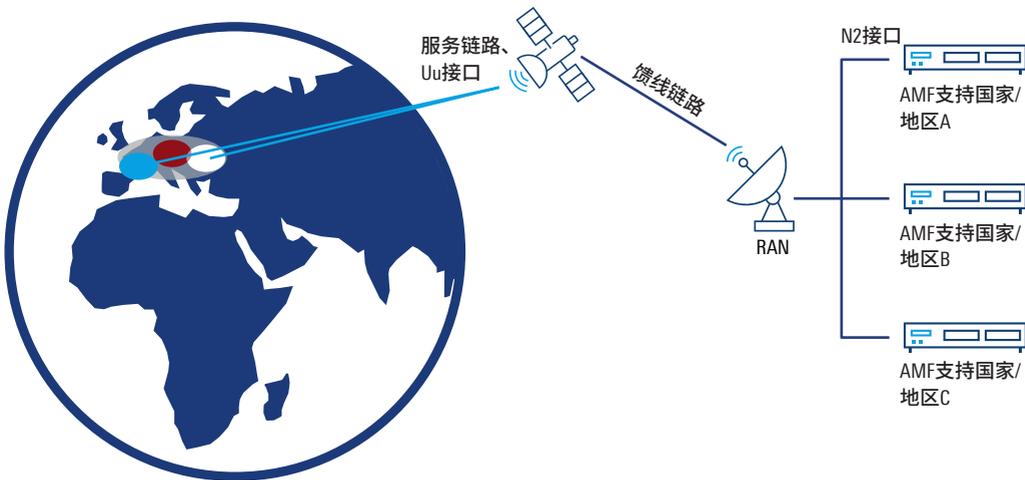
3GPP进行的调查用例和服务场景的研究 [TS 22.822] 概述了对跨境服务连续性的要求。其中包括这些情况：卫星跨国家/地区A、B之间的边境提供信号覆盖，并连接到两者中任一国家/地区的UE；或者相反，居住在A国的UE用户可以选择由 A 国运营商提供的卫星服务，也可选择B国运营商提供的卫星服务。运营商PLMN可能同时拥有地面3GPP接入和NTN接入。逻辑上，我们将两种RAN和两个N2实例视为彼此独立，并假定它们处理不同的接入类型（另见图 21）。

目前的地面5G网络通常部署为仅在一个国家/地区内提供无线覆盖，履行该特定国家/地区的相关监管义务。另一方面，基于NTN的网络可能覆盖多个国家/地区或国际区域，例如海洋。3GPP就如何在这种跨境情况下遵守法律和监管要求进行了进一步的讨论和调查。

一种技术扩展是NTN RAN和5GC功能之间的逻辑分离，特别是作为移动性管理锚点的AMF。AMF因此可能需要验证UE是否位于允许AMF服务的区域或国家/地区，以及RAN能否连接到各种不同的AMF（参见图 64）。该验证可由RAN辅助进行。

现有5G移动性管理需要进行扩展，以应对卫星系统规模的接入网覆盖。简言之，过去的单一国家/地区网络需要能够应对未来的全球连接服务。此外，在未来场景中，单一PLMN可以同时拥有卫星和地面3GPP无线接入，UE移动性也应当可以在这两种接入类型之间切换 [TR 23.737]。

图64：NTN和跨国移动性管理



NTN系统架构应支持在共享5G多运营商核心网 (MOCN) 的架构中在多个核心网之间共享卫星接入网的部署。在这种情况下，共享卫星RAN针对其核心网可用的两个PLMN广播系统信息。此外，这些PLMN也可能具有不同的移动国家代码 (MCC) [TR 23.737]。

在选择AMF时，如果NG-RAN节点检测到UE位于与AMF所服务国家/地区不同的国家/地区，NG-RAN节点会实施 [TS 38.410] 中定义的**NAS节点选择功能行为**。

对于RRC连接的UE，如果NG-RAN节点检测到UE位于与AMF所服务国家/地区不同的国家/地区，NG-RAN应执行NG切换，以变更为适当的AMF。

## 5.12 NTN UE节电

UE能耗对于支持NTN的设备显然至关重要，尤其是IoT-NTN设备。NTN部署的目标区域为边远地区，因此，频繁对蓄电池充电或频繁更换蓄电池或许行不通。设备可能支持能量收集方法和技术，但这些方法不是本章的重点。我们将着重探讨NTN的无线前端部分。粗略看来，当前RAT中已普遍引入节电技术，没有理由不实施这些技术（参见 [Ref. 1]）。不连续接收 (DRX)、节电模式 (PSM)、唤醒信号 (WUS) 或延长睡眠模式等机制的工作原理与基站类型无关。IoT-NTN标准化的目标是尽可能重用地面网络。有关这些节电技术的概述请参阅 [Ref. 37] 和 [Ref. 1]。

### 小区采集 – 节电方面

NTN中一个具有挑战性的方面是小区的采集，因为与地面RAT不同，NTN站为机载形式，特别是在LEO星座中，卫星只能在短时间内可见。当卫星出现在地平线上某一仰角之上时，即可以捕获信号 (AOS)，反之，当卫星下降至最小角度以下时，将发生信号丢失 (LOS)。此外，特定地球位置也可能没有永久覆盖。在这种情况下，UE完全检测不到任何卫星。如需利用小区采集，一项假设是UE在一定程度上了解卫星星历表和轨道信息。此外，对IoT-NTN设备的要求是支持GNSS功能以确定其地面位置。借助这些信息，UE可以先验得知是否值得开始小区采集，或是更适合保持断开连接。宽松条件为不强制要求UE同时运行IoT-NTN和GNSS。提供星历表非常必要，例如，UE可以预先补偿由于地球和卫星站之间距离较远而产生的长延迟所造成的时间偏移，UE也可预先补偿由于卫星移动而产生的多普勒效应所造成的频率偏移。由于存储器大小有限，标准化必须仔细考虑需要多少星历表信息。在考虑需要在IoT-NTN设备中存储数千颗LEO卫星的轨道星座的情况时，这一点尤为重要。

