



研究与开发

移动通信同步关键问题研究：技术、标准与测试

缪新育^{1,2}, 胡昌军², 程华²

(1. 北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876;
2. 中国信息通信研究院技术与标准研究所, 北京 100191)

摘要: 针对现有移动通信网中的同步问题, 从技术、标准、测试 3 个角度开展研究, 包括无线侧同步原理研究、同步异常对无线业务的影响分析, 有线侧和无线侧的同步标准比对及差异分析等。针对以上问题, 提出了相应的解决方案, 包括无线侧同步性能测试、监测方法及同步标准修订等, 保障移动通信同步系统的正常运行。

关键词: 移动通信; 同步异常; 同步技术; 标准; 无线同步测试

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2023035

Research on key synchronization problems of mobile communication: technology, standards and testing

MIAO Xinyu^{1,2}, HU Changjun², CHENG Hua²

1. School of Information and Communication Engineering, Beijing
University of Posts and Telecommunication, Beijing 100876, China
2. Institute of Technology and Standards, China Academy of Information and
Communications Technology, Beijing 100191, China

Abstract: The synchronization problem in the existing mobile communication network was studied from three perspectives: technology, standard and testing. It includes the research on the synchronization principle of wireless side, the analysis of the impact of synchronization anomaly on wireless service, and the comparison and difference analysis of synchronization standards between wired side and wireless side, etc. Aiming at the above problems, the corresponding solutions were proposed, including wireless side synchronization performance testing, monitoring methods and synchronization standard revision, etc., to ensure the normal operation of mobile communication synchronization system.

Key words: mobile communication, synchronization anomaly, synchronization technology, standard, wireless synchronization testing

收稿日期: 2022-11-01; 修回日期: 2023-02-14

基金项目: 北京邮电大学优秀博士生创新基金资助项目 (No.CX2019104)

Foundation Item: Beijing University of Posts and Telecommunication Excellent Ph.D. Students Foundation (No.CX2019104)

0 引言

移动通信的发展,需要同步技术的支持。随着移动业务的不断发展,无线接入系统对同步性能提出了越来越高的要求,如5G协同业务提出了100 ns量级的时间同步需求,频率同步精度要求优于 ± 50 ppb/ms (ppb为十亿分之一)^[1],基于基站的定位业务提出了10 ns (3~4 m)量级的时间同步需求。随着移动通信网络规模越来越大,在网络运维等方面时常出现同步异常的问题,例如,传输定时倒换和网元指针调整导致无线侧同步异常,引起不同程度的小区干扰掉线及相关业务中断^[2-3],只有保证较高的同步性能,才能保证移动通信的正常运行。虽然类似问题通常体现在无线接入网络异常的情况下,但是其问题原因却涉及无线传输、承载网络、同步支撑等专业,属于跨专业、跨系统的深层次技术问题。因此,有必要针对该问题开展深层次研究,做到无线同步和承载同步之间的端到端打通。

1 移动通信同步技术

1.1 移动同步组网架构及同步需求

目前5G同步包含频率同步和时间同步,在频率同步方面,移动基站可通过传统频率同步网或在基站加装卫星授时接收机的方式实现同步。频率同步网采用等级结构,各节点之间是主从同步关系,时钟从基准主时钟设备逐级向下传递到基

站设备^[4]。在时间同步方面,基站可以通过基于IEEE 1588 精确网络时间协议 (precise time protocol, PTP)^[5]的传送网络或直接在基站加装卫星接收机的方式实现同步,在基站侧形成PTP网络授时和卫星授时互为备份,5G时间同步通用组网模型如图1所示^[1]。作为有线侧源头设备的基准主时间设备可采用卫星授时关键技术^[6-7],溯源到全球导航卫星系统 (global navigation satellite system, GNSS)。在卫星不可用的情况下,可通过地面获取高精度时间同步信号 (如通过光纤时频传递技术溯源至国家守时单位),从而确保5G时间同步网自主可控。

