



XXXX

面向5G存量手机直连卫星及未来6G场景的关键技术研究

程锦霞, 赵阳, 于天意, 赵琳, 邓伟

(中国移动通信有限公司研究院, 北京 100053)

摘 要: 随着5G非地面网络(NTN)技术研究的不断深入以及6G空天地海一体化愿景的提出, 存量手机直连卫星技术凭借其低成本、易部署、可快速落地等优势, 被视为实现全球无缝覆盖的重要技术途径之一。首先分析了5G存量手机直连卫星场景面临的时频同步失效、随机接入超窗、链路预算不足等核心挑战; 其次, 针对上述问题, 提出了面向存量手机直连卫星的基于动态参考点的时间同步技术、基于静态参考点的频率同步技术、以及随机接入增强技术方案; 最后, 通过仿真与实验室测试, 充分验证了所提存量手机直连卫星技术方案的可行性, 同时表明了所提时频同步技术可为6G NTN中无全球导航卫星系统(GNSS)场景中的终端接入与同步提供关键技术支撑。

关键词: 手机直连卫星; 存量手机; 非地面网络; 时间同步; 频率同步

中图分类号: TN915.85

文献标志码: A

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

Research on key technologies for 5G legacy smartphone direct-to-satellite communications and future 6G scenarios

Cheng Jinxia, Zhao Yang, Yu Tianyi, Zhao Lin, Deng Wei

China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China

Abstract: With the continuous deepening of research on 5G non-terrestrial networks (NTN) and the proposal of the 6G integrated space-air-ground-sea vision, the direct-to-satellite technology for legacy smartphones, featuring advantages such as low cost, easy deployment, and rapid implementation, was regarded as one of the important technical approaches to achieve global seamless coverage. Firstly, the core challenges faced by the 5G legacy smartphone direct-to-satellite scenario were analyzed, including time and frequency synchronization failure, random access window overrun and insufficient link budget. Secondly, to address the above issues, a time synchronization scheme based on dynamic reference points, a frequency synchronization scheme based on static reference points, and a random access enhancement scheme for legacy smartphone direct-to-satellite communication were proposed. Finally, through simula-

收稿日期: 2026-07-16; 修回日期: 2026-08-05

通信作者: 赵阳, zhaoyangyj@chinamobile.com

基金项目: 民用航天技术预先研究项目(编号: D030101)

Foundation Items: Civil Space Technology Pre Research Project(No. D030101)



tions and laboratory measurements, the feasibility of the proposed technical schemes was fully verified, and it was also demonstrated that the proposed time-frequency synchronization schemes can provide key technical support for terminal access and synchronization in global navigation satellite system (GNSS)-free scenarios of 6G NTN.

Key words: satellite-direct-to-cell, legacy smartphone, Non-Terrestrial Network, time synchronization, frequency synchronization

1 引言

随着第五代移动通信系统 (Fifth Generation, 5G) 对非地面网络 (Non-Terrestrial Network, NTN) 技术标准化的推进以及第六代移动通信系统 (Sixth Generation, 6G) 空天地一体化愿景的提出^[1], 手机直连卫星技术可有效填补地面蜂窝网络的覆盖盲区, 是构建全域无缝立体通信网络的关键技术。

相对于地面蜂窝网络, 低轨卫星通信系统具有高移动、远距离、广覆盖的固有特性: 一方面导致卫星通信系统中信号传播时延远大于地面蜂窝网络, 400km 轨道高度卫星对应的的信号往返传播时延约 3ms, 超出 5G 地面协议可支持的定时补偿能力, 影响上行时间同步的建立与维持; 另一方面, 低轨卫星在轨运行速率约 7.6 km/s, 会引入较严重的多普勒效应, 多普勒频偏可达 24 ppm (parts per million) 左右^[2], 远超基站和终端频偏处理范围, 无法实现频率同步; 同时星地远距离传输导致更强的路径损耗, 进一步恶化了链路预算。

针对星地大时延下的时间同步问题, 现有研究主要通过终端改造或前导序列优化两种技术路线展开^[3]。文献[4]提出终端可利用全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 与星历信息计算星地距离, 自主进行定时补偿以实现时间同步。文献[5]通过时域级联多组不同根索引、大子载波间隔的 Zadoff-Chu (ZC) 序列, 构造适配卫星大时延特性的长前导序列。文献[6]提出了一种基于多长度 ZC 序列和共轭对称传输

的新型随机接入前导格式, 并搭配改进型峰值检测算法, 可有效适配低轨卫星通信场景。文献[2]提出一种兼容 5G 新无线电系统 (New Radio, NR) 随机接入机制的基于位置的定时提前 (Timing Advance, TA) 估计方法, 通过下行同步阶段获取的到达时间差 (TDOA) 与到达频率差 (FDOA) 测量值实现终端定位, 进而计算 TA 值。

针对卫星高速移动引入的频率同步问题, 文献[7]提出利用 GNSS 定位提供的精确星历信息, 由终端预先补偿多普勒频偏, 以实现上下行频率同步。文献[8]提出了一种适用于低轨卫星的多普勒频偏的几何计算方法, 仅需轨道参数和最大可视仰角即可快速获取可见窗内的多普勒频移时变特性, 为接收机频偏估计与补偿提供先验信息。文献[9]提出了一种基于星历和终端位置信息的频偏估计算法, 首先利用星历与终端位置信息进行粗略的多普勒频偏预补偿, 再对残余频偏进行精细估计。文献[10]提出了一种基于 5G 帧结构的低轨卫星通信系统频偏估计方法, 利用主同步信号 (PSS) 进行多普勒频移的两步估计和多普勒变化率的累积相位差估计。

面对上述卫星空口的关键挑战, 当前全球手机直连卫星已形成三条主流技术路径^{[11][12]}。其一为基于私有协议的传统卫星通信系统, 需定制手机芯片, 以 Iridium、Globalstar 等为代表, 目前已实现商用; 其二为 3GPP NTN 国际标准路线, 该路线要求网络与终端均须进行协议增强以适应卫星链路特性, 且仍处于持续迭代阶段; 其三为存量手机直连卫星技术, 即无需对现有商用手机进行任何硬件或协议修改, 便可直接与卫星通

信，以 SpaceX、AST SpaceMobile 等厂商为代表^{[13][14][15][16]}。

存量手机直连卫星技术依托成熟的地面终端产业链，具有商业化落地快、用户准入门槛低、可直接兼容现有海量智能手机等显著优势，因此具有重要的研究价值与广阔的应用前景。由于 5G 存量终端未针对卫星通信场景进行任何硬件与协议定制优化，直连卫星时面临时频偏无法自主补偿、随机接入超窗、链路预算不足、星间切换成功率低及组网成本高昂等多重挑战。

时频同步方面，如前文所述，现有方案多依赖终端硬件改造与协议升级实现^[17]，面向存量手机直连卫星场景，文献[14]提出基站侧基于小区中心点的统一时频补偿思路，但尚未完成工程可行性验证。随机接入方面，文献[18]指出需通过设计新型 ZC 序列、优化检测估计算法或协议机制，提升低轨 NTN 场景的随机接入成功率，但无法适配存量场景；文献[19]针对 5G 手机直连卫星提出网络侧为终端配置更长周期的随机接入时机（Physical Random Access Channel Occasion, RO），并进行多随机接入响应（Random Access Response, RAR）的重复发送，但该方案引入了较长的接入时延。链路预算方面，文献[14][20]的系统级链路分析表明，星地大传播时延带来的路径损耗与终端天线能力受限是存量手机直连卫星链路预算不足的根源。针对该问题，现有研究从多维度提出优化方案，包括采用大口径星载天线或集成终端专用天线^{[14][21]}，以及信号重复传输、多时隙联合信道估计、参考信号功率增强等物理层增强技术^[22]；文献[23]进一步提出基于卫星集群的分布式波束赋形与大规模多输入多输出（MIMO）技术，用于上行系统容量提升。针对星间切换问题，文献[24]提出对协议进行适应性增强，研究基于多属性判决的星间无缝切换技术，文献[25]总结了 3GPP NTN 协议为提升星间切换成功率引入的切换事件，同时提出了基于深