### 跟踪区域更新和小区选择 – 节电方面

UE的功耗也受到某种移动性的影响，明显的例子是跟踪区域更新 (TAU)（参见图60）。对于NTN，允许一定程度的网络移动性，特别是在考虑相对于地球表面的移动波束时的小区覆盖移动性。标准化组织内部的一项建议是定义地球固定跟踪区域，并允许每个SIB有多个TAC，这对UE功耗具有积极影响（参见第5.9章）。

在潜在部署的假设中，IoT-NTN可作为地面物联网的补充，但UE不太可能在NTN和地面小区中同时处于RRC空闲模式。为了避免频繁及大量执行小区重选，可以定义潜在的偏移值  $Q_{offset}$ 来影响小区选择和重选的迟滞现象。

### NTN中的DRX

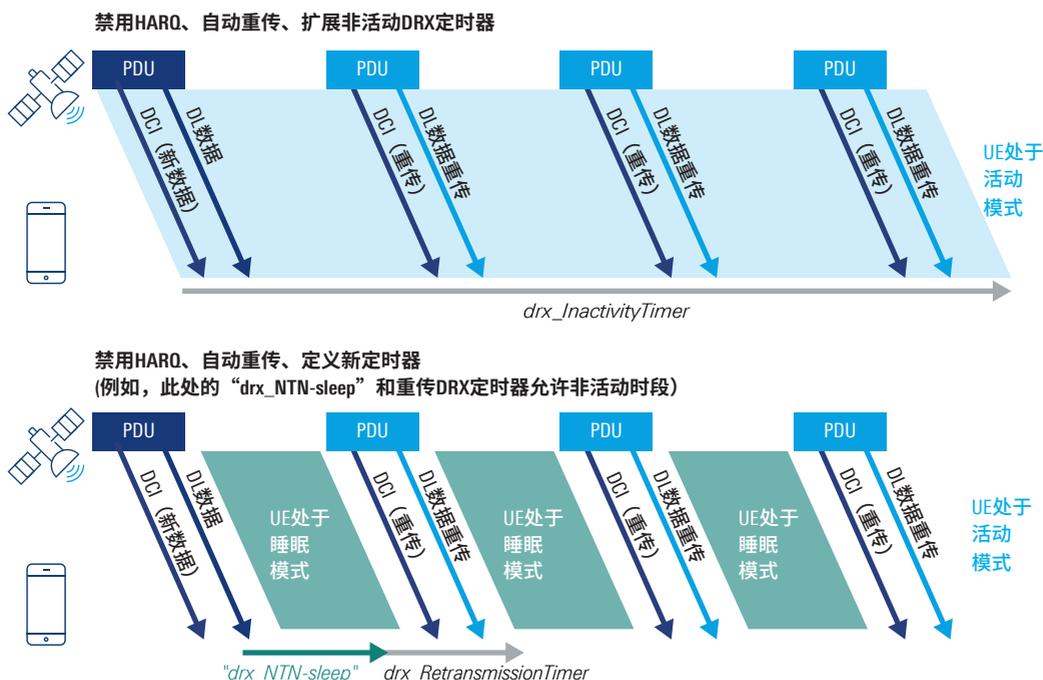
不连续接收 (DRX) 代表与节电有关的基本方法，这种方法允许配置非活动时间。现有DRX配置细节继续适用于NTN，但需要探讨一些调整。

卫星相对于UE移动，并且不提供永久覆盖。假设某网络配置了较长的DRX时间，并且UE将回到唤醒模式，可能会出现卫星不再可见而UE为搜索小区消耗大量电能的情况。为避免这种情况，UE可以获取星历表信息，由此确定是否有可能检测到卫星站，并可能暂停和推迟小区搜索过程。

IoT-NTN的目标是每个UE的活动系数为1%，因此它在大部分时间都将处于节电模式，这一假设会影响节能方面。请注意，与地面物联网一样，并没有这种QoS参数支持，因而基于NTN通信的服务很可能是尽力而为的QoS服务。

出于节能降耗目的和长延迟缓解策略，HARQ进程可与DRX协同运行。对于NTN，可以扩展HARQ进程的数量，可以禁用HARQ，此外为了利用可靠的通信，网络还可以选择自动盲重传。结合DRX流程，网络必须调整 $drx\_InactivityTimer$ （已针对Rel-15进行了相应的定义），以确保UE接收到盲重传。这种操作的缺点是延长活动模式会导致更高的功耗。另一种选择是正在进行的关于引入新DRX定时器的讨论。在图65示例的下半部分，定时器 $drx\_NTN-sleep$ 代表这种定时器操作的示例名称。目的是将其用作 $drx\_InactivityTimer$ 时段内的一种NTN专用非活动时段指标，允许UE在连续盲重传之间进入睡眠模式。

图65: HARQ操作与DRX结合 – 两个示例

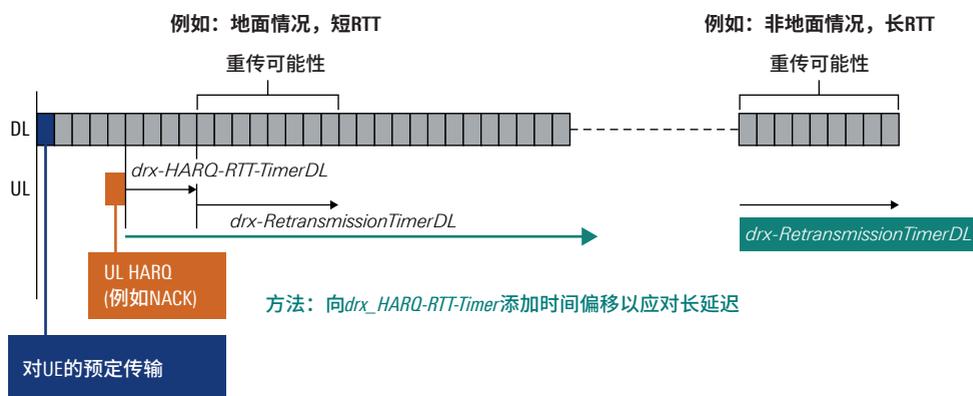


因较大RTT与DRX操作相结合而产生的另一项挑战是需要重新调整*drx\_HARQTimer*。在5G NR DRX操作中, UE在传输HARQ确认后启动该定时器。定时器定义了该特定HARQ进程的下一预期重传发生之前的最短时间。*drx\_RetransmissionTimer*将激活UE接收, 用于PDCCH调度。延迟较大的后果是HARQ重传会超过定时器的持续时间。如图66所示, 应对措施是为此*drx\_HARQ\_RTT-Timer*引入可选偏移量。此定时器可以设置为零或禁用。