目前5G的频率同步要求与4G相同,均为 ± 50 ppb/ms,时间同步性能有较大提高。5G时间同步需求包含3种场景,分别为基本业务、协同增强及部分新业务^[1]。5G基本业务时间同步需求是所有时分双工 (time-division duplex, TDD) 制式无线通信系统的共性要求,其对基站空口时间偏差进行严格限定,主要是为了避免上下行时隙干扰,要求基站时间相对协调世界时 (coordinate universal time, UTC) 偏差不超过 ± 1.5 μ s。站间协同增强是指到同一个用户的数据可以通过不同基站的有源天线单元收发,使用户可以在交叠覆盖区合并多个信号,从而有效提升业务带宽。多信号间的时延差需要满足一定要求,否则无法合并,协同增强业务时间同步要求为100 ns量级。5G网络支撑的多种新业务可能具备高精度同步需求,

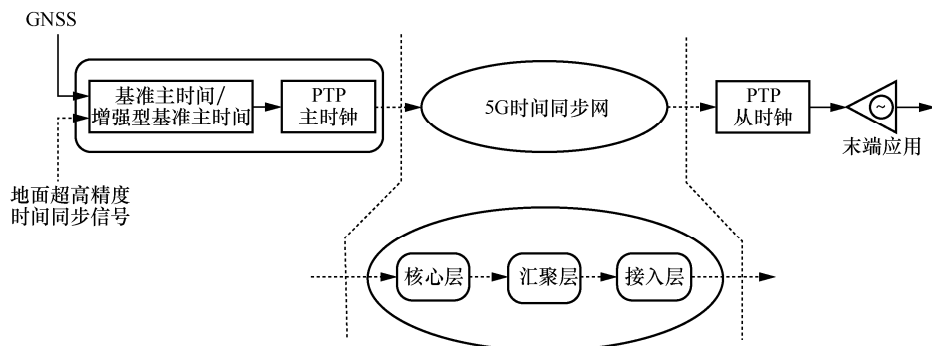


图1 5G时间同步通用组网模型



如高精度定位业务、高速移动业务覆盖（对抗多普勒频移所设置的子载波间隔）等，提出了 10 ns 量级甚至更高精度的要求。

1.2 移动通信同步关键技术

1.2.1 TDD 时间同步方式

对于采用 TDD 制式的无线通信系统，为避免上下行时隙干扰，需要在帧结构中设置一定的保护间隔（guard period, GP）。通常来说，相邻基站同步误差 T_{sync} 与 GP 相关，即 GP 越短， T_{sync} 要求越严格。由于 5G 配置更大的子载波间隔，所以对相邻基站同步误差 T_{sync} 提出了更高要求。同时为了克服协同业务及多径信号间的符号间干扰（intersymbol interference, ISI），引入了循环前缀（cyclic prefix, CP）^[8]。CP 的长度与覆盖半径有关，一般情况下配置普通 CP 即可满足要求，广覆盖等小区半径较大的场景下可配置扩展 CP，但是 CP 长度配置越大，系统开销也越大。

1.2.2 正交频分复用技术

正交频分复用（orthogonal frequency division multiplexing, OFDM）是 4G 和 5G 的关键技术，该技术自身的特点使其对同步有特殊的需求^[8]。在 OFDM 系统中，只有发送和接收的子载波完全一样，才能保证载波间的正交性，从而可以正确接收信号，任何频率偏移必然导致子载波间干扰（inter carrier interference, ICI）。因此，OFDM 系统对载波偏移敏感，必须采取措施消除频率偏移。与频率误差不同，时间同步误差不会引起 ICI，但时间同步误差将导致快速傅里叶变换（fast Fourier transform, FFT）处理窗包含连续的两个 OFDM 符号，从而引入 OFDM 符号间干扰，从而造成信噪比损失，误比特率性能下降。

1.2.3 无源天线到有源天线

4G 基站使用无源天线，具有收发机阵列边界接口，射频拉远单元实现了天线与收发信单元阵列的分离，可以使用滤波器消除其他网络的过渡带和杂散信号对自己站点的影响。在 5G 时代，有

