



综述

GNSS韧性增强在NTN中的研究与标准化进展

唐志华^{1,2,3}, 张芳^{1,2,3}, 焦凌霄^{1,2,3}, 严宏^{1,2,3}, 徐晓帆^{1,2,3}, 童建飞^{1,2,3}, 孙羿^{1,2,3}

1. 上海卫星互联网研究院有限公司, 上海 200120;
2. 上海市卫星互联网重点实验室, 上海 200120;
3. 卫星互联网全国重点实验室, 上海 200120)

摘要: 第三代合作伙伴计划 (3rd Generation Partnership Project, 3GPP) 非地面网络 (non-terrestrial network, NTN) 通过对5G新空口 (new radio, NR) 协议进行增强设计以适应卫星通信场景, 有效融合地面与非地面网络优势, 具备持续演进能力, 是构建天地一体化网络的重要技术路径。针对现有NR NTN系统因依赖全球导航卫星系统 (global navigation satellite system, GNSS) 而面临的网络韧性不足问题, NR NTN工作组已在Release 20开展系统性的研究工作。基于此, 首先概述了NTN GNSS韧性增强的关键技术挑战, 进而系统梳理并分析了初始接入流程优化、连接态时频同步增强、网络辅助定位等关键方案的标准化进展, 最后对未来技术演进与系统部署方向作出展望。

关键词: NTN; GNSS韧性; 上行同步; 差分时分; 差分频偏

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.DXKX250747

Research and standardization progress on GNSS resilience enhancement in NTN

Tang Zhihua^{1,2,3}, Zhang Fang^{1,2,3}, Jiao Lingxiao^{1,2,3}, Yan Hong^{1,2,3},
Xu Xiaofan^{1,2,3}, Tong Jianfei^{1,2,3}, Sun Yi^{1,2,3}

1. Shanghai Satellite Network Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200120, China
2. Shanghai Key Laboratory of Satellite Network, Shanghai 200120, China
3. State Key Laboratory of Satellite Network, Shanghai 200120, China

Abstract: By enhancing the terrestrial 5G new radio (NR) protocol to adapt to satellite communication scenarios, the 3rd Generation Partnership Project (3GPP) non-terrestrial networks (NTN) can fully integrate the advantages of terrestrial and non-terrestrial networks while with continuous evolution capability, which is therefore an essential technological direction to realize the integration of satellite and terrestrial network. To address the insufficient network resil-

收稿日期: 2025-12-25; 修回日期: 2026-02-05

通信作者: 唐志华, tangzhihua33@qq.com

基金项目: 上海市2024年度“科技创新行动计划”启明星项目(扬帆专项)(No.24YF2743100)

Foundation Item: Shanghai 2024 Science and Technology Innovation Action Plan: Rising-Star Program (Sailing Special Project) (No. 24YF2743100)



ience caused by the dependency on GNSS in existing NR NTN systems, a study item has been conducted as part of the Release 20 NR NTN standardization work. Based on this, the key technical challenges in enhancing GNSS resilience for NTN were firstly outlined. Then, the technical solutions and standardization progress involved in initial access procedure optimization, time and frequency synchronization enhancement in connected status, and network-assisted positioning were comprehensively introduced and analyzed. Furthermore, future technology evolution and system deployment were prospected.

Key words: NTN, GNSS resilience, uplink synchronization, differential delay, differential frequency offset

0 引言

非地面网络 (non-terrestrial network, NTN) 通过卫星、高空平台及无人机等非地面节点与地面网络协同, 可为海洋、偏远山区及灾难应急通信等场景提供无缝连接。相较于传统地面网络, NTN 展现出广域立体覆盖与快速灵活部署的显著优势: 单颗低轨 (low earth orbit, LEO) 卫星即可覆盖直径上百千米区域; 通过卫星星座组网, 可以突破地理位置与自然环境对地面基站部署的限制, 构建真正意义上的全球泛在连接网络。

第三代合作伙伴计划 (3rd Generation Partnership Project, 3GPP) 在 Release 17 (Rel-17)、Release 18 及 Release 19 的 NTN 研究中, 设定了一个基本假设: 用户设备 (user equipment, UE) 需通过全球导航卫星系统 (global navigation satellite system, GNSS) 获知其精确位置, 以支持定时提前和频率预补偿, 从而抵消卫星高速运动产生的巨大时延和多普勒频移。GNSS 泛指所有的卫星导航系统, 如美国的全球定位系统 (global positioning system, GPS)、俄罗斯的格洛纳斯 (GLONASS)、欧洲的伽利略 (Galileo)、中国的北斗卫星导航系统。由于 GNSS 对物理层操作至关重要, 其可用性已成为实现 NTN 接入的关键前提, 且对基于位置的条件切换等高层流程具有重要价值。然而, GNSS 信号本身存在强度弱、覆盖不连续、易受干扰和欺骗等缺陷, 可能导致信号暂时不可用或定位精度下降等问题。此

类情况正日益频发, 对 3GPP NTN 服务的韧性构成了挑战。

面对 NTN 对 GNSS 高度依赖所带来的脆弱性挑战, 学术界近年来在无 GNSS 条件下的时频同步与自主定位等关键领域取得了显著突破。在时频同步方面, Lin 等^[1]利用 5G 新空口 (new radio, NR) 多频点参考信号来联合估计多普勒与晶振频偏, 为高速移动场景提供了上行频率预补偿的解决方案; Zhu 等^[2]提出一种基于多星同步信号块 (synchronization signal block, SSB) 检测的时频预补偿方法, 可联合估计时延、多普勒频移与晶振频偏。在定位方面, 相关研究已形成三大主流范式: 一是基于时频差、多普勒频移以及载波相位等测量的几何定位法, 理论成熟且已获得实验验证^[3-5]; 二是基于波达方向估计的特征定位法^[6-7]; 三是融合多源信息与滤波技术的混合智能定位法, 致力于逼近理论性能极限^[8-10]。特别值得一提的是, 以多普勒定位为代表的几何定位法已在 Starlink 等实际系统中完成了从原理验证到精度突破的完整演进, 通过频域分析与轨道信息融合, 已实现 10 m 级水平定位精度^[11-12], 这为降低 NTN 对 GNSS 的深度依赖提供了重要的技术实例与实证支撑。

2025 年 6 月, 3GPP RAN#108 次全会正式批准 “GNSS 韧性研究项目” (简称 “SI”) 立项^[13], 旨在降低 NTN 对 GNSS 的过度依赖。该项目明确指出, 所有增强方案应致力于最小化对物理层设计的影响, 避免修改现有信道结构或信号格式, 并确保与已部署 GNSS UE 保持后向兼容

性。3GPP Rel-20 GNSS 韧性 SI 标准化进展示意图如图1所示。目前，研究场景、性能评价准则、典型场景评估结果和潜在解决方案已经基本确定，后续工作将主要集中于相关方案流程的细化。

本文首先简要分析了GNSS韧性增强面临的关键技术挑战，然后聚焦初始接入流程优化、连接态时频同步增强、网络辅助定位等关键解决方案，结合技术方案和标准化进展进行了详细的分析与探讨，最后展望了NTN在GNSS韧性增强领域的标准化演进趋势。

1 GNSS韧性增强关键技术挑战

GNSS韧性增强的技术挑战分析遵循以下思路：首先，通过对NR系统UE状态转换机制及各状态下关键流程的剖析，识别出NTN中GNSS在

UE活动全过程中所发挥的关键作用，进而系统揭示GNSS信号不可用时所面临的核心技术挑战。随后，围绕这些核心挑战展开详细论述。

NR中UE的状态包括空闲态、连接态和非激活态。NR系统UE状态转换框图如图2所示。

UE在空闲态与非激活态下，需执行小区选择/重选、跟踪区更新（tracking area update, TAU）等关键流程。其中，小区选择/重选主要依赖系统广播信息，基本不依赖GNSS。对于TAU流程，其触发与执行本身并不强制要求UE具备位置信息：若UE支持GNSS，可将自身位置上报给接入与移动性管理功能（access and mobility management function, AMF），AMF可借此映射UE所在的跟踪区，从而更精准地确定发起寻呼的基站或波束列表，实现高效寻呼；若GNSS不可用，UE仍可通过接收系统广播消息，判断自