5G技术的一项可能的扩展是, 用于DRX操作的定时器由MAC控制元素 (MAC CE) 和RRC层控制 (详见 [Ref. 1]) , 为便于快速激活和停用, 可由DCI调度报文来控制NTN网络中的这些定时器行为。

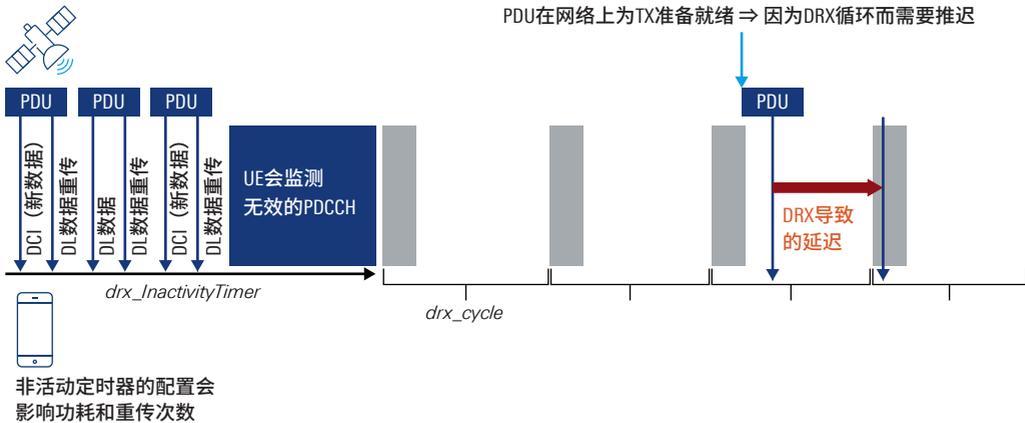
图66: 长延迟对用于HARQ和重传的现有DRX定时器的影响

采用DL PDU传输和NACK的DRX



DRX定时器的设置和配置至关重要，在节电和对端到端数据连接中所经历延迟的总体影响方面起到关键作用。对于长延迟，网络可以配置DRX循环的长周期或短周期。图67中提供的示例显示了这种影响。首先，DRX非活动定时器的配置会影响在停用或减少HARQ操作的情况下可以成功接收的盲重传和连续数据PDU的数量。其次，较长的DRX循环长度对能量消耗存在有利影响，但会产生额外的延迟，因为如果网络具有准备传输的PDU，它可能会因为正在运行的DRX循环而推迟传输。

**图67：长延迟对DRX定时器的影响 – 两个示例**



支持节电模式的未来前景是物联网设备的群集行为和“采集者”UE的配置。3GPP Rel-17增加了中继机制，用于增强最初针对V2X业务的侧链路操作。现在可以假定物联网设备将具有增强的节能功能，提供与卫星的IoT-NTN连接，收集和存储各个终端用户物联网设备的数据，还可对无线链路进行中继。

# 6 技术展望、归纳和总结

## 6.1 3GPP Rel-18中的NTN – 对第18版后续标准的展望

3GPP Rel-17时间表确定了该版本于2022年夏进入冻结状态。不过早在2021年夏，3GPP即已开始为即将制定的版本（Rel-18）征求议题，并在12月21日的会议上正式批准了Rel-18的立项工作。如预期那样，Rel-18将继续研究5G系统内NTN的技术演进，并讨论将多个新功能纳入5G NR的问题。Rel-17被视为NTN进入5G的开端，主要关注透传模式架构、FR1频率范围以及作为第一项服务和用例的NR-NTN，而即将制定的Rel-18则会致力于NTN功能的扩展。从用例角度来看，NR-NTN和IoT-NTN的划分将予以保留，不过Rel-18将致力于纳入各种方法，以使基于卫星的通信也适用于IoT设备，并对NR-NTN用例进行增强。与技术演进相一致的目标是增加馈线链路的容量，由于效率提升而降低UE侧的功耗，以及降低最终用户终端的成本，特别是VSAT型UE。在卫星方面，技术改进应当支持部署更小的卫星。我们将围绕Rel-18及后续版本纳入的某些技术特性展开探讨。

将NTN**频率扩展至FR2**是工作项目之一，用于为NTN启用10 GHz以上的频率。这包括第3.2章所述的关于Ka或Ku频段的讨论。与之前一样，挑战是在FR2中定义FDD双工模式（FR2现仅用于TDD），其次是定义FR1和FR2之间的间隔，以便有可能实现8 GHz至24 GHz范围内的频率。此外，Q、V和E频段的频率是NTN未来的潜在候选频率。