源天线成为主流，天线与收发信单元阵列集成在一起^[9-10]，如果放置滤波器，将导致天线尺寸和成本大幅上升。因此，如果时间不同步，将无法通过滤波器消除相邻网络的信号，多个天线和多个接收端口将产生互调或接收相邻端口的信号。此时接收机的工作点会从线性区转移到非线性区，基站会收到邻近基站的下行链路信号和本基站的上行链路信号，还可收到互调产物。在极端情况下，在解码上行信号时，只能收到邻近网络的下行信号。

1.2.4 手机与基站间同步方式

基站同步信号用于小区搜索过程中用户终端和移动通信网络的时频同步，5G 基站同步信号主要指同步信号和物理广播信道块（synchronization signal and PBCH block, SSB）^[11]。在时域方面，一个 SSB 由 4 个 OFDM 符号组成，其中主同步信号（primary synchronization signal, PSS）、辅同步信号（secondary synchronization signal, SSS）和物理广播信道（physical broadcast channel, PBCH）与相关的解调参考信号（demodulation reference signal, DMRS）占用不同的符号。在频域方面，一个 SSB 由 240 个连续子载波组成。PSS 可以使用户设备（user equipment, UE）获得下行 OFDM 符号同步、频率同步和小区的组内 ID。SSS 可以使 UE 获得小区组 ID。PBCH-DMRS 可以使 UE 获得 SSB 序号，从而获得时隙同步。PBCH 可以使 UE 确认从 PBCH-DMRS 上获取的 SSB 序号，并获取半帧序号和系统帧号，从而获得时隙同步、无线帧同步。基站同步信号对于手机和基站间的同步及空口同步测试至关重要。

1.3 同步异常对无线业务的影响

定时异常对无线业务的影响分为 3 种情况：时间同步误差的影响、载波同步误差的影响和采样值同步误差的影响^[8,12]。

（1）时间同步误差的影响

对于 TDD 系统，可以通过调整上下行时隙切换点实现各个小区内上下行资源的动态分配。时

间同步误差会使得 TDD 系统上下行时隙干扰,导致吞吐量下降^[13]。对于 OFDM 系统,如果 OFDM 符号定时超前,则四相相移键控(quadrature phase shift keying, QPSK)星座图会发生旋转,这时 OFDM 符号定时偏差只会引起解调数据的相位旋转,不会造成信号衰落和子载波正交性的破坏。如果 OFDM 符号定时滞后,即符号定时位置落在循环前缀后面,进行 FFT 的数据包含了本符号数据和下一个符号的循环前缀数据,这样会破坏符号子载波的正交性,产生 ICI 及 ISI,这种情况会严重影响系统性能。

(2) 载波同步误差的影响

多载波传输体制对载波频率偏移的影响要比单载波系统敏感得多。对于一个 OFDM 系统,如果存在载波频率偏差,系统会产生 ICI 和 QPSK 星座点的相位旋转。如果星座点的相位旋转超过了判决门限,会导致误判决,给 OFDM 系统误比特率性能带来严重的地板效应,无论怎样增加信号的发射功率也不能显著地提升系统性能。

(3) 采样值同步误差的影响

采样时钟偏差对信号造成的影响包括两个方面:一是导致符号相位的旋转,并随时间不断积累,OFDM 系统误码率出现地板效应;二是导致信号幅度衰减,不同子载波幅度衰减不同,并且采样时钟偏差会破坏子载波间的正交性,出现 ICI。

一个 OFDM 系统可能同时存在时间同步偏差、载波频率偏移、采样时钟偏差等多种同步问题,这些因素都会导致发送信号的衰减和星座点的旋转。这些同步偏差是相互影响的,存在一定的弱耦合关系,不太容易进行定量分析。

2 移动通信定时问题

目前 5G 同步网大致存在以下几个问题:从技术角度分析包括卫星接收机易受干扰导致同步降质、时钟配置错误导致同步降质、承载网时钟频

率偏移导致基站载波频率偏移等问题,从标准角度分析包括标准不明确和不一致导致同步问题难以溯源等问题。

2.1 卫星接收机受干扰导致的同步降质问题

由 5G 时间通用组网模型可知,通信网中的源头时间通常来自卫星授时系统,通过在基站和主时钟节点配置卫星接收机的方式实现。随着 5G 基站数量的急速增长,移动通信对卫星授时系统的依赖程度变得越来越高。导航卫星信号十分微弱,易受到干扰和欺骗的影响^[14],由此伴随的安全问题也日益突出。近年来发生了新的卫星授时安全事件(如 GPS 卫星退服、卫星模拟器干扰等),对同步源时钟和基站时钟造成严重影响,导致同步链路中断,网元进入保持模式,直接影响无线业务及终端用户体验。目前同步源和基站的卫星授时安全检测机制仍存在一定缺陷,亟须改善并提高卫星授时应用的安全性。