度强化学习的资源预测机制实现切换前的资源预分配。此外，为降低组网成本，文献[21]构建了收益、复杂度、成本与功耗的多维约束模型，通过系统级多目标优化给出星载相控阵阵面规模的设计准则。

现有 5G 标准以终端具备 GNSS 能力为前提，但实际场景中 GNSS 易受干扰、定位精度不足，且持续定位会增加终端的功耗开销，因此无 GNSS（GNSS-Free）场景下的接入技术已成为 6G NTN 的研究方向之一。针对该问题，文献[26]提出基于网络辅助信息、终端自主定位或物理随机接入信道（Physical Random Access Channel, PRACH）信号增强的接入机制，为该场景的接入流程提供了解决思路。

针对上述问题，面向 5G 存量手机直连卫星场景，本文提出了基于动态参考点的时间同步与基于静态参考点的频率同步方案、以及随机接入增强机制，有效解决了存量终端零改造条件下直连卫星的时频同步、随机接入超窗难题，并通过仿真与实验室测试证明了所提方案的可行性。同时，所提时频同步方案具备向 6G 场景演进的能力，可为 6G NTN 中的 GNSS-Free 场景提供关键技术支撑。

2 存量手机直连卫星的核心挑战

存量手机直连卫星技术旨在采用与地面蜂窝网络一致的空口协议，实现存量终端在不做任何改造的情况下直接接入卫星通信系统。然而，卫星通信链路相较于地面蜂窝网络具有高动态性、超远传输距离、广域覆盖等固有特性，在不对终端进行任何改造的前提下，存量手机直连卫星面临一系列关键技术挑战，本节将进行具体分析。

2.1 星地动态大时延下的时间同步

在 5G NR 系统中，为避免符号间干扰并保证上行链路的小区正交性，不同终端发送的上行信号到达基站时需保持时间对齐^[1]。



在随机接入过程中, 5G NR 协议规定基站通过检测 PRACH 前导序列估计各终端的 TA 值, 并在 RAR 消息中向终端下发定时提前命令 (Timing Advance Command, TAC), 终端据此调整上行信号发送时刻, 实现时间同步。其中, RAR 携带的初始 TAC 取值区间为 $T_A = 0, 1, 2, \dots, 3846$ 。则对于系统子载波间隔 (Subcarrier Spacing, SCS) 为 $2^\mu \cdot 15$ kHz, 终端最终所采用的定时提前调整量为:

$$TA = (N_{TA} + N_{TA, offset}) T_C \quad (1)$$

其中, $N_{TA} = \frac{(16 \cdot 64 \cdot T_A)}{2^\mu}$, $N_{TA, offset}$ 根据不同的频段和子载波间隔变化, $T_C = 0.509\text{ns}$ 为 5G NR 系统中的基本时间单元。取 $\mu = 0$ 进行估算, 可得到 SCS 为 15kHz 的 5G NR 系统所支持的最大定时提前调整量为:

$$16 \cdot 64 \cdot 3846 \cdot 0.509\text{ns} \approx 2\text{ms} \quad (2)$$

终端完成初始随机接入后, 为应对终端移动等引起的信号传播时延变化以维持上行时间同步, 5G NR 在连接态引入闭环定时调整机制。基站可通过 MAC 层控制单元 (MAC Control Element, MAC CE) 向终端下发 6bits 长度的 TAC, 索引取值范围为 $T_A = 0, 1, 2, \dots, 63$, 指示终端对当前定时提前量 N_{TA_old} 进行增量式调整。此时终端计算更新其定时提前调整量 N_{TA_new} , 并以此调整上行信号发射时间:

$$N_{TA_new} = N_{TA_old} + (T_A - 31) \cdot 16 \cdot 64 / 2^\mu \quad (3)$$

其中, 该闭环调整步长与 SCS 相关, 当 $\mu = 0$, 即 SCS 为 15kHz 时, 单步调整步长最大约为:

$$(63 - 31) \cdot 16 \cdot 64 \cdot 0.509 \approx 16.67\text{ns} \quad (4)$$

地面蜂窝网络中, 基站与终端间传播时延仅为微秒量级且变化平缓, 现有前导码设计与 TAC 调整机制足以维持上行时间同步。而卫星通信场景下, 星地链路传播时延显著增大, 同时卫星的高速运动导致信号往返时间实时变化。因此存量

手机直连卫星的时间同步面临三方面核心挑战。其一, 现有 PRACH 前导码序列的设计主要针对地面覆盖场景, 其最大可检测的往返时延有限, 难以覆盖星地链路的超长传播时延, 导致基站可能无法在预期的检测窗口内正确接收前导码。其二, 即使基站可成功检测前导码并完成时延估计, 由于该时延值已超出协议规定的 TAC 取值范围, 基站无法通过 RAR 向终端下发有效的初始 TAC, 导致终端无法完成初始上行同步。其三, 在通信业务过程中, 低轨卫星高速运动引发星地远距离高动态变化, 进而导致定时漂移远超地面通信系统 TA 调整量的上限, 且难以实现实时跟踪, 从而累计过大的时偏。上述问题最终将导致时间同步失效, 进而引发终端随机接入失败、或通信链路频繁中断。

2.2 卫星高速运动下的频率同步

频率同步则旨在对上下行链路的多普勒频偏进行估计与补偿, 以保障信号的正确接收与解调。地面通信系统中, 基站与终端之间相对静止或低速移动, 链路最大频偏不超过 1 kHz。

低轨卫星轨道高度通常为 400km~2000km, 星地间高速相对运动导致多普勒频偏显著大于地面场景, 且呈快速时变特性。以 400 km 轨高的透明转发低轨卫星为例, 考虑地面静止终端, 其服务链路多普勒频偏随终端仰角的变化趋势如图 1 所示 (载波频率为 $f_c = 1.8\text{GHz}$)。

可见该场景下产生的多普勒频偏最大可达数十 kHz, 远超基站或存量终端的频偏处理能力上

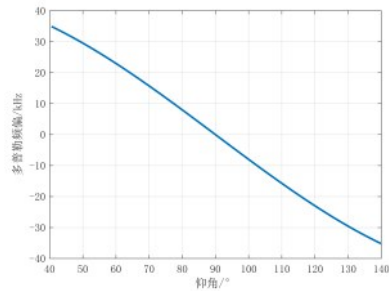


图1 服务链路频偏示意图(轨高400km)

限。因此，存量手机直连卫星场景的频率同步面临严峻挑战。一方面，由于存量终端的频率捕获范围有限，过大的下行多普勒频偏导致终端无法检测到卫星下行同步信号；另一方面，存量终端发射的上行信号到达接收端的残留频偏远超基站侧的频偏处理能力，导致上行信号解调失败，最终造成星地通信链路无法建立。

2.3 远距离传输导致的随机接入超窗

随机接入过程中，终端向基站发送 Msg1 后持续监听物理下行控制信道（PDCCH）以接收 RAR，即 Msg2。3GPP 协议规定地面蜂窝系统的 RAR 接收窗口最大时长为 10 ms，终端若在该窗口内未接收到 RAR 消息，则判定本次接入失败并重新发送前导码^[18]。而星地链路往返传输时延远高于地面链路，终端发送 Msg1 后无法在对应的 RAR 接收窗口内收到基站下发的 Msg2，则导致随机接入失败，相关过程如图 2 所示。

2.4 星地链路预算受限

现有 5G 手机的天线面向地面移动通信场景设计，协议规定其额定最大发射功率为 23 dBm，已满足地面网络各场景的链路预算需求。而卫星通信场景中，手持终端全向天线无法实时对准高速运动的卫星，导致天线增益明显受限^[27]，同时星地远距离传输导致路径损耗大幅增加，链路性能劣化。表 1、表 2 分别给出了 2 平米口径卫星天线，存量手机直连低轨卫星的下行、上行链路预算。