**再生模式架构**是讨论主题之一，通过支持卫星中的更大内置处理能力来扩展透传模式，长期目标则是将该卫星逐步转换为自主飞行的gNB。有关再生模式的详细信息已在第3.10.3章中进行说明。

**支持NTN的UE无需定位功能。** Rel-17认为支持NTN连接的UE也应支持GNSS等定位功能，不过Rel-18不再将此功能视为必要条件。有关网络验证UE位置的工作项目允许网络对UE进行定位或验证所报告的UE位置。

**NR-NTN和地面NR移动性**作为工作项目之一，通过实现地面和NTN 5G之间的切换并引入复杂设置（如地面和NTN链路之间的双连接）来对移动性场景进行增强。

### 支持NTN语音的信号覆盖增强

**高空平台系统 (HAPS) 支持**，通过允许除卫星型节点外的其他机载站类型来扩展架构结构。

**像Rel-17一样，IoT-NTN性能和功耗增强**首先将间歇性延迟的小分组传输作为优先用例考虑。增强功能将包括有选择地禁用HARQ反馈、改进长连接时间内的GNSS运行以及降低空闲时段的GNSS功耗。

**IoT-NTN重点关注非连续覆盖增强**，并将探讨稀疏星座场景中的节电机制，也即避免因无效的卫星或小区搜索流程而导致的能耗。此外，在非连续覆盖情况下增强RRC重建流程将是Rel-18工作项目的一部分。

**IoT-NTN移动性增强**将出于效率原因调整一些流程。请注意，物联网一般没有切换流程，因而可以通过更新RRC重建机制来增强移动性。举例来说，一种方法是有条件的RRC重建，其中网络和UE可以配置重建连接时的条件。这里的目的是节省RACH开销。对于可以进行切换的MTC类型的物联网，方法是配置类似于NR-NTN的移动性流程，例如基于位置或定时的条件切换。为了兼顾容量和移动性，Rel-17无线链路故障和载波选择增强中的NB-IoT功能可能也将用于IoT-NTN。

**IoT-NTN存储和转发**行为作为一项技术，继承了最初为V2X通信引入的Sidelink连接，并弥合了卫星可寻址性和能耗之间的差距。功率能力更好的UE可以向将能耗作为重要考虑因素的UE提供数据采集服务，在卫星变得可寻址时，该UE还将向网络转发这些分组数据。

## 6.2 关于NTN演进的长期展望 – 通往6G之路？

如果简单总结NTN的技术演进，我们会发现5G NR最初被设计为基于地面的公共陆地移动网络。3GPP指出，随着Rel-17在5G中引入NTN，应当可以实现基于卫星的通信，而由于对5G的影响微乎其微，只会进行技术上必要的调整。从长远来看，例如对于通往6G之路，我们将从网络的蜂窝行为出发 [Ref. 4]。3D网络或有机网络成为流行词。6G将由动态多重智能节点组成，这些节点具有内置计算能力和多接入边缘计算功能，相互连接并相对移动。因此，从诞生之初即包含所有平台高度层，涵盖从室内小基站、城市宏基站和大功率高塔伞形基站到低空/高空平台，最后到太空中的LEO和GEO星座的各种类型。

图68：向3D统一网络演进



6G预计涉及以下技术层面和研究活动：

- ▶网络节点具有动态性，可以随时进入或离开网络，邻近小区之间的协调会自动完成
- ▶网络节点将变得自给自足；即使不连接核心网，也能提供通信业务。高韧性网络和数字主权成为热议的流行词
- ▶统一网络，即通过提供多址接入技术（用户服务针对特定用例选择最佳RAT以获得优化的 QoS）实现网络切片增强
- ▶在网络中纳入人工智能 (AI) 方法，一方面协调节点间信令和流量路由以及动态调整网络星座，目标是赋予节点自主性，以支持实时卫星决策和无缝控制；另一方面AI方法将用于路由流量，提供具有最佳QoS的服务（使用智能节点的网络切片，即MEC机制）
- ▶多接入边缘计算 (MEC) 不仅仅是数据云，更意味着内置计算能力，即调度决策、切片选择、QoS配置协商和节点间协调
- ▶通过引入具有连续干扰消除 (SIC) 方法的非正交媒体接入 (NOMA) 来增强随机接入信道，以避免单一卫星的RACH容量过载 [Ref. 31]
- ▶用于提高频谱效率的联合通信技术，应用多颗卫星，例如使用两颗卫星作为发射点的MIMO传输，以克服主要的LOS影响并创建链路去相关
- ▶用于频谱协调的增强复杂方法，用于切换和移动性场景的节点间信令流程以及脱离传统网络静态架构的敏捷方法
- ▶安全方面需要重新设计，因为节点可能进入和离开网络，并且设备具有不同的形状和外形尺寸。需在当前对称身份验证机制的基础上设想新的安全概念。
- ▶NTN架构演进：在Rel-17中，3GPP讨论了透传模式架构，例如，gNB位于地面上并通过网关连接到卫星，该卫星提供无线接入。馈线链路和服务链路均为5G NR。在后续版本中，将引入再生模式，即卫星具有内置处理功能，并作为gNB整体来运行，但仍与地面核心相连。从长远来看，节点将进一步继承核心网功能，并独立自主地运行
- ▶通过卫星回传将基于UAV的gNB连接到地面核心网功能，实现架构演进 [Ref. 4]