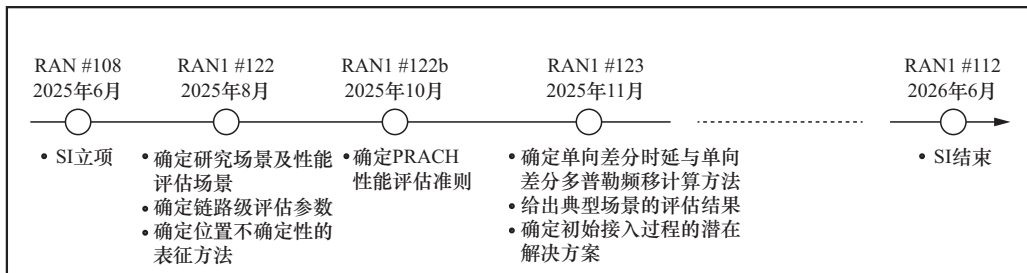


图1 3GPP Rel-20 GNSS韧性SI标准化进展示意图

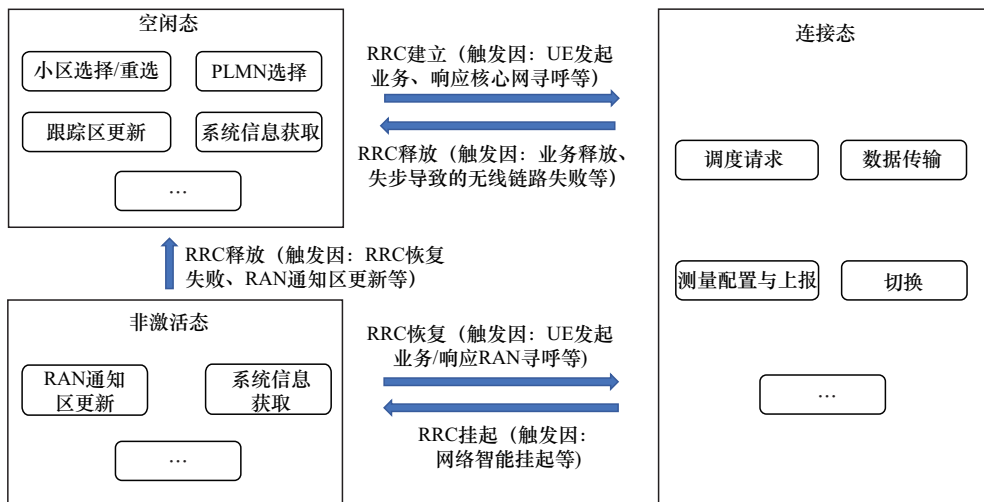


图2 NR系统UE状态转换框图



身跟踪区是否发生变化,并依规完成TAU流程。因此,GNSS的缺失对上述流程的影响相对有限。

UE从空闲态或非激活态转换至连接态,需经历无线资源控制层(radio resource control, RRC)建立或恢复过程,其前提是完成初始接入流程。在NTN中,由于卫星高速运动,初始接入的关键在于实现快速同步,这通常依赖终端基于GNSS与星历信息进行频偏与时延的预补偿。若无GNSS支持,终端无法进行有效预补偿,将导致接入失败或同步时间显著延长,故此环节受GNSS可用性影响最为直接和严重。

UE在连接态下,GNSS的重要性主要体现在3个方面:一是维持链路同步,连接态需持续进行时间与频率同步,失步会引发无线链路失败乃至RRC连接释放;二是保障数据传输性能,卫星覆盖范围广,若UE位置信息不准确,可能导致波束指向偏差,影响链路质量与吞吐量;三是支持高级移动性管理,NTN中引入基于位置的切换等机制,若缺乏GNSS定位支持,其设计与实现需要重新考虑。

综上所述,GNSS不可用主要带来两大核心挑战:(1)在UE从空闲态或非激活态转换至连接态的初始接入阶段,如何实现有效的上行时频预补偿,以避免同步偏差过大导致接入失败或随机接入流程反复尝试;(2)在连接态维持阶段,如何对时频偏移进行持续校正,防止其超出系统同步容限,进而避免不必要的无线链路故障或切换失败。相对而言,GNSS缺失对空闲态或非激活态下的小区选择/重选、寻呼及移动性管理等流程所产生的影响较为有限。

因此,本节将重点围绕上述两大核心挑战展开论述:首先,分析NTN典型部署场景的最大差分时延,证明UE基于GNSS进行时频预补偿的必要性;其次,聚焦于最严峻的韧性研究场景,量化网络辅助补偿的局限性;最后,通过对标残留误差与现有协议容限,指出现有设计的不足。

1.1 UE基于GNSS进行时频预补偿的必要性

RAN1#122会议讨论确定了LEO 600 km、LEO 1 200km、静止轨道(geostationary earth orbit, GEO)3种NTN典型部署场景。本文据此推导并给出了这3种场景下的最大差分往返时延估计,见表1。

表1 NTN典型部署场景下的最大差分往返时延估计

卫星轨道	最大往返时延/ μs	最小往返时延/ μs	最大差分往返时延/ μs
LEO 600 km	7 167	4 000	3 167
LEO 1 200 km	13 326	8 000	5 326
GEO	268 778	238 573	30 205

注:最大往返时延出现在最小仰角,LEO 600 km/LEO 1 200 km对应 30° ,GEO对应 15° ;最小往返时延出现在 90° 仰角。

根据3GPP会议确立的PRACH性能评估准则,其能容忍的差分往返时延不得超过循环前缀(cyclic prefix, CP)长度。现有PRACH格式中,最长CP为格式1的 $684.4 \mu\text{s}$ 。表1数据显示,所有典型部署场景下的最大差分往返时延均远超此容限,这进一步凸显了UE必须借助GNSS等信息进行定时预补偿的必要性。

为便于理解,下文将简要介绍Rel-17标准中的上行同步流程。上行同步包括时间同步和频率同步。其中,用户链路的上行频率同步主要依赖UE根据星历和GNSS信息进行开环预补偿,无论是随机接入阶段还是连接态阶段,基站均不参与。上行时间同步包括开环与闭环调整,UE按照式(1)计算定时提前量(timing advance, TA)。

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

其中, T_c 表示NR系统时域的基本时间单元,取值为 0.509 ns ; N_{TA} 表示定时闭环调整量,在初始接入的随机接入响应(random access response, RAR)中采用绝对值调整,在连接态中采用累加方式; $N_{\text{TA,offset}}$ 表示由网络侧配置给UE,取值与频段、双工方式及LTE-NR共存场景有关;

$N_{TA,adj}^{common}$ 表示 Rel-17 NTN 新增开环调整量, 用于预补偿卫星与参考点之间的定时偏差, 标准最终建议网络配置 TA 漂移率等参数^[14], 由 UE 根据既定公式计算补偿量; $N_{TA,adj}^{UE}$ 表示 Rel-17 NTN 新增开环调整量, 由 UE 根据星历和 GNSS 信息计算得出。

初始接入流程定时和频偏调整示意图如图 3 所示。在 LEO 场景下, 受卫星高速运动影响, 时间同步呈现出的开环预补偿 ($N_{TA,adj}^{UE}$) 为主, 闭环调整 (N_{TA}) 为辅的特征。