由上述链路预算结果可见，在保证解调性能的前提下，上行链路是系统性能的主要瓶颈。存

表 1 下行链路预算

下行链路参数		星下点	边缘点
频率	GHz	1.81	
卫星高度	km	400	
卫星 EIRP 密度	dBW/MHz		34
卫星发射 EIRP	dBW	40.98970004	35.98970004
信道带宽	MHz	5	5
大气损耗	dB		0.1
闪烁损耗	dB		2.2
链路余量	dB		3
极化损耗	dB		3
波束边缘损失	dB	0	1
终端仰角	°	90	40
对应的卫星扫描角	°	0	46.11974357
扫描损耗	dB	0	3
路损	dB	149.6447713	153.1396638
终端 G/T 值	dB/K		-35.65745103
C/N	dB	8.99777765	1.502885199

表 2 上行链路预算

上行链路参数		星下点	边缘点
频率	GHz	1.71	
卫星高度	km	400	
终端发射 EIRP	dBW		-12
信道带宽	kHz	360	360
大气损耗	dB		0.1
闪烁损耗	dB		2.2
链路余量	dB		3
极化损耗	dB		3
波束边缘损失	dB	0	1
终端仰角	°	90	40
对应的卫星扫描角	°	0	46.11974357
扫描损耗	dB	0	3
路损	dB	149.151122	152.6460145
卫星 G/T 值	dB/K	1.1	-2.9
C/N	dB	4.685852958	-2.809039493

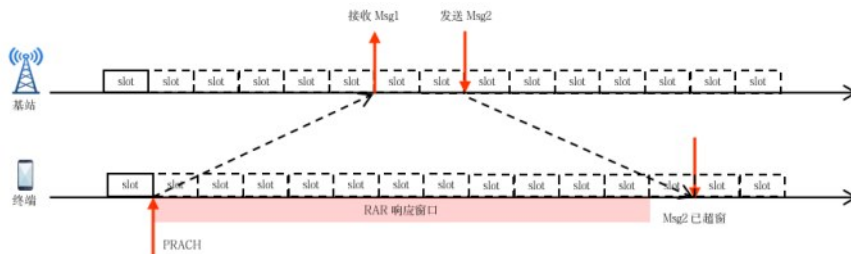


图 2 随机接入超窗示意图



量终端的发射有效全向辐射功率（Effective Isotropic Radiated Power, EIRP）受限，导致卫星接收端的上行信号强度偏低、信噪比恶化，低仰角场景下难以满足业务需求。

2.5 星间切换难题

低轨卫星的高速移动导致单星对地覆盖时长有限，为保障用户业务连续性，需频繁执行星间切换，切换流程涉及小区测量、切换判决和切换执行三个环节。

首先，由于存量终端无法自主补偿时频偏，服务卫星侧与目标卫星侧对应的残留时频偏差较大。该跳变可能超出存量终端时频跟踪承受范围，导致终端无法对目标邻区的同步信号块（SS/PBCH Block, SSB）进行有效检测与测量，影响切换判决的正常启动。

其次，在邻区测量配置方面，5G NR 协议定义了 SSB 测量定时配置（SS/PBCH Block Measurement Timing Configuration, SMTC），用以指示终端进行小区 SSB 测量的时间窗口。图3给出了 SMTC 窗口的示意，其时域位置由周期（periodicity）、持续时长（duration）和偏移量（offset）三个参数确定。SMTC 配置需保证邻区 SSB 落入该窗口内，使得终端在该窗口内完成邻区信号的检测与测量。

其中，SMTC 偏移量的配置主要取决于本区与邻区的信号传播时延。在地面网络中，相邻小区间的信号传播时延差异小，SMTC 窗口配置相对固定。但在卫星场景下，如图4所示，本星、邻星与终端之间的距离 d 、 d' 差异大且动态变化。

由于网络侧无法获取存量终端的具体位置进而实时计算 SMTC 窗口偏移量，终端可能无法在 SMTC 窗口内检测到邻区 SSB，导致邻区测量失败。

最后，在切换判决方面，由于地面通信网络中的小区中心与边缘的信号质量差异明显，小区间切换可根据参考信号接收功率（RSRP）或参考信号接收质量（RSRQ）等测量结果触发。但在卫星通信场景下，单卫星波束覆盖范围广、且信号质量分布相对均匀，传统的信号质量门限触发机制难以生效。尽管后续 3GPP 针对 NTN 引入了基于时间与位置的切换增强机制^[28]，但存量终端受限于地面协议能力，无法支持上述 NTN 增强特性。

综上，存量终端难以切换至最优邻区，且无线链路失败风险增加，影响通信连续性与服务质量。

2.6 广域覆盖下的组网成本问题

PRACH 前导码（Preamble）格式直接决定了小区覆盖半径的上限，其设计需确保循环前缀（Cyclic Prefix, CP）与保护间隔（Guard Time, GT）能够容纳小区内最大往返传播时延，以避免用户间干扰^[9]。图5给出了不同 Preamble 格式对应的覆盖半径在卫星通信场景中的示意。

假设在图示参考点处实现上下行帧头严格对齐，则卫星小区覆盖范围内任意终端与参考点所在参考面的距离 d_0 需满足约束条件：

$$d_0 \leq r_0 \quad (5)$$

式中， r_0 表示地面大网规定的不同 Preamble 所对

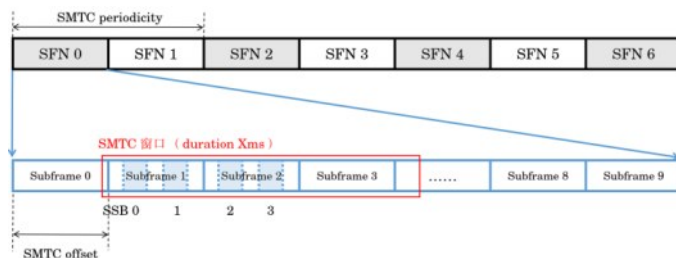


图3 SMTC 窗口配置示意图

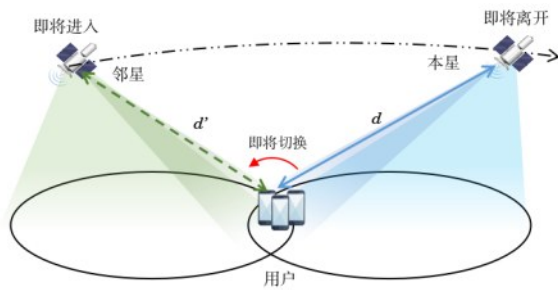


图4 星间切换示意图

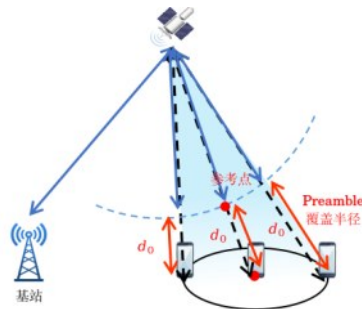


图5 Preamble 覆盖半径示意图

应的覆盖半径。基于上述约束，表3给出了部分 PRACH Preamble format 对应的地面大网覆盖半径，以及本文所提方案在轨道高度约400 km 下的存量实际覆盖半径，其中 L_{RA} 表示序列长度， Δf^{RA} 表示子载波间隔。

可以注意到，NTN 场景下，星地链路距离导致现有 PRACH Preamble format 可支持的小区覆盖半径减小。另一方面，覆盖半径较大的 Preamble（如 format1），其较小的子载波间隔导致抗频偏性能较差。由于存量终端无法自主进行时频偏补偿，结合基站的 PRACH 频偏处理能力约束，采用本文所提方案，400km 轨高下存量小区覆盖半径仅约 8 km。