▶ 全息无线电技术通过智能表面控制物理空间，目的是提高频谱效率和网络容量

▶ 自由空间光学 (FSO) 或基于激光的非射频无线电，旨在补偿大气失真并提供超低延迟服务。可能以提供射频和FSO连接的混合架构作为实现方式

### 6.3 归纳和总结

3GPP Rel-17引入NTN被认为是向广阔的卫星大众市场应用提供多种应用程序的开端。电信行业在过去十年历经巨变，体现为提供泛在互联网连接的智能设备迅速普及，5G系统等重要技术的演进带来巨大的灵活性，以及对新服务的需求呈指数级增长。电信服务已从最初的电话呼叫这样“可有可无”的方式，发展到现代基础设施应当提供的基本需求和必要条件。各级政府认为，提供互联网接入服务与营养和供水、能源供应、医疗保健和教育系统具有同等重要性。因此我们注意到，无论在乡村或边远地区，还是局部热点区域，甚至海上地区，都存在对全球互联互通的要求，这种要求为卫星移动通信带来显著的推动力。卫星的明显优势在于，它们可以在这些边远地区或海上地区实现网络覆盖，在技术复杂性和成本吸引力方面都具有可行性。航空航天生态系统内的技术演进开创了这些连接用例的先河。另一个值得一提的方面是降低了面对自然灾害时的脆弱性，具有更高的韧性，但也以牺牲对其他大气影响（例如太阳风暴）的敏感性为代价。简单说来，如果卫星在导航系统 (GNSS) 中发挥重要的基石作用，接下来的问题是，它们为何不能在通信中扮演同样重要的角色。这个问题将由3GPP Rel-17及后续版本来回答。基于卫星的通信将进一步发展，从基本的服务提供商开始，比方说尽力而为的 QoS和主要目标“信号覆盖”，直到漫游网络、智能自组网回传连接等复杂的方法，最后到远期的有机和无小区网络等方面。无线通信和卫星连接这两大生态系统将趋于融合，它们的合作充分利用卫星服务部署。从技术角度来看，将存在诸多挑战，例如，由于UE和卫星之间距离遥远，延迟较长始终是NTN的一个特点。可以采用相应的对策来缓解这些影响，比如在卫星中引入HAPS、MEC功能和再生架构，但显然NTN连接无法实现与小基站室内场景相同的延迟。另外还有一些技术挑战，比如扩展定时器、从透传到再生模式的架构增强以及频率调整，都将对学术和工程团队提出挑战，不过这些方面的进展未来可期。显而易见，NTN将继续发挥独有的效应，有时还会带来技术范式的变化。一个值得注意的例子是“基站”，或者更确切地说是卫星的运动，已构成无线演进的范式变化。研究将继续改进现有的移动性、传播延迟和资源分配机制。新的研究领域将是向具有基站生灭行为的有机网络、漫游网络组件以及智能流量管理（例如复杂的跨卫星ISL控制）演进。因此我们认为，在Rel-17中将NTN纳入5G系统，代表新一轮技术演进业已开始，将促进并推动无线通信系统在全球范围内的普及，罗德与施瓦茨很荣幸能以我们在测试与测量和卫星连接方面的专业知识为这些技术演进提供助力。

# 7 参考文献

- [Ref. 1] 5G New Radio Fundamentals procedures, testing aspects, M. Kottkamp, A. Pandey, D. Raddino, A. Roessler, R. Stuhlfauth, 罗德与施瓦茨著作, PW 3642.6376.00, ISBN 978-3-939837-15-2, 第 5 版, 2022, www.rohde-schwarz.com/5G-ebook <https://www.rohde-schwarz.com/5G-ebook>
- [Ref. 2] Over-the-air RF conformance measurements on 5G NR devices, H. Mellein, R. Stuhlfauth, 罗德与施瓦茨白皮书, PD 3609.5897.52, 2021年3月
- [Ref. 3] Antenna Theory, C. A. Balanis, Wiley & Sons Editor, 2005
- [Ref. 4] Non-Terrestrial Networks in 5G & Beyond: A Survey, F. Rinaldi, H-L. Määttanen, J. Torsner, S. Pizzi, S. Andreev, A. Iera, Y. Koucheryavy, G. Araniti, IEEE Access, 2020年9月
- [Ref. 5] 3GPP nonterrestrial networks, A. Anttonen, P. Ruuska, M. Kiviranta, VTT Technical Research Centre of Finland, 2019 年 1 月
- [Ref. 6] Short Range Inter-satellite Link for Data Transfer and Ranging using IEEE 802.11n, V. Shah, C. Ritesh Patel, C. Rikin Nayak, International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) Vol. 164 – No 1, 2017年4月
- [Ref. 7] ITU 2019 年世界无线通信大会 (WRC-19) 最终决议, 2019 年10月28日至11月22日, Sharm-El Sheikh
- [Ref. 8] Free Space Optical Communication: Challenges and Mitigation Techniques, H. Kaushal, G. Kaddoum, no. January, 2017年1月, pp. 119~137
- [Ref. 9] HEUMEGA, Independent Trend Analysis on the Topic of Megaconstellations, DLR, 2021年6月
- [Ref. 10] 5G from Space: An Overview of 3GPP Non-Terrestrial Networks, Xingqin Lin, Stefan Rommer, Sebastian Euler, Emre A. Yavuz, Robert S. Karlsson, Ericsson, 2021年6月
- [Ref. 11] 5G Radio Access Network Architecture, The dark side of 5G. S. Sirotkin, Wiley Press 2021, ISBN 978-1-119-55088-4
- [Ref. 12] 5G & Non-terrestrial networks, 5G Americas Whitepaper, 2022年2月
- [Ref. 13] 在无线电规则针对国际移动通信 (IMT) 确定的频段中用于IMT地面部分实施的频率安排, Recommendation ITU-R M.1036-6, 2019年10月
- [Ref. 14] Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology, G. Maral, M. Bousquet, Z. Sun, Wiley Editors, 2020 年 4 月, ISBN 978-1119382089
- [Ref. 15] 3GPP R4-2115640 TSG-RAN WG4 Meeting #100-e, 2021年8月
- [Ref. 16] NewSpace terminal testing challenges and considerations, M. Hammond, 罗德与施瓦茨白皮书, PD 3609.3865.52, 2019年6月