2.2 时钟配置错误导致的同步降质问题

按照行业标准规范 YDN 117—1999《数字同步网的规划方法与组织原则》,同步网节点的时钟或数字设备的时钟有多个基准信号,一般至少有两个基准信号分别作为主用和备用^[4]。同步网络发生倒换时,有可能出现定时环路^[15],这将导致一系列问题。例如,同步信号发生环路后,环路内的时钟就脱离了本段基准时钟的控制,这将影响时钟输出的准确度,并造成网络时钟振荡,直接导致下挂基站的频率出现偏差。而同步状态信息(synchronization status message, SSM)无法自动防止成环,必须靠人工规划保证,但是实际人工规划时,容易出现定时环隐患。

2.3 承载网时钟频率偏移导致的基站载波频率偏移问题

由频率同步机制可知,在基站卫星不可用的情况下,移动基站的时钟同步信号是通过承载网传送过来的。基准主时钟设备的时钟信号往往通过几十个传输网元,经过长达几百千米甚至上千



千米的传输路径。这么庞大的传输网络经常会出现光缆线路中断、网络保护倒换、传输网元单板故障等各种情况,对时钟质量均会造成一定影响。如果传输网络同步链路出现了时钟偏移,时钟频偏会逐级向下游传递,最后到达基站设备。由于基站设备没有输入口频偏指标限制,又没有牵引范围指标的要求,在承载网中已经产生频偏的时钟信号会畅通无阻地到达基站空口,不产生任何告警。由于传输网元的牵引范围指标比较宽松(± 4.6 ppm (ppm 为百万分之一)),基站频偏很容易超过同步范围,出现大面积基站时钟异常告警,最终导致无线通信中断。

2.4 标准不明确和不一致问题

基站收发系统是移动网络中数量最大、影响运行质量最关键的网元之一,其频率同步精度是极为重要的指标。在 YD/T 3929—2021《5G 数字蜂窝移动通信网 6 GHz 以下频段基站设备技术要求(第一阶段)》与 YD/T 3930—2021《5G 数字蜂窝移动通信网 6 GHz 以下频段基站设备测试方法(第一阶段)》标准中,对基站接收来自地面同步参考的要求均未予规定^[16-17],因此无法保证基站在卫星不可用情况下的同步性能是否满足要求。

按照行业标准 YD/T 1012—1999《数字同步网节点时钟系列及其定时特性》规定,传送网的 3 级节点时钟频率准确度要求为 ± 4.6 ppm^[18]。而我国通信行业标准 YD/T 3929—2021《5G 数字蜂窝移动通信网 6 GHz 以下频段基站设备技术要求(第一阶段)》中规定, NR 基站的发射频率误差应小于 ± 50 ppb/ms^[16]。从频率同步网模型可知,频率同步通过同步节点逐级传递到基站,无线侧标准高于有线侧行业标准近两个数量级,这将导致基站收发系统时钟处于自由振荡或与上级传输系统同步不良,不能满足基站子系统的同步需求。

3 移动同步关键问题的解决方案建议

根据以上问题分析,本文提出了如下解决方

案建议:从技术角度,加强源头时钟卫星抗欺骗干扰能力和关键时钟节点性能监测能力,同时增加软件定义同步网功能;从标准角度,修订无线和有线网络同步相关标准;从测试角度,建立无线网络同步性能检测和监测方案。