为实现全球广域覆盖并保障用户业务连续性，卫星覆盖需具备空间连续性，且相邻卫星波束之间需存在足够的重叠覆盖区，以保证终端完成切换前的测量环节。因此对于低轨卫星组网，需发射的卫星数量十分庞大，涉及卫星制造、发射部署、在轨运维及地面信关站配套等一系列环节，网络建设成本极高。

3 存量手机直连卫星的关键技术

针对上述挑战，本文创新性地提出了基于动态参考点的时间同步技术、基于静态参考点的频率同步技术、以及随机接入增强技术方案，以解决存量手机直连卫星场景下的时频同步及随机接入超窗问题。

3.1 时间同步技术

针对存量手机直连卫星场景中的时间同步问题，本文提出一种基于动态参考点的时间同步技术方案。该方案通过选取动态参考点，对小区内终端实施统一的由基站至参考点链路的 TA 预补偿，在参考点处实现上下行帧头的对齐，以完成该场景下的时间同步。

其中，参考点位置的选取直接影响时间同步性能。若将参考点固定于小区覆盖中心^[14]，小区内部分终端会产生负向定时提前量，然而现有 3GPP 协议仅允许通过 Msg2 下发正向 TAC，不支持负 TA 配置，这会导致部分终端接入失败。因此，参考点需动态选取以规避负 TA。因此，本文方案基于小区中心参考的设计思路，以卫星实时位置与小区中心的连线为基准，将参考点设于

表3 协议规定及延伸

制式	format	L_{RA}	Δf^{RA}	地面大网覆盖半径	存量实际覆盖半径（轨高约 400km）
NR	0	839	1.25 kHz	14.53km	8km
NR	1	839	1.25 kHz	102.7km	56km
NR	3	839	5 kHz	14.53km	8km
NR	B4	139	15 kHz	3.8km	2km
NR	C2	139	15 kHz	9.2km	5km



该连线方向上、距小区中心偏移弹性距离 r 处，并随卫星位置动态更新。其中，弹性距离 r 的取值取决于小区内终端位置，以随机接入过程中小区内全部终端的残留 TA 均非负作为约束。

图 6 展示了地心地固坐标系 (Earth-Centered, Earth-Fixed, ECEF) 下的基于动态参考点的时间同步技术几何示意。设基站的位置为 $\mathbf{g} = [x, y, z]^T$ ，小区中心位置为 $\mathbf{p}_0 = [x_0, y_0, z_0]^T$ ，第 i 个时隙卫星位置与速度分别为 $\mathbf{s}_i = [x_i, y_i, z_i]^T$ ， $\mathbf{v}_i = [v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}]^T$ ，其中 $i = 1, \dots, T$ 表示卫星过境期间的第 i 个时隙索引，卫星速度可由轨道高度与开普勒定律确定。

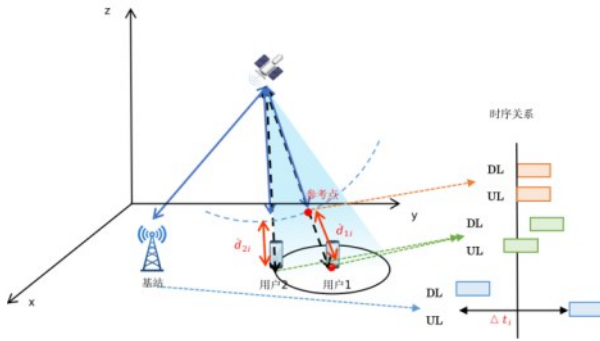


图6 基于动态参考点的时间同步技术示意图

由于光速远高于卫星运动速度，忽略信号传播过程中的卫星移动，则第 i 个时隙，基站经馈电链路至卫星、再经服务链路下行至参考点的总传播时延，即基站侧的下行预补偿时偏为：

$$d_{0i} = \frac{|\mathbf{g} - \mathbf{s}_i| + |\mathbf{p}_0 - \mathbf{s}_i| - r}{c} \quad (6)$$

式中， c 为光速， $|\mathbf{g} - \mathbf{s}_i|$ 、 $|\mathbf{p}_0 - \mathbf{s}_i|$ 分别表示基站与卫星、卫星与小区中心之间的距离， r 表示为规避负 TA 引入的弹性参数。设小区中心用户位置为 $\mathbf{p}_1 = [x_1, y_1, z_1]^T$ ，边缘用户位置为 $\mathbf{p}_2 = [x_2, y_2, z_2]^T$ 。在第 i 个时隙，小区中心用户与边缘用户的端到端全链路时延分别为：

$$d_{1i} = \frac{|\mathbf{g} - \mathbf{s}_i| + |\mathbf{p}_1 - \mathbf{s}_i|}{c} \quad (7)$$

$$d_{2i} = \frac{|\mathbf{g} - \mathbf{s}_i| + |\mathbf{p}_2 - \mathbf{s}_i|}{c} \quad (8)$$

经基站侧下行时偏预补偿量 d_{0i} 校正后，若忽略基站侧时偏预补偿残差，小区中心用户与边缘用户的下行残留时偏分别为：

$$\dot{d}_{1i} = d_{1i} - d_{0i} \geq 0 \quad (9)$$

$$\dot{d}_{2i} = d_{2i} - d_{0i} \geq 0 \quad (10)$$

上述残留时偏的补偿则可通过 RAR 消息携带的 TAC 由终端自行完成。因此，通过本方案进行 TA 预补偿，当单小区覆盖半径取 8 km 时，在特定的终端仰角范围内，TAC 取值约束与 PRACH 序列覆盖限制可被同时满足以实现小区内所有终端的随机接入。

具体来说，基站于时刻 i 发送下行帧，经过星地链路传播时延 d_{0i} 后到达参考点，则到达时刻为 $i_1 = i + d_{0i}$ 。为保证该时刻参考点处的上下行帧头对齐，终端侧的上行帧头需在 i_1 时刻到达参考点，并经过星地链路时延 d_{0i_1} 到达基站侧，即：

$$d_{0i_1} = \frac{|\mathbf{g} - \mathbf{s}_{i_1}| + |\mathbf{p}_0 - \mathbf{s}_{i_1}| - r}{c} \quad (11)$$

其中， $\mathbf{s}_{i_1}$ 表示卫星在 i_1 时刻的位置。基于此，基站侧需通过调整上下行帧头的相对定时关系来实现时间同步，使得上行帧头相对于下行帧头延迟 Δt_i ，该延迟量由式 (12) 给出：

$$\Delta t_i = d_{0i} + d_{0i_1} \approx 2d_{0i} \quad (12)$$

式中，信号传播期间卫星移动距离相比于星地链路长距离基本可忽略不计，因此 i_1 时刻的星地链路时延 d_{0i_1} 与 i 时刻的星地链路时延 d_{0i} 近似相等，即 $d_{0i_1} \approx d_{0i}$ 。则小区中心用户及边缘用户在基站侧的上行残留时偏也可分别近似为 $\Delta d_{1i} \approx 2\dot{d}_{1i}$ 、 $\Delta d_{2i} \approx 2\dot{d}_{2i}$ 。由于卫星高速运动，星地传播时延动态变化，基站侧需要周期性进行时偏补偿值计算并进行时序调整，以保证参考点处上下行帧头始终对齐。

3.2 频率同步技术

针对存量手机直连卫星场景中卫星高速运动引入的动态多普勒频偏, 本文提出一种基于静态参考点的频率同步技术方案。该方案通过选取波束覆盖中心点作为频偏补偿的静态参考点, 对小区内终端实施统一的由基站至参考点链路的频偏预补偿, 将小区内各终端的残留频偏控制在终端及基站处理能力内, 以完成该场景下的频率同步。