- [Ref. 17] Satellite Communications in the 5G Era, S. K. Sharma, S. Chatzinotas, P. Arapoglou, IET, 2018年9月, ISBN 978-1-78561-427-9
- [Ref. 18] Sat5G项目, www.sat5g-project.eu <https://www.sat5g-project.eu/>
- [Ref. 19] ITU无线电规则文章, 2016年版
- [Ref. 20] Mastering the challenges of NewSpace satellite constellations, T. Willuhn, 罗德与施瓦茨白皮书, PD 3683.6093.52, 2022年2月
- [Ref. 21] A Dual-Polarized 1024-Element Ku-band SATCOM Transmit Phased-Array with  $\pm 70^\circ$  Scan and 43.5 dBW EIRP, G. Gültepe, S. Zehir, T. Kanar, G. Rebeiz, IEEE MTT-S, 2020
- [Ref. 22] 5G' s future is hybrid – the non-terrestrial opportunity, 白皮书, Mobile World Live and Cambridge Consultants, 2021
- [Ref. 23] High Altitude Platform Systems – Towers in the Skies, GSMA白皮书, 2.0版, 2022年2月 [www.gsma.com/futurenetworks/resources/high-altitude-platform-systems-towers-in-the-skies-version-2-0](http://www.gsma.com/futurenetworks/resources/high-altitude-platform-systems-towers-in-the-skies-version-2-0)
- [Ref. 24] SpaceX continues Starlink deployment with latest launch, J. Foust, SpaceNews, 2021年5月, <https://spacenews.com/spacex-continues-starlink-deployment-with-latest-launch/>
- [Ref. 25] London-based global communications company OneWeb raises funding from SoftBank and Hughes to fund its satellite fleet, Silicon Canals, 2021年1月, <https://siliconcanals.com/news/startups/london-oneweb-gets-fund-softbank/>
- [Ref. 26] Guowang, Renamed China SatNet, Will Be China' s Global Broadband Provider, L. Press, CircleID, 2021年3月, <https://circleid.com/posts/20210329-guowang-starlink-will-be-chinas-global-broadband-provider/>
- [Ref. 27] Dynamic SDN Controller Placement in a LEO Constellation Satellite Network, A. Papa, T. de Cola, P. Vizarreta, M. He, C. Machuca, W. Kellerer, IEEE, 2018
- [Ref. 28] Survey on Optimization Methods for LEO-Satellite Based Networks with Applications in Future Autonomous Transportation, K. Celikbilek, Z. Saleem, R. Ferre, J. Praks, E. Lohan, Sensors MDPI, 2022年2月
- [Ref. 29] ITU-R S.1503 recommendation, WRC-97, 2000
- [Ref. 30] Signal Processing for High Throughput Satellite Systems: Challenges in New Interference-Limited Scenarios, A. Perez-Neira, M. Vazquez, S. Maleki, M. Shankar, S. Chatzinotas, IEEE Signal Processing Magazine 36, 2018年2月
- [Ref. 31] LEO Small-Satellite Constellations for 5G and Beyond-5G Communications, I. Leyva-Mayorga, B. Soret, M. Röper, D. Wübben, B. Matthiesen, A. Dekorsy, A. Popovski, IEEE Access, 2020年10月
- [Ref. 32] A Technical Comparison of Three Low Earth Orbit Satellite Constellation Systems to Provide Global Broadband, I. del Portillo, B. Cameron, E. Crawley, Acta Astronautica, Vol 159, 2019年6月

- [Ref. 33] A logic-efficient recursive Doppler rate estimation processor for LEO satellites, M. Krondorf, S. Bittner, IEEE第三届世界5G大会, 2020年9月
- [Ref. 34] Towards the implementation of advanced random access schemes for satellite IoT, M. Krondorf, M. Goblirsch, R. de Gaudenzi, G. Cocco, N. Tzetsis, G. Acar, International journal of satellite communications and networking, 2019年11月
- [Ref. 35] RFIC Silicon based phased arrays and transceivers, G. M. Rebeiz, University of San Diego, IEEE RFIC会议, 017年6月
- [Ref. 36] Active multi-beam antennas – Testing the drivers for advanced satellite concepts, 罗德与施瓦茨网络研讨会, [www.rohde-schwarz.com/knowledge-center/webinars/webinar-active-multi-beam-antennas-registration\\_254213](http://www.rohde-schwarz.com/knowledge-center/webinars/webinar-active-multi-beam-antennas-registration_254213).
- [Ref. 37] Power saving methods for LTE-M and NB-IoT devices, Y. Shi, 罗德与施瓦茨白皮书, PD 3609.3820.52, 2019年6月
- [Ref. 38] Digital Video Broadcast (DVB) alliance, 技术规范, <https://dvb.org/specifications/>

注意：所有链接均经过检查，在本文档创建时有效。不过，我们不能排除引用列表中的链接后续发生变更的情况。

# 8 标准规范

TR 23.754, 3GPP TR 23.754	关于支持无人驾驶航空系统 (UAS) 连接、识别和跟踪的研究 (Rel-17)
TR 23.737, 3GPP TR 23.737	关于在5G中使用卫星接入的架构方面的研究 (Rel-17)
TR 36.763, 3GPP TR 36.763	关于非地面网络 (NTN) 的窄带物联网 (NB-IoT)/增强型机器类通信 (eMTC) 支持的研究 (Rel-17)
TR 38.811, 3GPP TR 38.811	关于支持非地面网络的新空口 (NR) 的研究 (Rel-15) , 2020年9月
TR 38.901, 3GPP TR 38.901	关于0.5至100 GHz频率的信道模型的研究 (Rel-16) , 2019年12月
TR 38.913, 3GPP TR 38.913	关于下一代接入技术的场景和需求的研究 (Rel-16) , 2020年7月
TR 38.821, 3GPP TR 38.821	支持非地面网络 (NTN) 的NR解决方案 (Rel-16) , 2019年12月
TR 38.863, 3GPP TR 38.863	非地面网络 (NTN) 相关射频和共存方面 (Rel-17) , 2022年1月
TR 22.822, 3GPP TR 22.822	关于在5G中使用卫星接入的研究, 第1阶段 (Rel-16) , 2018年5月
TS 23.122, 3GPP TS 23.122	与空闲模式下的移动站 (MS) 相关的非接入层 (NAS) 功能 (Rel-17) , 2021年12月
TS 24.501, 3GPP TS 24.501	用于5G系统 (5GS) 的非接入层 (NAS) 协议, 第3阶段 (Rel-16) , 2020年6月
TS 23.501, 3GPP TS 23.501	5G系统 (5GS) 的系统架构, 第2阶段 (Rel-17) , 2021年12月
TS 38.300, 3GPP TS 38.300	NR; NR和NG-RAN总体描述, 第2阶段 (Rel-16) , 2021年12月
TS 38.101, 3GPP TS 38.101	用户设备 (UE) 无线传输和接收 (Rel-17) , 2021年12月2021
TS 38.101-5, 3GPP TS 38.101-5	用户设备 (UE) 无线传输和接收, 第5部分: 卫星接入射频 (RF) 和性能要求 (Rel-17) , 框架第一稿, 2022年3月
TS 38.104, 3GPP TS 38.104	基站 (BS) 无线传输和接收 (Rel-17) , 2021年12月
TS 38.108, 3GPP TS 38.108	卫星接入节点无线传输和接收 (Rel-17) , 第一稿, 2022年1月
TS 38.181, 3GPP TS 38.181	NR; 卫星接入节点一致性测试 (Rel-17) , 框架草案, 2022年4月
TS 38.213, 3GPP TS 38.213	物理层的控制流程 (Rel-17) , 2021年12月
TS 38.214, 3GPP TS 38.214	物理层的数据流程 (Rel-17) , 2021年12月
TS 38.410, 3GPP TS 38.410	NG-RAN; NG的一般方面和原则 (Rel-16) , 2021年10月R4-2111460, 3GPP TSG-RAN WG4会议, 编号99, 关于 NTN gNB的Rx参数和Rx测试布置, 2021年5月
R2-1818511, 3GPP	TSG-RAN WG2会议, 编号104, 关于MAC定时器和非地面网络 (NTN) 中的RTD补偿偏移量的考虑, 2018年11月