3.1 加强源头时钟卫星抗欺骗干扰能力和关键时钟节点性能监测能力

建议采用一定的卫星抗干扰和欺骗的方法,在传统抗干扰欺骗技术的基础上,利用人工智能等技术进行卫星抗干扰欺骗的生成和检测,人工智能作为一种全新的数据分析及处理技术,可实现对卫星导航电文数据进行模式分类和识别,对卫星轨迹进行预测,对钟差进行预测与异常检测,以及对卫星欺骗数据、事件进行样例生成训练抗欺骗干扰算法。通过人工智能技术在导航数据处理中的应用,可增强卫星完好性检测,提高卫星抗干扰和欺骗能力。在卫星信号受到欺骗干扰时,及时做出响应,进行时钟溯源方式切换等操作,保障时钟源头的安全性。

同时通过卫星共视/光纤时频传递/PTP 被动时钟(passive clock)^[5]等方式加强对关键时钟节点的性能监测,可采用外置或内置方式实现同步性能的绝对和相对监测,以及基于同步参考链的相对监测。通过这些方式保障关键时钟节点的性能,加强时钟节点的鲁棒性。承载网时钟频率偏移主要是时钟源降质、链路中断、网络保护倒换、网元单板故障等问题引起的。针对这些问题,网络通常无法直接产生时钟偏离告警,因此可采用对关键时钟性能进行监测的方式及时发现承载网时钟频率偏移导致的基站载波频率偏移问题。

3.2 增加软件定义同步网功能

软件定义同步网基于集中式管理架构,通过引入控制平面,提供智能化的同步网络配置管理、保护恢复、故障管理以及性能管理等功能,防止同步网络定时环、PTP 广播风暴、同步网络人工

配置错误等问题,方便同步网络规划部署,可以增强同步网络运行安全可靠,提升同步网络运维管理效率^[19]。软件定义同步网具体包含同步链路规划、同步链路新增及调整规划、同步网络配置检测、同步网络保护恢复、同步网络故障管理、同步网络性能管理等功能。

在现网设备中,通过同步网络配置检测功能可进行定时成环识别、主备时钟缺失识别及相关告警指示等操作。尤其在网络结构复杂的数字网中,如物理拓扑有树状、环形和网孔形等,定时环可能非常隐蔽,需要借助智能时钟管控及时发现定时环路,遏制定时环的破坏。另外,针对同步网的开通和部署,通过同步链路自动规划、同步链路新增及调整规划功能,同样可避免定时环等人工配置导致的问题,提高部署管理效率和同步网络的安全可靠性。针对同步网性能监测等问题,通过同步网络故障管理、同步网络性能管理,可实现同步网络的性能监测、越限告警、告警网络级分析及根因自动定位。时钟配置错误导致同步降质的问题,通常表现为定时环风险和主备时钟缺失等问题,因此,通过软件定义同步网功能可以得到较好的解决。

3.3 标准亟须修订

系统时钟同步标准规定的不足以及工程设计和运用的忽视,导致有关系统目前普遍存在稳定性较低的问题。如基站收发系统是移动网络中数量最大、影响运行质量最关键的网元之一,其同步精度是极为重要的指标,需要尽快补充完善相应的行业标准。

基站无线侧标准高于有线侧行业标准近两个数量级,需要补充说明标准不一致的问题,且基站有线侧频率输入牵引范围指标未予规定,超过 ± 50 ppb 频偏的时钟信号很容易传导给基站造成超标。由于基站仅有空口同步准确度指标,因此需要增加基站有线侧输入同步指标要求和牵引范围指标要求。根据 ITU-T G.8261.1 对分组从时钟设备频率长期网络漂移限值的要求^[20],基于