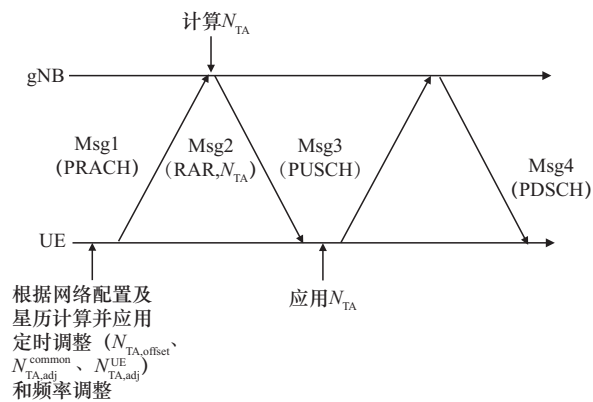


图 3 初始接入流程定时和频偏调整示意图

1.2 网络辅助预补偿后的残留定时误差

鉴于上述必要性, RAN1#122 会议在讨论 GNSS 韧性研究时明确了以下两类研究场景。

- 场景 1: UE 无法使用任何 GNSS 信息进行时频补偿。
- 场景 2: UE 可利用历史 GNSS 信息进行补偿。

业界一致认为场景 1 更为严峻, 适用于场景 1 的解决方案天然具备对场景 2 的适应能力, 因此标准化研究建议优先聚焦场景 1。

关于位置不确定性的表征, 会议确认了以下两种类型。

- 类型 a: 定位不确定区域为小区或波束的覆盖范围。
- 类型 b: 定位不确定区域为半径 (km) 为

X 的圆形区域, 需明确上报 X 的具体数值。

其中, 类型 a 所对应的位置不确定范围更大, 带来的技术挑战也更严峻。位置不确定性分类示意图如图 4 所示。

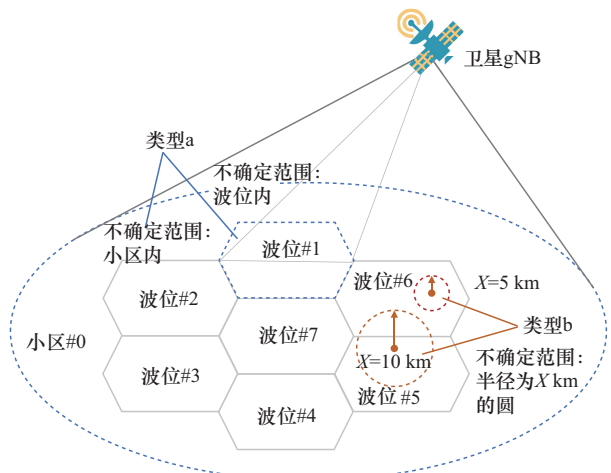


图 4 位置不确定性分类示意图

标准已将网络提供辅助信息 (如广播参考位置、时间戳、参考信号) 作为 GNSS 韧性增强解决方案的关键组成部分进行讨论。为便于分析, 本文后续讨论围绕场景 1 展开, 假设终端已在服务链路上完成粗略的定时提前与多普勒频移预补偿, 并在此基础上聚焦残留时频偏误差的解决方案。参考位置可采用小区级或波束级配置, 其具体定位基准 (如波束中心或边缘) 尚未明确, 目前业界一般建议采用波束级配置以缩小不确定范围。参考点的选择需审慎权衡: 若选择波束中心, 可能导致边缘终端过度补偿, 需研究负值 TA 命令的支持方案; 若选择靠近卫星的波束边缘, 则可能引入过大差分延迟, 且该参考点需随卫星位置动态更新, 增加了实现复杂度。参考点位置的选取示意图如图 5 所示。

由于 UE 基于网络参考位置 (而非实际位置) 进行公共往返延迟与频偏预补偿, 系统中仍会存在不可忽略的残留误差。在 TR 38.742 中收录了

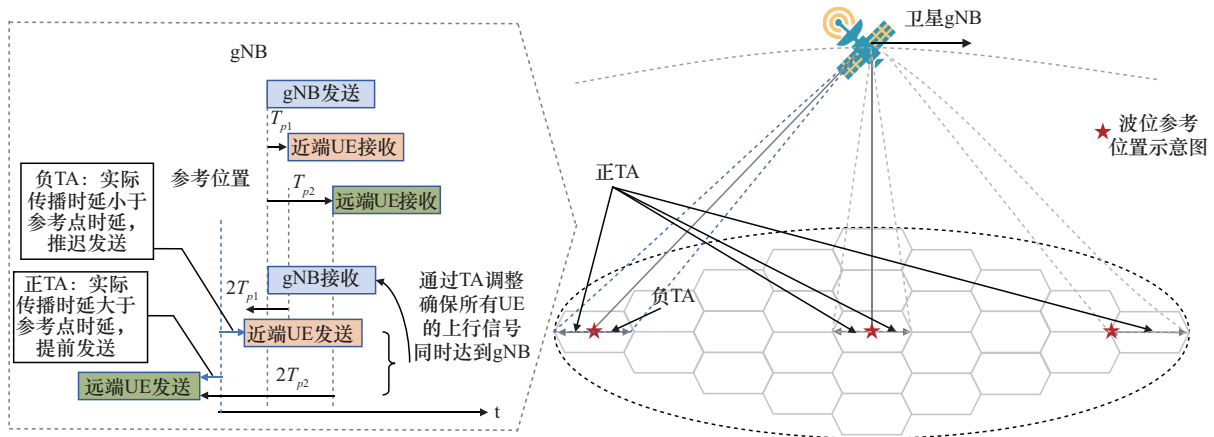


图5 参考点位置的选取示意图

基于多源实测结果整理的残留差分单向时延和差分单向多普勒频移，本文以 TR 38.821 中定义的参数集 1 为例，对 NTN 典型部署场景（场景 1，类型 a）的残留差分单向时延和单向多普勒频移重新整理，见表 2。

对比表 1 和表 2 的差分时延数据可知，采用基于参考位置的定时预补偿后，初始接入过程中需处理的残留定时误差得到了显著降低。差分频偏的优化效果与之类似，此处不再展开说明。下文将重点分析现有协议设计能否满足上述残留定时误差的要求。

1.3 现有 PRACH 格式对时频偏差容忍度

RAN1#123 会议达成了不同 PRACH 格式对定时和频偏误差的容忍度评价准则，并提供了相应的评估结果参考。不同 PRACH 格式能够支持的最大差分往返时延见表 3，不同 PRACH 格式能够

支持的最大往返多普勒频偏见表 4。

对比表 2 至表 4 的数据可知，现有 PRACH 格式能够容忍的时频偏差在部分场景下仍存在明显不足。以 LEO 600 km 30 GHz 场景为例，为满足最大差分频偏要求（单向 25.44 kHz，往返 50.88 kHz），需要采用 60 kHz 或 120 kHz 子载波间隔的短 PRACH 格式，但是对应的短 PRACH 格式均无法满足单向 57.6 μ s 的差分时延要求。若进一步考虑 TR 38.821 中定义的参数集 2（波束半径更大），上述时频矛盾将更为突出。

综上所述，本节首先分析 GNSS 在 UE 活动全过程中所起的关键作用，提炼 GNSS 信号不可用的核心技术挑战，即初始接入阶段和连接态维持阶段的同步问题。然后聚焦上述挑战，分析在 GNSS 信号缺失时，近期 RAN1 会议讨论的基于网络辅助信息的粗补偿与 PRACH 格式的时频偏