设第 i 个时隙卫星的速度矢量为 $\mathbf{v}_i = [v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}]^T$, 地面用户的速度矢量为 $\mathbf{u}_i = [u_{xi}, u_{yi}, u_{zi}]^T$, 则两者的相对位置矢量 $\Delta \mathbf{p}_i$ 及相对速度矢量 $\Delta \mathbf{v}_i$ 可分别由式 (13)、式 (14) 计算:

$$\Delta \mathbf{p}_i = \mathbf{s}_i - \mathbf{p}_i \quad (13)$$

$$\Delta \mathbf{v}_i = \mathbf{v}_i - \mathbf{u}_i \quad (14)$$

则基于多普勒效应, 第 i 个时隙卫星与用户间服务链路的多普勒频偏为:

$$\Delta f_{s,i} = f_s \cdot \frac{\Delta \mathbf{p}_i \cdot \Delta \mathbf{v}_i}{|\Delta \mathbf{p}_i| \cdot c} \quad (15)$$

其中, f_s 为服务链路载波频率, 上/下行对应不同的载波频率频点。

地面基站基本固定, 其速度 $\bar{\mathbf{u}}_i$ 为零, 则第 i 个时隙卫星与基站间馈电链路的多普勒频偏为:

$$\Delta f_{f,i} = f_f \cdot \frac{(\mathbf{s}_i - \mathbf{g}) \cdot (\mathbf{v}_i - \bar{\mathbf{u}}_i)}{|\mathbf{s}_i - \mathbf{g}| \cdot c} = f_f \cdot \frac{(\mathbf{s}_i - \mathbf{g}) \cdot \mathbf{v}_i}{|\mathbf{s}_i - \mathbf{g}| \cdot c} \quad (16)$$

其中, $\mathbf{s}_i - \mathbf{g}$ 、 $\mathbf{v}_i - \bar{\mathbf{u}}_i$ 分别表示卫星与地面基站的相对位置矢量与相对速度矢量, f_f 为馈电链路载波频率, 上/下行对应不同的载波频率频点。

静态参考点固定为小区中心, 则第 i 个时隙卫星与参考点间服务链路的多普勒频偏为:

$$\Delta f_{s0,i} = f_s \cdot \frac{(\mathbf{s}_i - \mathbf{p}_0) \cdot \mathbf{v}_i}{|\mathbf{s}_i - \mathbf{p}_0| \cdot c} \quad (17)$$

其中, $\mathbf{s}_i - \mathbf{p}_0$ 、 $\mathbf{v}_i$ 分别表示卫星与静态参考点的相对位置矢量与相对速度矢量, f_s 为服务链路载波频率, 上/下行对应不同的载波频率频点。

本方案通过基站对上述馈电链路频偏 $\Delta f_{f,i}$ 与服务链路频偏 $\Delta f_{s0,i}$ 实施预补偿, 则基站的频偏预补偿量 $\Delta f_{b,i}$ 为:

$$\Delta f_{b,i} = \Delta f_{f,i} + \Delta f_{s0,i} \quad (18)$$

由于基站侧以静态参考点进行小区统一补偿, 而不同位置的用户相对于卫星的径向速度存在差异, 因此统一补偿后小区内各用户仍会存在不同程度的残留频偏, 如图7所示。

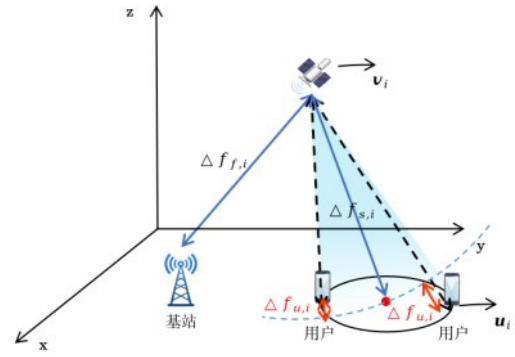


图7 基于静态参考点的频率同步技术示意图

对于第 i 个时隙, 小区用户至卫星的服务链路实际频偏为 $\Delta f_{s,i}$, 而基站侧仅补偿了公共参考点对应的服务链路频偏 $\Delta f_{b,i}$ 。因此, 若忽略基站侧频偏预补偿的固有残差, 则终端侧下行未补偿链路频偏 $\Delta f_{u,i}$ 为:

$$\Delta f_{u,i} = \Delta f_{s,i} - \Delta f_{b,i} \quad (19)$$

考虑信号的往返传输, 基站侧的上行未补偿链路频偏 Δf_{0i} 则近似为终端侧下行未补偿链路频偏 $\Delta f_{u,i}$ 的2倍:

$$\Delta f_{0i} \approx 2\Delta f_{u,i} \quad (20)$$

已知初始接入过程中, 基站侧对 PRACH 上行残留频偏具有有限的处理能力。以 SCS 为 1.25 kHz 的 PRACH 前导码格式 ($\Delta f^{RA} = 1.25 \text{ kHz}$) 为例, 基站可处理的频偏范围约为 $\pm 2.5 \text{ kHz}$ 。同时, 3GPP 协议规定存量终端侧在小区初搜阶段可自主处理的残留频偏容限为 5 ppm。因此, 在设计存量手机直连卫星的小区覆盖半径时, 需同时满



足上述两项约束，即 $|\Delta f_{0i}| \leq 2.5\text{kHz}$ ， $|\Delta f_{u,i}| \leq 5\text{ppm}$ 。

3.3 随机接入增强技术

为了解决存量手机直连卫星场景下的随机接入响应超窗问题，本文提出一种随机接入增强技术。根据3GPP协议规定，RAR接收窗口由窗长、周期与偏移量参数共同定义。如前文所述，该窗长的最大配置值仅为10ms，因此，本方案基于现有协议通过合理配置RAR接收窗口偏移量参数改变窗口位置，使各终端在随机接入过程中的Msg2均落入各自对应的RAR接收窗口内，具体计算方式详见后文。

如图8所示，设PRACH周期为 t ，且每个周期内仅配置1个RO，其绝对时域位置为 T_{RO} 。终端发送Msg1后，需在绝对偏移量 T_{offset} 处的RAR接收窗口内监听基站下发的Msg2。

在透明转发模式下，卫星过境期间，小区覆盖范围内各终端经卫星至基站的全链路单向传播时延的最小值与最大值分别为 $T_{su} = d_{min}/c$ 、 $T'_{su} = d_{max}/c$ ，其中 d_{min} 与 d_{max} 分别为终端-卫星-基站全链路距离的最大值与最小值。则不同终端对应接收的Msg2绝对时域位置分别为：

$$T_{offset1} = T_{RO} + 2T_{su} + T_1 \quad (21)$$

$$T_{offset2} = T_{RO} + 2T'_{su} + T_1 \quad (22)$$

式中， T_1 为基站处理Msg1并发送Msg2所需的处理/调度时延。

为保证所有终端的Msg2均落入其RAR接收窗内，RAR窗口起始偏移量 T_{offset} 需同时满足最小时延终端与最大时延终端的接收条件。协议规

定RAR窗口长度最大为 $T=10\text{ms}$ ，则 T_{offset} 需满足：

$$\begin{cases} T_{offset} \leq T_{offset1} \leq T_{offset} + T \\ T_{offset} \leq T_{offset2} \leq T_{offset} + T \end{cases} \quad (23)$$

因此，综合RO所在时隙位置、Msg1与Msg2的时序关系及星地传输时延，通过合理配置RAR接收窗口偏移量 T_{offset} ，可使最短与最长星地时延条件下的终端均在RAR窗口内接收到Msg2，从而有效解决存量手机直连卫星场景中的随机接入超窗问题。

4 实验结果与分析

为验证前文所提存量手机直连卫星关键技术的可行性与有效性，本文依托存量基站样机搭建星地通信实验室测试环境，开展时频同步技术及随机接入增强技术的性能验证，并结合仿真与实测数据进行分析。仿真与实测结果表明，本文所提技术方案能够在存量终端零改造下突破星地通信瓶颈，实现存量手机直连卫星通信。