R2-1818512, 3GPP	TSG-RAN WG2会议, 编号104, 关于RLC控制环路和非地面网络 (NTN) 中定时的考虑, 2018年11月
R2-1818513, 3GPP	TSG-RAN WG2 会议, 编号104, 关于PDCP控制环路和非地面网络 (NTN) 中定时的考虑, 2018年11月
RP-193234, 3GPP	TSG-RAN全体会议, 编号78, NR-NTN: 非地面网络的频谱, 2017年12月
RP-212144, 3GPP	TSG-RAN会议, 编号93, 关于NR-NTN卫星在10 GHz (FR2) 以上频段部署的研究, 2021年9月
R2-1914195, 3GPP	TSG-RAN WG2会议, 编号107bis, 星历表数据, 2019年10月
R1-2200780, 3GPP	TSG-RAN WG1会议, 编号107bis, 在RAN1 #107bis-e之后更新Rel-17 NR的RAN1 UE功能列表, 2022年1月
R2-2007574, 3GPP	TSG-RAN WG2会议, 编号11-e, 关于卫星星历表的考虑, 2020年8月
ITU-R建议P.2109	建筑物入口损耗预测, <a href="http://www.itu.int/rec/R-REC-P.2109-1-201908-l/en">www.itu.int/rec/R-REC-P.2109-1-201908-l/en</a>
ITU-R建议P.676	大气气体衰减和相关影响, <a href="https://www.itu.int/rec/R-REC-P.2109-1-201908-l/en">https://www.itu.int/rec/R-REC-P.2109-1-201908-l/en</a> <a href="http://www.itu.int/rec/R-REC-P.676">www.itu.int/rec/R-REC-P.676</a>
ITU-R建议P.618-13	地球空间电信系统设计所需的传播数据和预测方法, <a href="https://www.itu.int/rec/R-REC-P.618/en">https://www.itu.int/rec/R-REC-P.618/en</a>
ITU-R建议P.681	陆地移动卫星服务中设计系统所需的传播数据, <a href="https://www.itu.int/rec/R-REC-P.681/en">https://www.itu.int/rec/R-REC-P.681/en</a>
ITU-R建议M.1036-6	在无线电规则针对国际移动通信 (IMT) 确定的频段中用于IMT地面部分实施的频率安排, <a href="https://www.itu.int/rec/R-REC-M.1036">https://www.itu.int/rec/R-REC-M.1036</a>

注意：所有链接均经过检查，在本文档创建时有效。不过，我们不能排除引用列表中的链接后续发生变更的情况。

## 9 缩略语

术语	解释
5G NR	5G新空口
3GPP	第三代合作伙伴计划
5GC	5G核心网
5GMM	5G移动性管理
<b>A</b>	
ACIR	邻道干扰比
ACLR	邻道泄漏比
AF	应用功能
AM	确认模式
AMF	接入和移动性管理功能
AoA	到达角（方位角）
AoD	离开角（方位角）
AOS	信号采集
AsA	到达角角度扩展（方位角）
AsD	离开角角度扩展（方位角）
ATG	空对地
ATP	捕获、跟踪和指向
<b>B</b>	
BSR	缓冲区状态报告
BSS	广播卫星业务
BWP	部分带宽
<b>C</b>	
CDL	群集延迟线
CE	控制元素
CL	杂波损失
CORESET	控制和资源集
CP	控制面
CPE	客户驻地设备
CSI	信道状态信息
CSI-RS	CSI参考信号
CU	集中式单元
<b>D</b>	
DC	双连接
DCI	下行控制信息
DL	下行
DRX	不连续接收
DU	分布式单元
<b>E</b>	
E2E	端到端
ECEF	地心地固坐标系
EPS	演进的分组核心网（LTE 核心网）
ESA	欧洲航天局
ESA	电动转向相控阵天线
EVM	矢量幅度误差

术语	解释
<b>F</b>	
FCC	联邦通信委员会（美国监管机构）
FDD	频分双工
FoM	性能评估指标
FoV	视场
FPA	平板天线阵列
FSO	自由空间光学
FSPL	自由空间路径损耗
FSS	固定卫星业务
<b>G</b>	
GEO	地球静止轨道
GNSS	全球导航卫星系统
GSCN	全局同步信道号
<b>H</b>	
HAPS	高空平台系统
HARQ	混合自动重传请求
HPA	高功率放大器
HPHT	大功率高塔
HTS	高吞吐量卫星
<b>I</b>	
IAB	集成接入回传
IE	信息元素
IMT	国际移动通信
IOT	在轨测试
IoT	物联网
ISL	星间链路
ITU	国际电信联盟
<b>L</b>	
LAPS	低空平台系统
LEO	低地球轨道
LHCP	左旋圆极化
LNA	低噪声放大器
LOS	视距
<b>M</b>	
MAC	媒体接入控制
MCG	主小区组
MCS	调制和编码方案
MCX	关键任务通信
MEC	多接入边缘计算
MEO	中地球轨道
MIMO	多输入多输出
MNO	移动网络运营商
MOCN	多运营商核心网
MPP	多径传播
MSS	移动卫星业务
MTC	机器型通信
<b>N</b>	
NAS	非接入层
NF	噪声系数
NGSO	非地球静止卫星轨道
NLOS	非视距
NR	新空口
NR-ARFCN	新空口绝对射频信道号