表 2 NTN 典型部署场景的残留差分单向时延和单向多普勒频移

卫星轨道		LEO 600 km	LEO 1 200km	GEO	LEO 600 km	LEO 1 200km	GEO	
频段		S/2 GHz	S/2 GHz	S/2 GHz	Ka/30 GHz	Ka/30 GHz	Ka/30 GHz	
波束直径/km		50	90	250	20	40	110	
差分单向时延/ μ s	仰角/($^{\circ}$)	12.5	—	810.3	—	—	357.4	
		30	143.3	257.8	57.6	115.1	—	
		90	1.9	3.3	4.8	0.3	0.7	0.9
差分单向多普勒频移/kHz	仰角/($^{\circ}$)	12.5	—	0.022	—	—	0.15	
		30	0.742	0.78	0	4.38	5.04	0
		90	4.224	3.686	0.092	25.44	23.01	0.6

表 3 不同 PRACH 格式能够支持的最大差分往返时延

格式	L_{RA}	$\Delta f^{RA}/\text{kHz}$	$N_{CP}/\mu\text{s}$	最大 N_{CS}	定时误差/ μs	差分往返时延/ μs
0	839	1.25	103.1	非限制集: 419 限制集 A : 237 限制集 B : 137	0.39	非限制集: 102.34 限制集 A : 102.34 限制集 B : 102.34
1		1.25	684.4			非限制集: 683.59 限制集 A : 225.20 限制集 B : 129.85
2		1.25	152.6			非限制集: 151.82 限制集 A : 151.82 限制集 B : 129.85
3		5	103.1			非限制集: 102.34 限制集 A : 55.71 限制集 B : 31.88
A1	139	15/30/60/120	9.38/4.69/2.34/1.17	69	0.39/0.33/0.11/0.11	8.59/4.04/2.12/0.94
A2			18.75/9.38/4.69/2.34			17.97/8.72/4.46/2.12
A3			28.13/14.06/7.03/3.52			27.34/13.41/6.80/3.29
B1			7.03/3.52/1.76/0.88			6.25/2.86/1.53/0.65
B2			11.72/5.86/2.93/1.46			10.94/5.21/2.70/1.24
B3			16.41/8.20/4.10/2.05			15.63/7.55/3.87/1.82
B4			30.47/15.23/7.62/3.81			29.69/14.58/7.39/3.58
C0			40.36/20.18/10.09/5.05			39.58/19.52/9.87/4.82
C2			66.67/33.33/16.67/8.33			65.89/32.67/16.45/8.11

注: L_{RA} 、 Δf^{RA} 、 N_{CP} 、 N_{CS} 分别表示 PRACH 序列长度、子载波间隔、CP 长度、循环移位置; a/b/c/d 分别对应 4 个子载波间隔下的取值。

表 4 不同 PRACH 格式能够支持的最大往返多普勒频偏

格式	$\Delta f^{RA}/\text{kHz}$	限制集	γ	f_e/ppm	$f_{c,ul}/\text{GHz}$	$f_{c,dl}/\text{GHz}$	scaling 因子	差分单向多普勒/ppm	上行差分往返多普勒/kHz
0/1/2	1.25	非限制集	0	0.1	2	2	2.0	0.21	0.85
		限制集 A	1		2	2	2.0	0.53	2.1
		限制集 A	2		2	2	2.0	0.84	3.35
		限制集 B	3		2	2	2.0	1.15	4.6
		限制集 B	4		2	2	2.0	1.46	5.85
3	5	非限制集	0		2	2	2.0	1.15	4.6
		限制集 A	1		2	2	2.0	2.40	9.6
		限制集 A	2		2	2	2.0	3.65	14.6
		限制集 B	3		2	2	2.0	4.90	19.6
		限制集 B	4		2	2	2.0	6.15	24.6
所有短格式	15	非限制集	0		2	2	2.0	3.65	14.6
					2	2	2.0	7.40	29.6
					30	20	2.5	1.08	54
					30	20	2.5	2.28	114

注: γ 表示衡量不同限制集下的频偏检测性能所引入的因子; f_e 表示频偏误差, ppm 表示 10^{-6} ; $f_{c,ul}$ 表示上行中心频点; $f_{c,dl}$ 表示下行中心频点; scaling 因子定义为 $2f_{c,ul}/f_{c,dl}$ 。PRACH 格式能够支持的差分频偏需满足 scaling 因子 \times 差分往返多普勒频偏 $+ 2f_e \times f_{c,ul} \geq (1 + \gamma)\Delta f^{RA}$ 。

差容忍度之间存在不可忽视的差距问题。因此, 为确保 NTN 在 GNSS 韧性场景下实现可靠同步,

必须设计新的解决方案 (下文将展开论述), 以弥补或克服这一差距。



2 GNSS韧性增强解决方案

针对第1节所述GNSS韧性增强的关键技术挑战，3GPP标准在近期会议进行了多次讨论。截至2025年12月，标准讨论形成的GNSS韧性整体解决方案主要包括以下3个关键方向。

(1) 初始接入流程优化。核心思路是在GNSS信息不可用时，由网络侧提供辅助信息(如参考位置)，以支持终端完成粗略的时频预补偿；针对预补偿后仍存在的残留误差，通过网络侧的闭环调整与(或)终端侧的开环控制进行动态补偿。

(2) 连接态时频同步增强。重点在于增强闭环定时与频偏调整机制，并设计高效的命令指示方案以降低信令开销。

(3) 网络辅助定位。本SI不将定位增强作为单独课题研究，而是作为在GNSS中断期间保障UE稳健接入的关键增强手段。

上述3个方向中，前两项直接应对同步挑战，第三项则旨在为关键流程寻找GNSS不可获取时的替代方案。下文将就上述技术方向逐一展开详细说明。

2.1 初始接入流程优化

关于网络通过提供辅助信息以支持UE实现粗略时频偏预补偿的机制，第1节已作基本介绍，此处不再展开。针对由此产生的残留时频偏误差问题，经过RAN1第122次、122bis及第123次会议讨论，已初步形成以下研究方向。

(1) 多次PRACH发送

本研究方向的核心是让UE多次发送PRACH

来提升检测成功率。针对这一目标，产业界已提出两种代表性方案。

爱立信提出了一种基于共轭前导码传输的方案^[15]，旨在增强PRACH对频偏误差的容忍度。该方案需要UE进行两次前导码传输：第一次传输采用根序列 u 生成的ZC(Zadoff-Chu)序列，符合现有NR PRACH格式；第二次传输使用同一ZC序列的复共轭，对应根序列索引 $-u$ ，利用ZC序列的共轭对称性质，仍可沿用现有协议生成。在接收端，通过联合处理这两个序列，可以在高残留频偏(如 ± 400 kHz)和低信噪比条件下更准确地联合解析定时和频偏。该方案主要涉及媒体接入控制(media access control, MAC)层和RRC层的行为控制，未改变物理层信号格式，可基于现有Rel-18的PRACH重复机制实现，且资源开销固定(仅需两次传输)，因此适用于卫星运动规律相对明确、多普勒范围可预先估算的场景。共轭前导码传输示意图如图6所示。

高通提出了一种基于多次PRACH传输的解决方案^[16]，其核心思路是让UE在不同随机接入时机尝试不同的时频偏补偿值，重复发送PRACH，直至基站实现成功检测。不同时频预补偿PRACH传输示意图如图7所示。这是一种偏向工程实现的策略，其代价是增加随机接入时延并降低空口资源使用效率。该方案性能(如尝试次数、时延、开销等)高度依赖于预补偿值的搜索步长、策略及链路预算，在多普勒变化剧烈或难以预先估算的极端动态场景下，因其实现灵活而具备一定适用优势。