4.1 实验室测试环境和仿真参数

4.1.1 实验室测试环境

为开展技术验证，利用信道仿真仪模拟卫星通信系统中高动态、大时延、强衰减的信道环境，在实验室搭建了基站和终端之间的星地透明传输链路。设备连接方式如图9所示：存量终端经由信道仿真仪模拟的服务链路和馈电链路与存量基站样机相连，基站再接入核心网。实验室整体测试环境如图10所示。

4.1.2 仿真及测试场景描述与参数设置

此外，为与实测数据开展对比分析，本文基

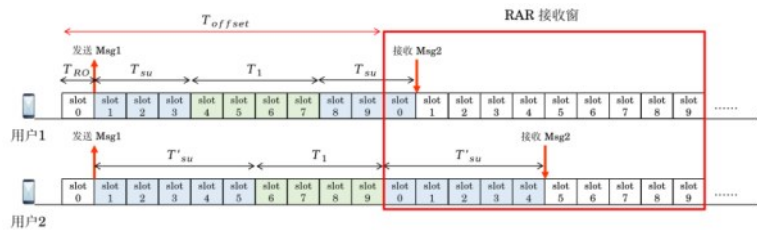


图8 参数配置方案示意图



图9 设备连接图



图10 实验室测试环境图

于MATLAB搭建仿真平台，结合实验室硬件测试环境，共同验证文中提出的时频同步、随机接入增强技术方案的性能。仿真及实测中，低轨卫星采用透明转发模式，轨道高度为400km，小区覆盖半径为8km；小区内配置2个5G存量手机用户，分别放置于小区中心与小区边缘位置。具体仿真场景如图11所示，其余仿真及实测参数配置详见表4。

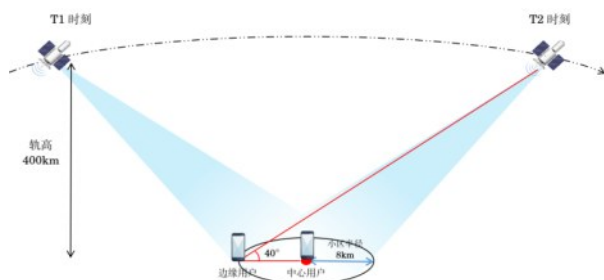


图11 场景示意图

4.2 实测结果分析

4.2.1 业务速率验证

本节通过实测验证所提时频同步及随机接入增强技术方案的有效性，结果表明以上方案可实现5G存量手机接入卫星网络并进行正常通信业务。图12展示了星下点定点测试条件下（终端仰角固定为90°），下行单用户峰值速率曲线。测试

表4 仿真参数

仿真参数	参数配置
系统带宽	5MHz
载频	<2GHz
卫星轨道高度	400km
卫星运动速度	7.66km/s
终端最小仰角	40°
单小区覆盖半径	8km
终端数	2
终端速度	0

期间多次采样取均值，得到下行单用户峰值速率可达7.56Mbps。



图12 单用户峰值速率

图13展示了卫星过境期间，小区中心用户的上下行速率随时间的变化曲线。可见用户上下行速率随卫星靠近先逐渐上升，后随卫星远离而下降。其中，上行峰值速率可达520kbps，下行峰值速率可达7.6Mbps。

4.2.2 时间同步性能分析

本节通过仿真与实测验证所提基于动态参考点的时间同步方案的性能。首先通过仿真将本文提出的基于动态参考点的时间同步算法与两种基准算法进行对比。基准算法1为静态固定定时补偿方案，由基站侧以某一固定补偿值对全小区终端进行统一的定时补偿，该补偿值不随卫星实时

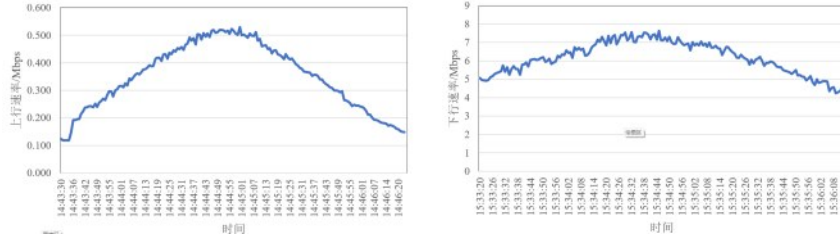


图13 中心用户上下行速率

位置与终端位置分布动态调整,是最简化的基础同步方案;基准算法2为基于波束中心点的动态定时补偿方案,以波束中心与地球表面交点作为固定参考点,由基站侧根据实时星历计算参考点到卫星、卫星到基站的时延,并随卫星运动进行动态定时补偿,该方案由文献[14]提出。

图14、图15给出三种算法下小区边缘用户下行残留时偏及其变化率随时间的变化曲线。由于图14(a)、图15(a)中所提算法与基准算法2的残留时偏及其变化率的波动范围较小,因此分别在图14(b)、图15(b)中单独展示其细节变化,以呈现其变化趋势。仿真结果表明,基准算法1的下行残留时偏随卫星入境至出境呈先下降后上升趋势,在最低仰角 40° 时终端侧下行残留时偏 $\dot{d}_{2i}$ 最大值约为2.6ms,已超出协议规定的初始接入TAC调整范围(2ms);且其变化率最高可达73.7ns/ms,连接态会频繁触发TAC调整,导致低仰角区域接入与业务保持困难,可接入窗口显著缩短,且通信业务易中断。基准算法2的下行残留时偏随卫星过境整体呈上升趋势,且残留时偏

值普遍低于基准算法1。但该算法会产生负向残留时偏,由于现有协议不支持RAR消息中下发负TA值进行调整,因此该方案在实际系统中无法支持部分终端的随机接入。本文所提算法可保证小区覆盖范围内所有终端的下行残留时偏 $\dot{d}_{1i}$ 、 $\dot{d}_{2i}$ 始终为正值,且波动范围控制在0.1ms以内满足终端低仰角接入要求,同时残留时偏变化率最高仅为1ns/ms,连接态无需频繁触发TAC调整,具有更好的鲁棒性。

图16展示了信道仿真仪所加星历时偏与基站侧预补偿时偏的变化曲线。将理论时偏值与实测数据进行对比发现,基站预补偿时偏随卫星入境至出境先减小后增大,星下点最小预补偿时偏值 d_{0i} 为5.5ms,理论与实测数据变化趋势及数值基本吻合。

图17、图18分别给出了初始接入过程中小区中心用户、小区边缘用户的Msg1残留时偏变化曲线的仿真及实测结果,用以验证基站在初始接入过程中的时偏预补偿及纠偏能力。当 $r=8\text{km}$ 时,小区中心用户的Msg1残留时偏理论值始终