ITU-T G.823 场景 3 的输出漂移网络限值如图 2 所示,建议设置基站设备频率牵引范围为 ± 16 ppb。

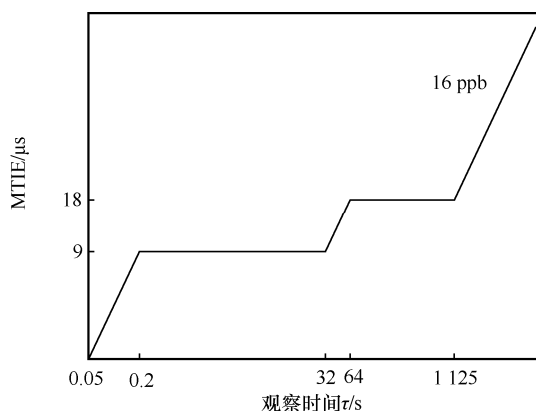


图2 基于 ITU-T G.823 场景 3 的输出漂移网络限值

3.4 建立无线侧同步检测方案

对基站空口的时间和频率性能进行检测,无线空口测试方案如图 3 所示。

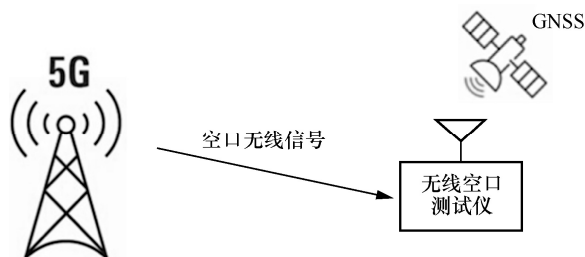


图3 无线空口测试方案

无线测试仪接收卫星获取参考时间,同时接收基站下行信号,通过捕获基站的 SSB 信号,测量无线基站相对可用的基准时频源(如 GNSS)的时间偏差。本文通过无线空口测试仪,对某 5G 基站无线信号的 3.408 96 GHz 频率 SSB 同步信号进行测量,并补偿了基站到测试仪表的信号传播距离,得到基站时间和频率的偏差结果,基站空口时间频率偏差测量结果如图 4 所示。测量结果显示,被测无线信号中心频率偏差为 -42.3 Hz (-12.4 ppb),峰-峰值为 59.8 Hz (17.5 ppb),时间平均偏差为 228.3 ns,峰-峰值为 48.8 ns。根据测量结果及基站同步指标^[16]判断基站同步偏差是否符合要求,当指标超标时上报告警。

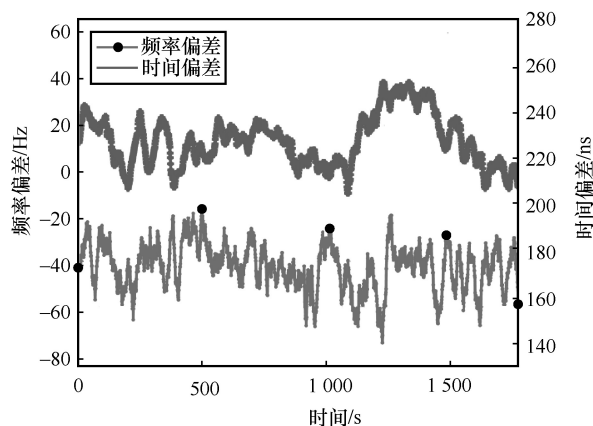


图4 基站空口时间频率偏差测量结果

3.5 建立无线侧同步监测方案

通过 PTP 报文对无线基站的时间偏差进行监测, 移动基站在同时具备 GNSS 和地面 PTP 时间参考的情况下, 以 GNSS 信号为主用参考源, PTP 设置为 passive 时钟功能, 计算基站和上游传输设备的时间差值。本文用一台时频综合分析仪模拟基站设备接收传输设备的 PTP 时间, 传输设备通过同步网获取来自时间服务器的时间和频率参考, 通过时频综合分析仪测量得到基站与传输设备的时间差值。PTP 被动时钟时间偏差监测结果如图 5 所示, 平均时间偏差为 302.2 ns, 峰-峰值为 35 ns。并通过 PTP 的信令 (Signaling) 报文空闲字段进行差值回传, 当时间差值超过指标限值时上报告警信息。