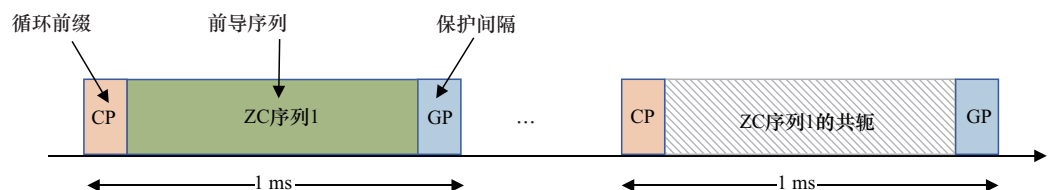


图6 共轭前导码传输示意图

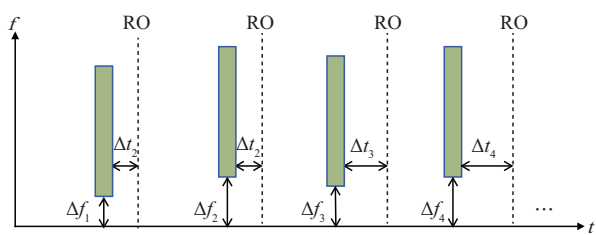


图7 不同时频频补偿PRACH传输示意图

(2) 新的PRACH限制集

本研究方向主要针对定时容错性好，但频率容错性差的长PRACH格式，如格式1。大频偏会导致ZC序列在时域产生多个相关峰（“副峰”），造成时延估计模糊。限制集的核心思想是通过精心设计ZC序列的根和循环移位规则，确保在指定最大频偏范围内，任何时延产生的副峰不会与其他时延的主峰混淆。现有标准限制集(A/B)的容错能力不足。高通公司提出了两种新的设计理念^[16]：一是基于最大差分时延/频偏的保守设计；二是基于二者联合分布的优化设计。后者能提高序列复用效率，但设计更复杂。新PRACH限制集设计思路示意图如图8所示。

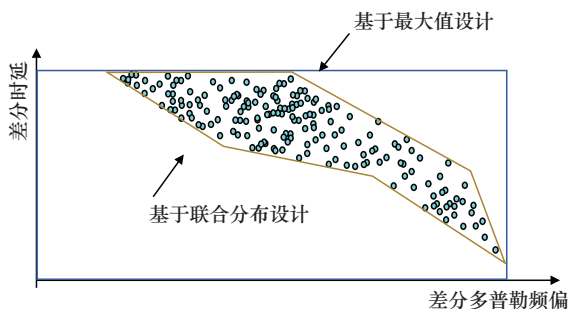


图8 新PRACH限制集设计思路示意图

(3) PRACH根序列集合选择

本研究方向的核心思路是：针对给定的多普勒频偏范围，通过从ZC序列池中精选一组优化根序列，可有效抑制频偏对检测性能的影响，从而实现时延和频偏的更好分离。

PRACH中使用的ZC序列在信道中存在时延 n_0 与频偏 Δf （归一化为 $k = \frac{\Delta f}{f_s}$ ）时，两者均

会导致接收序列产生循环移位，形成复合循环移位效应，进而难以直接分离二者影响。发送序列与接收序列的自相关峰值位置将偏移至 $(n_0 + k \cdot q) \bmod L_{RA}$ 处^[17]，其中 q 为根索引 u 模 L_{RA} 的乘法逆元。小米公司的提案^[18]指出，若信道时延扩展所引入的循环移位为 C_{CS} ，则可通过合理选择根序列 u ，使得 $k \cdot q$ 所引起的循环移位量为 σ ，此时前导序列仍能通过满足以下条件对不同UE进行区分：

$$C_{CS} + N_{CS} < \sigma \quad (2)$$

其中， N_{CS} 为协议中定义的循环移位步长。

(4) 扩展PRACH接收窗口或采用TA余量

本研究方向主要解决现有PRACH格式定时容限不足的问题，具体包含以下两种技术思路。前者从接收端考虑，通过基站(gNB)配置较宽的PRACH接收窗口，并采用多时序假设检测法来捕获具有大差分时延的前导码。这是一种基于基站实现的技术，其接收窗口示意图如图9所示，多家公司均提到了类似思想^[15,19-20]。该方法对UE透明，但会增加基站的信号处理复杂度和存储开销。后者从发送端考虑，中信科移动通信技术股份有限公司提出在前导码前面引入TA余量，并在其后引入额外保护时间^[21]。扩展后的随机接入时机将允许前导信号到达时间存在更大的不确定性，且可避免与其他上行信号发生冲突。

(5) Msg2信令增强

本研究旨在解决PRACH被正确接收后，需要通过增强Msg2中的闭环时频调整命令，以确保后续Msg3能够被正确接收的问题。主要包括两类思路：一是增强Msg2内容，包括扩展TA命令的有效范围（如支持负值）、新增频率调整命令、引入参考点调整命令等；二是在单次PRACH传输中，通过单个或多个RAR MAC协议数据单元调度多个具有不同TA/频率调整值的Msg3，并伴随多个TA命令/频偏调整命令。这需要修改Msg2

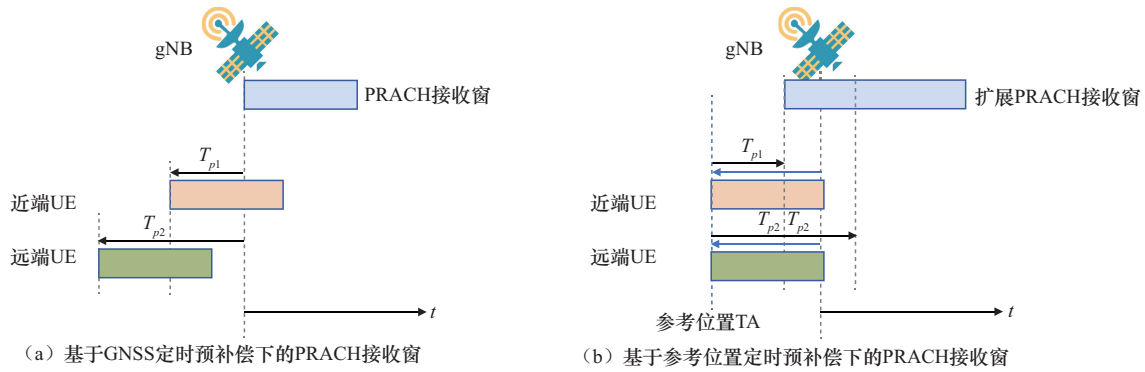


图9 扩展PRACH接收窗口示意图

的消息格式，并要求基站具备基于PRACH的频偏估计算法。

初始接入流程优化候选方案比较见表5，对上述研究方向进行了简要总结。可以看出：定时容错性增强方案倾向于在基站侧或网络配置层面解决问题；频偏容错性增强方案更多涉及序列设计或序列选择优化。

仍以LEO 600 km 30 GHz场景为例，为解决PRACH (Msg1) 接收问题，PRACH接收优化方案见表6。

若要进一步解决Msg3接收阶段的稳定性问题，则需引入优化方案(5)进行闭环增强。由此可见，在实际系统设计与部署中，往往需要综合运用多种技术形成组合解决方案，以应对不同场景与接入阶段的具体挑战。

2.2 连接态时频同步增强

在连接态下，影响定时提前量与频率变化的主要因素包括UE移动性、卫星运动以及晶振精度偏差。定时偏差的跟踪主要通过基于MAC控制信息的闭环定时调整实现，频率偏差主要依赖

表5 初始接入流程优化候选方案比较

序号	方案	应用场景	标准改动	实现代价与挑战
(1)	多次PRACH发送	定时和(或)频偏容错性不足	共轭序列对标准有微小改动	增加接入时延，降低空口资源使用效率
(2)	新PRACH限制集	频偏容错性不足	配置微小改动	降低根序列复用效率，增加序列资源开销
(3)	PRACH根序列集合选择	定时频偏联合优化，改善频偏影响下的定时估计	无	基站具备根序列选择优化算法
(4)	扩展PRACH接收窗口或采用TA余量	定时容错性不足	采用TA余量可能涉及配置修改	增加基站的信号处理复杂度和存储开销；或牺牲上行资源利用率，需要网络侧进行资源配置优化
(5)	Msg2信令增强	增强时频偏闭环调整，减少Msg3影响	修改Msg2的消息格式	基站具备PRACH频偏估计算法