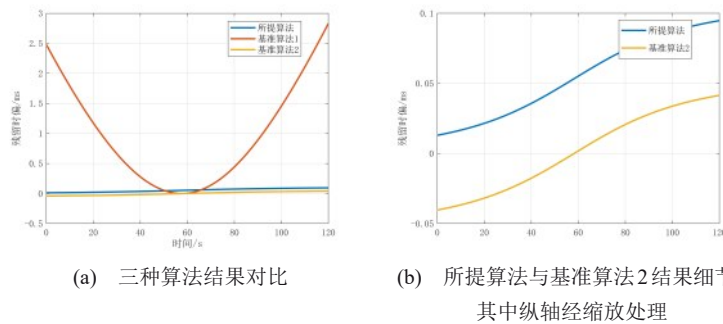


图14 不同算法下小区边缘用户残留时偏

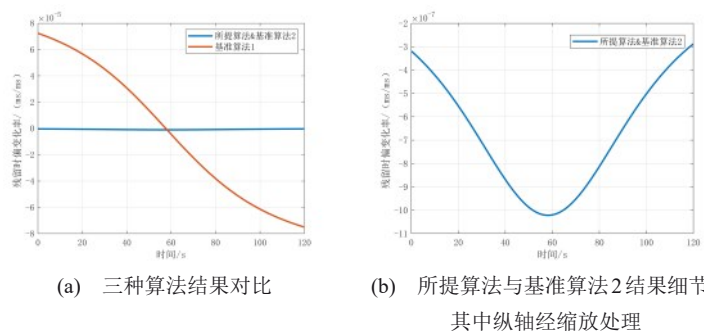


图15 不同算法下小区边缘用户残留时偏变化率

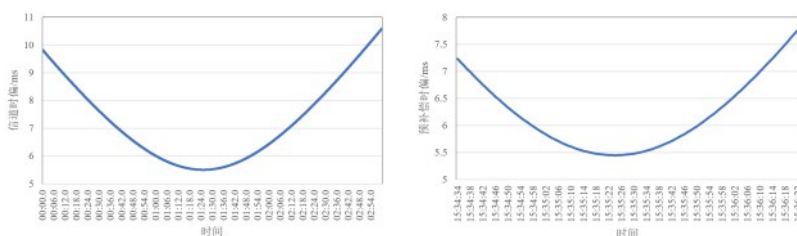


图16 信道时偏与基站预补偿时偏对比

为 $\Delta d_{1i} = 2r/c \approx 53333\text{ns}$ ，实测结果基本稳定在 53560ns 附近，符合预期；小区边缘用户的 Msg1 残留时偏则随时间呈上升趋势，且最大值不超过 0.1ms ，实测结果与仿真理论分析基本一致，满足存量手机初始接入的时偏容限要求。

图19给出了卫星过境期间连接态下小区中心

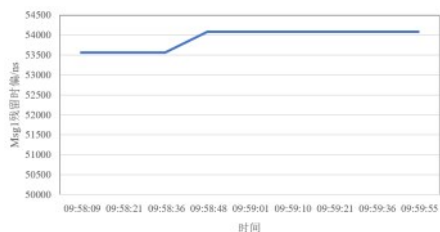


图17 小区中心用户Msg1残留时偏

用户及边缘用户的下行残留时偏随时间的变化趋势。在连接态下，小区中心用户与边缘用户的残留时偏 Δd_{1i} 、 Δd_{2i} 均保持在 $\pm 1/2 \text{ CP}$ （约 2600 ns ）范围内，满足存量终端的解调门限要求。

4.2.3 频率同步性能分析

本节通过仿真与实测试验证所提频率同步方案的性能。图20给出信道仿真仪所加频偏与基站侧预补偿频偏的变化曲线。将理论频偏值与实测数据进行对比，基站侧预补偿频偏随卫星入境至出境始终呈下降趋势，理论与实测数据变化趋势及数值基本吻合。

图21展示了卫星过境期间小区中心用户上行

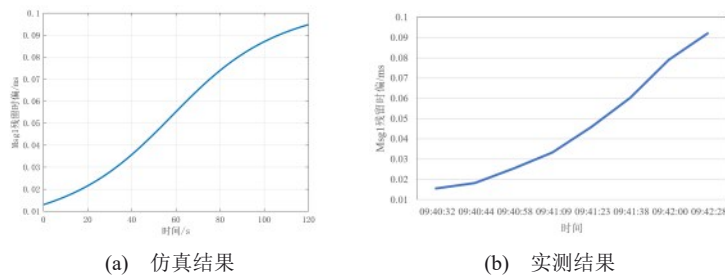


图18 小区边缘用户Msg1残留时偏的仿真与实测对比

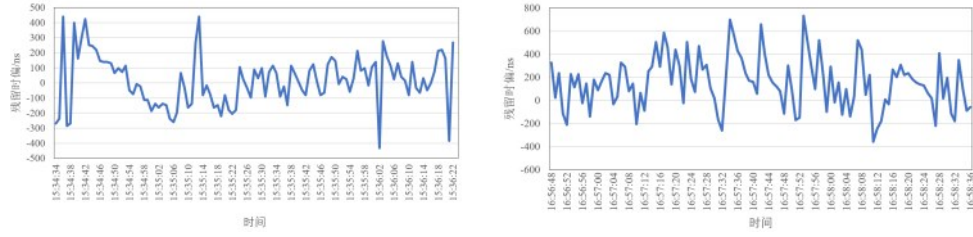


图19 小区中心及边缘用户连接态残留时偏

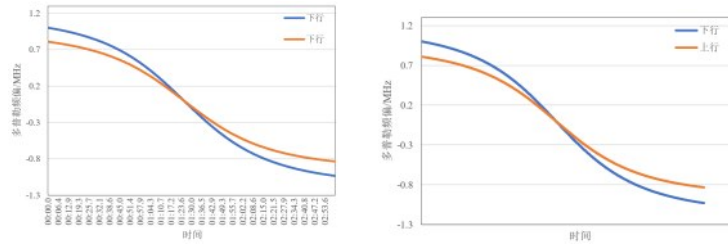


图20 信道频偏与基站预补偿频偏对比

残留频偏随时间的变化趋势。由于所提方案将频偏补偿参考点设为小区中心，该位置处用户的基站侧预补偿值等于实际频偏，残留频偏理论值应为零。实测结果显示，小区中心用户最大残留频偏 Δf_{0i} 约为250 Hz，其主要源于晶振频率误差引入的随机频偏，且该量级已满足存量手机初始接入及连接态期间的频偏容限要求。

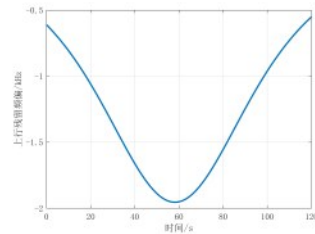


图21 小区中心用户上行残留频偏

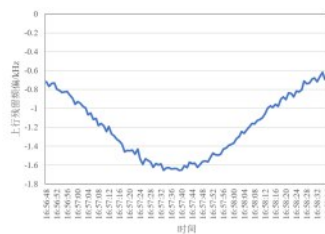
图22给出卫星过境期间小区边缘用户上行残留频偏随时间变化趋势的仿真分析与实测结果。实测结果表明，小区边缘用户的上行残留频偏随星历变化呈先下降后上升的趋势，其变化趋势及数值与仿真结果基本一致，最小残留频偏 Δf_{0i} 约为-1657Hz。鉴于基站侧PRACH/PUSCH/PUCCH频偏处理能力为 ± 2.5 kHz，实测上行残留频偏 Δf_{0i} 最小值在该范围以内，能够满足存量手机初始接入及连接态业务需求。

5 6G场景应用

现有5G NR NTN系统主要依赖GNSS实现高精度时频同步，终端可通过GNSS定位信息与卫



(a) 仿真结果



(b) 实测结果

图22 小区边缘用户上行残留频偏的仿真与实测对比

星星历自主完成时频偏的实时补偿。然而, GNSS 定位存在功耗较高的问题, 且在遮挡、干扰等复杂场景下易导致定位数据缺失或精度下降, 进而引发时频同步失败, 影响通信可靠性。因此, 面向 6G NTN, 需在 GNSS-Free 场景下突破时频同步关键技术, 实现无 GNSS 辅助的精准时频同步。

存量手机直连卫星与 6G NTN 的 GNSS-Free 场景所面临的时频同步挑战具有本质共性。在存量场景中, 终端受限于硬件能力与地面协议, 无法自主进行时频偏计算与补偿; 在 6G GNSS-Free 场景中, 终端因无法获取 GNSS 信号而缺失定位与授时信息, 同样无法独立完成时频偏补偿。两者的共同约束在于: 终端侧均无法进行自主的时频偏补偿, 需由网络侧完成补偿过程或依赖网络侧提供辅助信息。

本文所提出的时频同步方案既可由网络侧实现, 也可由终端侧实现, 天然适用于 6G GNSS-Free 场景。在存量手机直连卫星场景中, 由网络侧完成小区内基站至时域/频域参考点的时频偏统一补偿; 面向 6G GNSS-Free 场景, 鉴于终端具备一定的时频偏补偿能力, 因此可由网络侧向终端下发时域/频域参考点相关的辅助信息, 终端可根据接收到的辅助信息自主完成基站至参考点链路的时频偏补偿, 从而摆脱对 GNSS 的依赖。因此, 本文所提时频同步方案为未来 6G NTN 中 GNSS-Free 场景下的手机直连卫星通信提供了可行的关键技术路径。