术语	解释
NSA	非独立组网
NTN	非地面网络
<b>0</b>	
O2I	室外到室内
O-ISL	光学ISL
O-RAN	开放式RAN联盟 (www.o-ran.org)
O-CU	O-RAN集中式单元
O-DU	O-RAN分布式单元
O-RU	O-RAN无线单元
OBP	内置处理器
OFDMA	正交频分多址接入
OTA	空中性能
<b>P</b>	
PAPR	峰均比
PCF	策略控制功能
PCI	物理小区标识
PDCCH	物理下行控制信道
PDCP	分组数据汇聚协议
PDSCH	物理下行共享信道
PDU	协议数据单元
PH	功率余量
PL	路径损耗
PLMN	公共陆地移动网络
PPDR	公共保护和救灾
PRACH	物理随机接入信道
PSM	节电模式
PUCCH	物理上行控制信道
PUR	预配置的上行资源
PUSCH	物理上行共享信道
PVT	位置、速度和时间
<b>Q、R</b>	
QoE	体验质量
QoS	服务质量
RAC	注册区域码
RACH	随机接入信道
RAN	无线接入网
RAR	随机接入响应
RAT	无线接入技术
RF	无线频率
RF-ISL	射频ISL
RHCP	右旋圆极化
RLC	无线链路控制
RRC	无线资源控制
RRM	无线资源管理
RSRP	参考信号接收功率
RSRQ	参考信号接收质量
RSSI	接收信号强度指示
RTT	往返时间
RX	接收

术语	解释
<b>S</b>	
SA	独立组网
SAN	卫星接入节点
SCG	辅小区组
SCS	子载波间隔
SDAP	服务数据适配协议
SDO	标准制定组织
SF	阴影衰落
SFN	系统帧序号
SIB	系统信息块
SMF	会话管理功能
SMO	服务、维护和编排
SMTC	基于SSB的测量定时配置
sNB	卫星NodeB
SNO	卫星网络运营商
SR	调度请求
SRI	网关和卫星之间的卫星无线接口
SSB	同步信号和PBCH块
<b>T</b>	
TA	跟踪区域
TA	定时提前量
TAC	跟踪区域码
TAI	跟踪区域索引
TAU	跟踪区域更新
TCI	传输配置指示
TDD	时分双工
TDL	抽头延迟线
TLE	两行元素
TM	透传模式
TM-TC	遥测和遥控
TTI	传输时间间隔
TX	传输
<b>U</b>	
UAS	无人驾驶航空系统
UAV	无人驾驶飞行器
UE	用户设备
UL	上行
UM	未确认模式
UP	用户面
UPF	用户面功能
USIM	UMTS用户身份模块
UxNB	UAV集成NodeB
<b>V、W</b>	
VSAT	甚小口径终端
WCRTT	最坏情况下的往返时间
WRC	世界无线电大会
WUS	唤醒信号
<b>X、Z</b>	
XPR	交叉极化比
ZoA	到达角（天顶角）
ZoD	离开角（天顶角）
ZsA	到达角角度扩展（天顶角）
ZsD	离开角角度扩展（天顶角）

## 增值服务

- ▶ 遍及全球
- ▶ 立足本地个性化
- ▶ 可定制而且非常灵活
- ▶ 质量过硬
- ▶ 长期保障

## 关于罗德与施瓦茨公司

罗德与施瓦茨科技集团开发、生产和销售种类广泛的专业电子产品。公司推出丰富的产品组合，旨在缔造一个更加安全的互联世界。在测试与测量、安全通信、网络和网络安全以及广播和媒体等市场，全球客户都信赖罗德与施瓦茨及其提供的先进解决方案。在成熟的业务领域之外，罗德与施瓦茨还大力投资人工智能、工业物联网(IIoT)、6G、云解决方案和量子技术等各种未来技术。自公司创立以来的90多年，罗德与施瓦茨是众多行业客户的可靠合作伙伴。

## 罗德与施瓦茨(中国)科技有限公司

800-810-8228 400-650-5896

info.china@rohde-schwarz.com

www.rohde-schwarz.com.cn

### 官方微信



### 官方视频号



Certified Quality Management

ISO 9001

Certified Environmental Management

ISO 14001

## 可持续性的产品设计

- ▶ 环境兼容性和生态足迹
- ▶ 提高能源效率和低排放
- ▶ 长久性和优化的总体拥有成本

### 北京

北京市朝阳区紫月路18号院1号楼(朝来高科技产业园)罗德与施瓦茨办公楼 100012

电话: 010-56108074

传真: +86-10-64312828

### 上海

中国上海市浦东新区张江高科技园区盛夏路399号亚芯科技园11号楼

罗德与施瓦茨办公楼 201210

电话: 021-63750018/63750028

传真: +86-21-63759230

### 深圳

深圳市南山区高新南环路43号 威新软件科技园1号楼2楼东/南翼 518063

电话: 0755-22985864

传真: +86-755-82033070

### 成都

中国成都市高新区天府大道 天府软件园A4号楼南一层 610041

电话: 028-62677640

传真: +86-28-85194550

### 广州

中国广州市天河区北路233号 中信广场3705室 510620

电话: 020-32430246

传真: +86-20-87554759

### 西安

西安市高新区锦业一路56号 研祥城市广场5楼502室 710065

电话: 029-83663470

传真: +86-29-87206500

### 南京

江苏省南京市秦淮区中山南路1号 南京中心大厦56楼B区 210000

电话: 025-83484142

传真: +86-25-85288379

### 武汉

中国湖北省武汉市武汉经济技术开发区201M地块海棠路6号

华中智谷项目二期D2办公室2层1号 430051

电话: 025-83484142

R&S®是罗德与施瓦茨公司注册商标

商品名是所有者的商标 | 中国印制

CN23.0001.15 | 01.00版 | 2022年12月 | 白皮书 | 5G NTN启航: 5G 非地面网络技术概论

文件中没有容限值的数据没有约束力 | 随时更改