表6 PRACH接收优化方案

方案	最大差分双向时延/ μs	最大差分双向多普勒频移/kHz	优化说明
基线：网络辅助粗同步残留误差	115.2	50.88	—
方案1：基于C2短格式(60 kHz SCS)	16.45	54	定时容错性不足，采用优化方案(1)或(4)后有望解决问题。以优化方案(1)为例，采用20 μs 的优化步长，第5次发送后，残留差分双向时延15.2 μs < 16.45 μs ，满足C2格式允许范围
方案2：基于格式1/2，限制集B	129.85	5.85	频偏容错性不足，采用优化方案(1)、(2)或(3)后有望解决问题

UE根据星历和GNSS信息进行开环预补偿。在GNSS不可用场景下,相关研究内容主要包括:增强闭环定时调整、引入闭环频偏调整,以及研究闭环调整命令指示机制以降低信令开销。前两项研究内容与初始接入过程优化中提及的Msg2信令增强并无本质差异,因此下文将主要介绍第三项研究内容。

多家公司在标准提案中指出了频繁TA更新带来的开销问题。华为指出,随着UE位置不确定度和移动速度的增加,所需的TA调整次数也相应增多^[22]。中国移动分析表明,在LEO 600 km轨道高度下,当卫星仰角从30°变化至90°时,基站需向UE发送约300次TA更新命令^[23]。爱立信进一步指出,当上行预补偿基于参考位置进行,为将定时提前量维持在RAN4规定的定时精度范围内,可能需要以高于2~3次/s的频率发送TA命令,此高频次信令将带来显著开销并降低系统性能^[15]。

为降低TA命令开销,可借鉴Rel-17中引入的 $N_{TA,adj}^{common}$ 机制。该机制的核心是由网络配置一组TA参数(包括公共TA值、漂移率及其变化率),用以描述因卫星与UE相对径向运动所引起的传播时延变化趋势。终端在获得初始TA值后,可依据这些参数自主预测并调整后续TA值,从而大幅减少网络为维护定时同步而频繁下发的信令。

在Rel-17中,经过多轮讨论并在TA精度、信令开销及计算复杂度之间取得平衡,最终确定网络配置以下4个参数。

公共TA值 TA_{Common} : 取值范围为0~66485735,单位步长为 $4.072 \times 10^{-3} \mu s$;

公共TA漂移 $TA_{CommonDrift}$: 取值范围为-257303~257303,单位步长为 $0.2 \times 10^{-3} \mu s/s$;

公共TA漂移变化率 $TA_{CommonDriftVariant}$: 取值范围为0~28949,单位步长为 $0.2 \times 10^{-3} \mu s/s^2$;

参考时间 t_{epoch} : 由帧号与子帧号联合表示的时间标识。

终端侧对TA增量值的计算如下:

$$\frac{TA_{Common}}{2} + \frac{TA_{CommonDrift}}{2} \times (t - t_{epoch}) + \frac{TA_{CommonDriftVariant}}{2} \times (t - t_{epoch})^2 \quad (3)$$

在Rel-17中, $N_{TA,adj}^{common}$ 主要用于补偿参考点与基站之间的定时偏差,一般用于透传转发模式,在再生模式下配置为0。在GNSS韧性增强研究中,针对再生模式下卫星基站处于运动状态的特点,可借鉴该机制的设计思路,在系统信息块(system information block, SIB)或RRC重配置消息中新增信息单元,并对相关参数进行配置。此方式与Rel-17的 $N_{TA,adj}^{common}$ 机制兼容,是对现有定时机制的继承与拓展。

2.3 网络辅助定位

多家公司提出可采用基于网络的UE定位方案^[22-26]作为GNSS韧性研究的补充方案。值得强调的是,低轨卫星星座本身即为实现高精度定位提供了得天独厚的物理基础,这主要源于其三大特性。

(1) 高空间密度与覆盖增强。文献[27]的研究表明,在典型城市峡谷环境(天空开阔角为30°~45°)下,传统GNSS中轨卫星(如GPS、Galileo)平均可见卫星数常低于4颗,制约了定位可用性与精度;而LEO巨型星座(如Starlink、OneWeb)凭借其规模化部署、轨道低、运动快的特性,在相同场景下可提供平均超过10颗(OneWeb)乃至15颗以上(Starlink)的可见卫星数。此外,LEO卫星路径损耗较中轨系统低约30 dB(相当于信号强度提升约1000倍)^[28],显著改善了信号可用性与穿透能力,为终端提供了持续稳定的定位信源。

(2) 卫星高速运动带来的几何构型快速变化。LEO卫星运行速度快,其多普勒频移变化显



著，在相同观测时间内卫星视运动轨迹更长，空间几何构型变化更为明显。这一特性有利于定位算法更快收敛，提升初始定位速度与动态跟踪性能。

(3) 宽带通信信号的高精度测距潜力。低轨 NTN 系统普遍采用与 5G NR 兼容的宽带 OFDM 信号，其带宽可达数十至数百 MHz，远高于传统 GNSS 信号（如 GPS L1 C/A 码带宽约 2 MHz）。根据测距理论^[29]，定时测量精度与信号带宽成反比，因此基于宽带 OFDM 信号进行到达时间（time of arrival, TOA）或到达时间差（time difference of arrival, TDOA）测量，理论上可实现厘米至米级的高精度测距，为高精度定位提供了坚实的物理层基础。

正是基于上述优势，3GPP Rel-18 及产业界开始系统研究如何利用已有通信信号（如同步信号、专用定位参考信号）来实现高鲁棒性的网络辅助定位。在 Rel-18 中，曾提出多种定位方法^[30]，包括下行到达时间差（downlink TDOA, DL-TDOA）、下行离开角（downlink angle of departure, DL-AoD）、上行到达角（uplink angle of arrival, UL-AoA）以及多区往返时间（round trip time, RTT）等。然而，初始接入阶段无法依赖 UL-TDOA、UL-AoA 及多小区 RTT 等上行链路定位方法，原因在于这些方法均以完成精确时频预补偿的上行传输为前提，此时尚不满足条件。DL-AoD 定位方法高度依赖 UE 具有的多天线接收能力，对基站方向进行感知，对手持终端实现难度较大。因此，基于定位参考信号的 DL-TDOA 技术成为最具潜力的解决方案。该测量可在下行接收阶段完成，无须依赖任何上行链路同步，UE 设备可处于 RRC 空闲状态。

DL-TDOA 的定位原理如下：通过计算 UE 接收自两个相邻基站信号的到达时间差，推算出 UE 与这两个基站之间的距离差。如果需要解算用户的二维位置（不含高度信息），则至少需要 3 个基站的测量信息方可实现位置解算。DL-TDOA 定

位示意图如图 10 所示，虚线表示测量误差范围。相较于传统的 TOA 方法，该技术通过引入基站间的差分时间测量，降低了对基站与 UE 间时间同步精度的要求。在下行链路中，可采用 SSB 作为定位参考信号；若采用带宽更宽的专用定位参考信号（positioning reference signal, PRS），则有望进一步提升定位精度。