6 结束语

本文针对存量手机直连卫星场景及未来 6G GNSS-Free 场景开展关键技术研究。面向存量手机直连卫星面临的时频同步失效、随机接入超窗等关键挑战, 本文提出基于动态参考点的时间同步技术、基于静态参考点的频率同步技术及随机接入响应窗口增强技术方案。一方面, 所提技术

通过选取动态时域参考点和静态频域参考点, 并基于以上参考点对小区内各终端进行统一的时频偏补偿, 将残留时频偏控制在终端及基站的处理能力范围内, 实现时频同步; 另一方面, 所提技术通过计算并合理配置 RAR 接收窗口的偏移量, 可使网络侧为不同终端下发的 Msg2 落在各终端的 RAR 接收窗口内, 解决随机接入超窗问题。仿真与实验室测试结果表明, 所提技术可有效支撑 400km 轨高的低轨卫星下 8 km 小区覆盖半径范围内 5G 存量手机的初始接入与正常业务。此外, 本文提出的时频同步技术可平滑演进至 6G NTN 中的 GNSS-Free 场景, 为无定位授时条件下的手机直连卫星通信提供关键技术支撑。

未来, 面向本文所提出的关键技术, 可开展在轨测试, 进一步检验其在真实卫星通信环境下的适用性与鲁棒性, 推动技术从实验室验证走向外场落地。同时, 针对 6G NTN 的 GNSS-Free 应用场景, 将持续深化技术攻关, 进一步研究高精度的时频同步增强机制, 为 6G 空天地一体化网络的实现提供核心技术支撑。



程锦霞 (1981-8), 女, 博士, 中国移动通信有限公司研究院高级工程师, CCSA TC13 WG1 副组长、IMT-2020 5G 应用工作组组长, 主要研究方向为天地一体化、面向垂直行业的 5G 专网及 5G 工业互联网。



赵阳 (1999-8), 女, 硕士, 中国移动通信有限公司研究院研究员, 主要研究方向为 5G-Advanced/6G 天地一体化技术。



于天意 (1993-6), 女, 硕士, 中国移动通信有限公司研究院研究员, 主要研究方向为 5G-Advanced/6G 天地一体化技术。



赵琳 (1986-11), 女, 硕士, 中国移动通信有限公司研究院高级工程师, 主要研究方向为 5G-Advanced/6G 天地一体化技术。



邓伟 (1978-7), 男, 硕士, 中国移动通信有限公司研究院星地融合技术研究所所长、正高级工程师, CCSA TC12 副主席, 主要研究方向为 4G、5G 行业网技术及应用、5G-Advanced/6G 天地一体化技术等。



参考文献:

- [1] 赵亚军;郁光辉;徐汉青. 6G 移动通信网络:愿景、挑战与关键技术[J]. 中国科学:信息科学, 2019, 49(08): 963-987.
- [2] Wang W, T Chen, Ding R, et al. Location-Based Timing Advance Estimation for 5G Integrated LEO Satellite Communications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(6): 6002-6017.
- [3] 李宝航. 基于 5G 存量终端直连卫星的时频同步技术研究[D]. 西安电子科技大学, 2024.
- [4] 方红雨. 基于 5G 的低轨卫星随机接入方案的研究与设计[D]. 北京: 北京邮电大学, 2021.
- [5] Zhen L, Qin H, Song B, et al. Random access preamble design and detection for mobile satellite communication systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(2): 280-291.
- [6] Chen H M, Wang P, Li S, et al. A novel preamble design for 5G enabled LEO non-terrestrial networks[C]//GLOBECOM 2022-2022 IEEE Global Communications Conference. IEEE, 2022: 680-686.
- [7] Liu W, Hou X, Wang J, et al. Uplink time synchronization method and procedure in Release-17 NR NTN[C]//2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference: (VTC2022-Spring). IEEE, 2022: 1-5.
- [8] 王爱华;王星原;陈丽婷. 低轨卫星多普勒频移特性几何估计算法[J]. 北京理工大学学报, 2016, 36(12): 1294-1297.
- [9] Liu Y, Su Y, Zhou Y, et al. Frequency offset estimation for high dynamic LEO satellite communication systems[C]//2019 11th

- International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). IEEE, 2019: 1-6.
- [10] Tian D, Zhao Y, Tong J, et al. Frequency offset estimation for 5G based LEO satellite communication systems[C]//2019 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). IEEE, 2019: 647-652.
- [11] 邹恒光,惠腾飞,翟盛华,等. 卫星通信技术发展综述[J]. 空间电子技术, 2025, 22 (S1): 1-19.
- [12] 王贵峰,徐嘉,张亮,等. 手机直连卫星关键技术分析与发展展望[J]. 通信管理与技术, 2026, (01): 43-46.
- [13] 孙耀华;许宏涛;彭木根. 手机直连低轨卫星通信:架构、关键技术和未来展望[J]. 移动通信,2024,48(01):103-110.
- [14] 孙晓南;周世东;侯利明;康绍莉. 存量 5G 手机直连低轨卫星通信技术研究[J]. 信息通信技术,2023,17(05):22-31.
- [15] 黄秋钦;王鹏;吴星. 面向存量终端的手机直连卫星技术现状及发展分析[J]. 无线电通信技术,2024,50(06):1087-1092.
- [16] Wang P, Zhang Q, Ma Y, et al. Status and Development Analysis of Satellite-Direct-to-Phone Technology for Existing Handsets[C]//2025 4th International Conference on Electronics, Integrated Circuits and Communication Technology (EICCT).
- [17] 何宗苗,王瀚霆,杨欣源,等. 手机直连低轨通信卫星:信道模型与链路技术分析[J]. 移动通信, 2025, 49 (11): 136-144.
- [18] 宋艳军;孙晨华;谢文轩;徐军;张志丽;张静. 面向低轨卫星的 NTN 随机接入技术[J]. 天地一体化信息网络,2024,5(04): 17-24.
- [19] 金正一. 人工智能驱动的手机直连低轨卫星通信[J]. 数字通信世界,2025,(7):59-61.
- [20] 丁建瑞,张博嘉,范皓年,等. 手机直连卫星:Starlink 面向存量手机的通信能力分析[J]. 移动通信, 2024, 48 (09): 153-159.
- [21] 陈山枝,王策. 手机直连卫星系统及其星载相控阵天线分析与建议[J]. 电信科学, 2026, 42 (01): 1-10.
- [22] 孙晓南,周世东,康绍莉. 手机直连卫星的覆盖增强关键技术[J]. 空间电子技术, 2024, 21 (06): 82-91.
- [23] Yoon T H, Zheng C, Tilahun F D, et al. A Technical Survey on Uplink Capacity Enhancement in Direct-to-Cell (D2C) Systems: Toward Cooperative LEO Satellite Architectures[C]//2025 International Conference on Mobile, Military, Maritime IT Convergence (ICMIC).
- [24] 李思栋,李侠宇,孙建成,等. 手机直连卫星应用发展与挑战[J]. 电信科学,2024,40(4):43-55.
- [25] 李静玲,王显煜,甄立,等. 面向手机直连的低轨卫星网络通信技术[J]. 中国空间科学技术(中英文), 2026, 46 (01): 1-12.
- [26] 康绍莉. 手机直连卫星关键技术及展望[J]. 环球财经, 2026, (04): 29-37.
- [27] 刘硕;钱梦媛;万军;丁文慧. 手机直连低轨卫星链路预算分析[J]. 信息通信技术,2024,18(05):7-11+25.
- [28] Euler S, Fu X, Hellsten S, et al. Using 3GPP technology for satellite communication[J]. Ericsson Technology Review, 2023, 2023(6): 2-12.