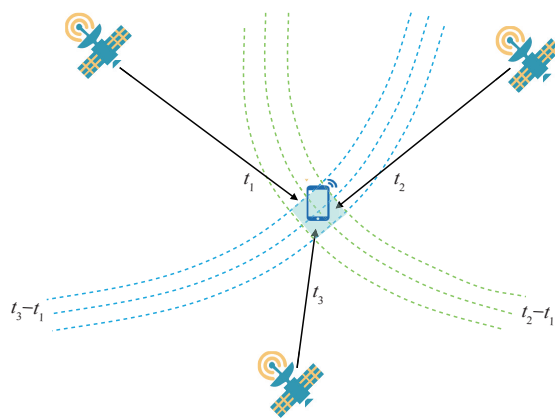


图 10 DL-TDOA 定位示意图

根据 UE 能够看到的卫星数目，定位方式可分为单星定位和多星定位两类，示意图如图 11 所示。

(1) 单星定位

若 UE 仅能接收到单颗卫星发射的定位参考信号，可通过复用不同时刻发出的信号，计算下行到达时间差以实现定位。中国移动的提案^[23]研究了基于 4 次测量时机及 3 个参考信号时间差测量值的方案。仿真结果表明（单星定位误差如图 12 所示），测量时间间隔显著影响定位性能：当测量时间间隔设为 8 s 和 12 s 时，定位误差分别可降至约 4 km 与约 2 km，但相应的总测量耗时需达到 24 s 与 36 s。这是因为测量间隔过短时，卫星位置变化不明显，导致空间几何构型单一，难以有效收敛定位不确定区域。

进一步分析表明，单星定位的精度主要取决于卫星仰角的变化速率：仰角变化越快，所需测量时间越短，定位精度也相应越高。轨道高度为 600 km、轨道倾角 0°（赤道轨道）的卫星在不同

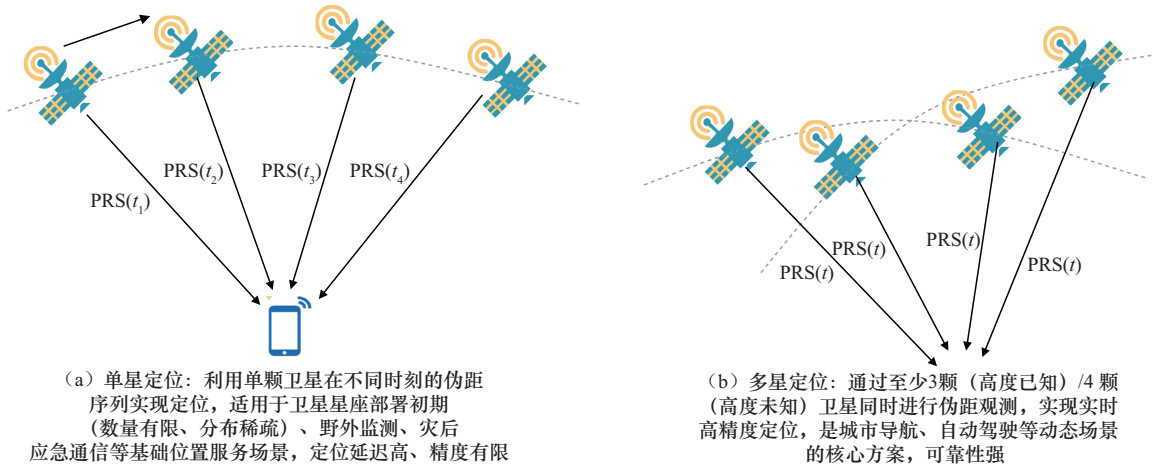


图 11 单星和多星定位示意图

纬度下的仰角变化曲线如图 13 所示。从图 13 可以看出, 随着观测点纬度升高, 卫星仰角变化率逐渐降低。此外, 在相同纬度下, 轨道高度越高, 卫星仰角变化率也越小, 这正与中地球轨道 (medium earth orbit, MEO) 等较高轨卫星的角速度低于 LEO 卫星的运动特性相符。

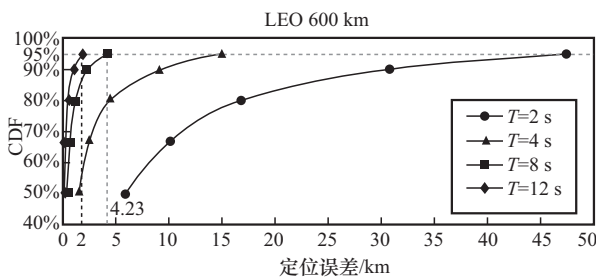


图 12 单星定位误差/T:测量间隔

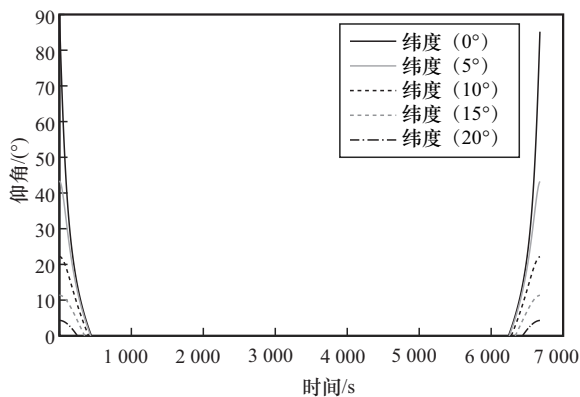


图 13 不同纬度仰角变化曲线

基于上述分析, 建议在实际系统中采用自适应测量间隔策略: 根据用户所处纬度及卫星实时仰角动态调整测量间隔。具体而言, 低纬度地区或卫星过顶 (高仰角) 时, 仰角变化快, 可采用较短间隔 (如 3~5 s), 以加速定位收敛; 高纬度地区或卫星接近地平线 (低仰角) 时, 仰角变化慢, 应适当延长间隔 (如 10~20 s), 以积累足够的几何构型变化, 确保定位精度。该策略可有效平衡定位速度与精度, 适应不同纬度、不同卫星轨道类型下的实际部署场景, 为 NR-NTN 系统在 GNSS 失效时提供稳健的定位恢复能力。

(2) 多星定位

若 UE 能够同时接收来自多颗卫星的定位参考信号, 则可在单一观测窗口内通过测量卫星间的信号到达时间差, 实现快速的 DL-TDOA 定位。星座规模越大或 UE 所处纬度越高, 可见卫星数量通常越多, 定位精度也越高。华为提案^[22]分析了不同轨道高度和星座规模下的可见星数。以 LEO 600 km 轨道高度、800 颗卫星的中等配置为例 (40 个轨道面, 每面 20 颗星, 倾角 53°), 各纬度下可见卫星数量统计如图 14 所示。在纬度 0° 处, 若 UE 可同时观测到 4 颗卫星, 则 90% 的 UE 可实现 232 m 以内的定位误差。根据 vivo 提



案^[25], 该定位精度已经满足协议 TS38.133 中定义的允许定时误差要求。对于可见卫星数目少于 4 颗的场景, 可进一步结合单星定位方法进行融合定位。

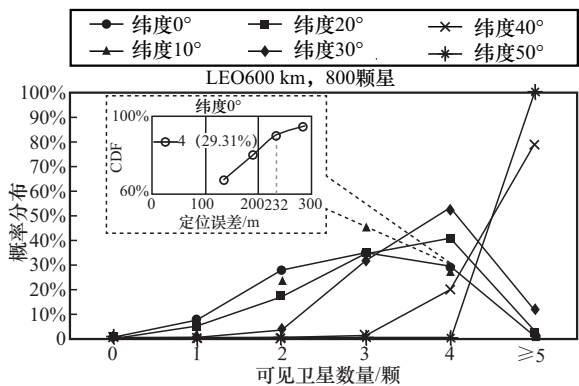


图 14 不同纬度可见卫星数量统计

综上所述, 网络侧辅助定位是提升 GNSS 鲁棒性的一条有效技术路径。

3 展望

截至 2025 年 12 月, GNSS 韧性增强的相关讨论主要聚焦于 RAN1 所负责的随机接入流程及连接态下的同步保障机制, 具体增强方案对协议修改细节尚未开展。对于下一阶段的标准化工作, 预计将在以下方向寻求突破。

(1) 同步增强: 完善初始接入优化方案, 并细化连接态下的定时与频偏闭环调整机制。

(2) 移动性增强: 除了同步外, GNSS 信息还用于基于位置/距离的条件切换、邻区测量定时配置优化等移动性流程, 这部分将由 RAN2 开展后续研究。

(3) 兼容性与模式切换: 细化 GNSS 不可用 UE 与现有设备的后向兼容方案, 包括为两类终端分开配置 PRACH 资源以避免相互干扰, 并研究 GNSS 可用模式与鲁棒模式间平滑转换的机制。

此外, RAN4 中关于时频误差的要求是否需要重新评估, 以及在典型 NTN 场景中纳入 Ku 频

段等考量, 仍需进一步讨论。根据当前时间规划, NTN GNSS 韧性增强的标准化工作预计将于 2026 年 6 月 RAN#112 次会议中确定后续方向, 包括是否在 Rel-20 启动规范制定、延长现有研究项目, 或推迟至 Rel-21 进行标准化推进。

4 结束语

Rel-20 NR NTN 在 GNSS 韧性增强方面已讨论形成以三大方向为核心的整体技术框架。在初始接入流程优化方面, 研究重点聚焦于 GNSS 不可用场景下的接入可靠性提升: 通过网络广播参考位置信息 (优先采用波束级配置以提升定位精度), 有效缩小 UE 位置的不确定范围; 同时, 针对预补偿残留误差, 结合网络侧闭环调整与终端侧开环控制进行动态补偿。在连接态时频同步增强方面, 重点围绕闭环定时/频偏调整机制的增强, 并设计低开销信令指示方案以降低不确定性。在网络辅助定位方面, 研究了单星及多星 DL-TDOA 定位方案的可行性及精度, 证明其可有效增强 NTN 网络韧性。未来, Rel-20 及后续版本将进一步细化上述流程, 并系统研究基于位置的条件切换等高层移动性流程、GNSS 可用和不可用设备的兼容性及模式平滑转换机制, 为 NTN 内生韧性的系统实现提供清晰的技术路径。

参考文献:

- [1] Lin X Q, Lin Z P, Löwenmark S E, et al. Doppler shift estimation in 5G new radio non-terrestrial networks[C]//Proceedings of the 2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [2] Zhu J F, Sun Y H, Peng M G. Timing advance estimation in low earth orbit satellite networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(3): 4366-4382.
- [3] Torrieri D J. Statistical theory of passive location systems[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1984, AES-20(2): 183-198.
- [4] Neinavaie M, Shadram Z, Kozhaya S, et al. First results of dif-

- ferential Doppler positioning with unknown Starlink satellite signals[C]//Proceedings of the 2022 IEEE Aerospace Conference (AERO). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-14.
- [5] Kassas Z M, Kozhaya S, Kanj H, et al. Navigation with multi-constellation LEO satellite signals of opportunity: Starlink, OneWeb, Orbcomm, and Iridium[C]//Proceedings of the 2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). Piscataway: IEEE Press, 2023: 338-343.
- [6] Peral-Rosado J A, Raulefs R, López-Salcedo J A, et al. Survey of cellular mobile radio localization methods: from 1G to 5G[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(2): 1124-1148.
- [7] Garcia N, Wymeersch H, Larsson E G, et al. Direct localization for massive MIMO[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2017, 65(10): 2475-2487.
- [8] Kang J, N P E, Lee J, et al. Fundamental performance bounds for carrier phase positioning in LEO-PNT systems[C]//Proceedings of the 2024 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Piscataway: IEEE Press, 2024: 13496-13500.
- [9] Shi J S, Yeh B H, Wu J M, et al. Federated Kalman filter-based fusion of LEO and GNSS positioning[C]//Proceedings of the 2024 IEEE 99th Vehicular Technology Conference (VTC2024-Spring). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-5.
- [10] Emenonye D R, Dhillon H S, Buehrer R M. Fundamentals of LEO-based localization[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2025, 71(7): 5277-5311.
- [11] Neinavaie M, Khalife J, Kassas Z M. Exploiting Starlink signals for navigation: first results[C]//Proceedings of the 34th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2021). Saint Louis: Institute of Navigation, 2021: 2766-2773.
- [12] Neinavaie M, Khalife J, Kassas Z M. Acquisition, Doppler tracking, and positioning with Starlink LEO satellites: first results[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2022, 58(3): 2606-2610.
- [13] 3GPP RP-251863: 2025 Study on GNSS resilient NR-NTN operation[S].
- [14] 3GPP R1-2111127: 2021 FL Summary #4 on enhancements on UL time and frequency synchronization for NR NTN[S].
- [15] 3GPP R1-2506785: 2025 On NR-NTN GNSS resilience[S].
- [16] 3GPP R1-2507719: 2025 NR-NTN GNSS resilience[S].
- [17] Shinakov Y S. Ambiguity functions of Zadoff-Chu signals for 5-G synchronization systems[C]//Proceedings of the 2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-7.
- [18] 3GPP R1-2506987: 2025 Discussion on NR-NTN GNSS resilience[S].
- [19] 3GPP R1-2507251: 2025 Discussion on NR-NTN GNSS resilience[S].
- [20] 3GPP R1-2507850: 2025 Discussion on GNSS resilience for NR-NTN[S].
- [21] 3GPP R1-2507117: 2025 Discussion on NR-NTN GNSS resilience[S].
- [22] 3GPP R1-2506941: 2025 GNSS resilience for NR-NTN[S].
- [23] 3GPP R1-2507012: 2025 Discussion on NR-NTN GNSS resilience[S].
- [24] 3GPP R1-2507761: 2025 Discussion on Rel-20 GNSS resilient NR NTN operation[S].
- [25] 3GPP R1-2506896: 2025 Discussion on NR-NTN GNSS resilience[S].
- [26] 3GPP R1-2507174: 2025 Discussion on NR-NTN GNSS resilience[S].
- [27] More H, Cianca E, De Sanctis M. Comparing positioning performance of LEO mega-constellations and GNSS in urban canyons[J]. IEEE Access, 2024, 12: 24465-24482.
- [28] Reid T G R, Walter T, Enge P K, et al. Navigation from low earth orbit-Part 1: concept, current capability, and future promise[M]//Morton Y J, van Diggelen F, Spilker J J, et al. Position, navigation, and timing technologies in the 21st Century: integrated satellite navigation, sensor systems, and civil applications, Volume 2. Piscataway: Wiley-IEEE Press, 2020: 1359-1379.
- [29] Skolnik M I. Introduction to radar systems[M]. New York: McGraw-Hill, 1980.
- [30] Keating R, Saily M, Hulkkonen J, et al. Overview of positioning in 5G new radio[C]//Proceedings of the 2019 16th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS). Piscataway: IEEE Press, 2019: 320-324.

[作者简介]



唐志华 (1982-), 女, 博士, 上海卫星互联网研究院有限公司工程师, 主要研究方向为卫星通信、5G/6G关键技术、无线空口资源管理技术。



张芳（1980-），女，上海卫星互联网研究院有限公司工程师，主要研究方向为卫星通信和5G/6G关键技术。



徐晓帆（1986-），男，博士，上海卫星互联网研究院有限公司正高级工程师，主要研究方向为5G/6G通信技术与空天地一体化网络（SAGIN）架构。



焦凌霄（1991-），男，博士，上海卫星互联网研究院有限公司工程师，主要研究方向为卫星通信和5G/6G关键技术。



童建飞（1994-），男，博士，上海卫星互联网研究院有限公司工程师，主要研究方向为卫星通信和5G/6G关键技术。



严宏（1978-），男，上海卫星互联网研究院有限公司高级工程师，主要研究方向为卫星通信和5G/6G关键技术。



孙羿（1997-），女，博士，上海卫星互联网研究院有限公司工程师，主要研究方向为卫星通信和5G/6G关键技术。