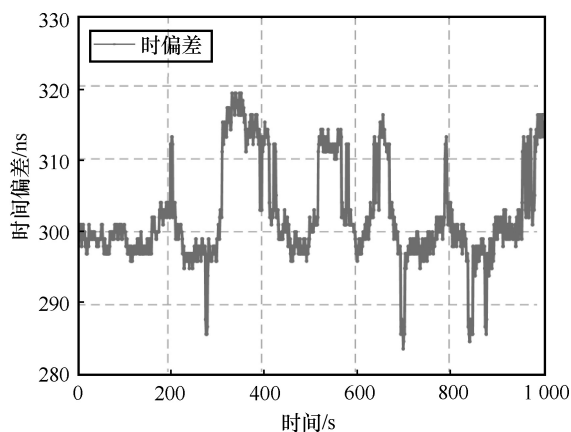


图5 PTP 被动时钟时间偏差监测结果

还可利用 PTP 报文监测基站频率偏差, 假设某时刻基站的 PTP 被动时钟收到一组 Sync 报文

T_1 、 T_2 时间戳^[5], T 时间后再获取一组 Sync 报文 T'_1 、 T'_2 时间戳, 则基站与上游传输设备的相对频率偏差为:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta t}{T} = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\Delta t_1} \quad (1)$$

其中, $\Delta t_2 = T'_2 - T_2$, $\Delta t_1 = T'_1 - T_1$ 。本文模拟基站时钟进入保持状态, 通过时频综合分析仪测量得到一组 Sync 报文时间戳数据, 如式 (2) 和式 (3) 所示。

$$\begin{aligned} T_1 &= 1\,667\,037\,604.243\,168\,531\text{ ns}, \\ T_2 &= 1\,667\,037\,604.243\,169\,53\text{ ns} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} T'_1 &= 1\,667\,038\,364.241\,226\,802\text{ ns}, \\ T'_2 &= 1\,667\,038\,364.241\,227\,674\text{ ns} \end{aligned} \quad (3)$$

报文时间间隔为 760 s, 将式 (2) 和式 (3) 分别代入式 (1), 计算出基站设备相对于上游传输设备的频率偏差 $\Delta f / f = 1.7 \times 10^{-10}$ 。将此频偏结果通过 PTP 的 Signaling 报文空闲字段回传至网管, 并与基站频偏指标相比较, 当频率偏差超过 ± 50 ppb 时上报告警信息。

4 结束语

本文针对现有移动通信中的定时问题, 从技术、标准、测试 3 个角度开展了研究。分析了移动通信关键技术的定时原理及定时异常对无线业务的影响。分析了 5G 同步定时故障原因, 包括卫星授时干扰、定时环问题、承载网频率偏差及有线和无线同步标准不一致问题。并针对以上问题提出了相应的方案建议, 包括加强时钟源的卫星抗欺骗干扰能力和关键时钟节点的性能监测能力, 保证时钟源性能的可靠性和时钟传导的准确性; 增加软件定义同步网功能, 及时发现定时环、定时链路故障和潜在的定时偏差风险; 在行业标准中做到有线网络和无线网络同步标准协调一致, 同时增加基站收发系统的同步监测方法。通过以上措施, 保障移动通信同步系统的正常可靠运行。

参考文献:

- [1] IMT-2020 (5G) 推进组. 5G 同步组网架构及关键技术[R]. 2019.
IMT-2020 (5G) Promotion Group. 5G synchronization network architecture and key technologies[R]. 2019.
- [2] 程华, 于天泽, 李秀芳. 传输系统定时异常对 GSM-R 系统时钟影响的分析[J]. 电信技术, 2014(7): 94-97.
CHENG H, YU T Z, LI X F. Analysis of the influence of abnormal timing of transmission system on GSM-R system clock[J]. Telecommunications Technology, 2014(7): 94-97.
- [3] 程华. 传输网元指针调整与 GSM-R 基站时钟同步异常案例分析[J]. 电信技术, 2013(7): 64-66.
CHENG H. Case analysis of abnormal clock synchronization between transmission network element pointer adjustment and GSM-R basestation[J]. Telecommunications Technology, 2013(7): 64-66.
- [4] 中华人民共和国信息产业部. 数字同步网的规划方法与组织原则: YDN 117—1999[S]. 北京: 人民邮电出版社, 2000.
Ministry of Information Industry of the People's Republic of China. Planning method and organization principle for digital synchronization network (internal standard): YDN 117 — 1999[S]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2000.
- [5] EIDSON J, LEE K. IEEE 1588 standard for a precision clock synchronization protocol for networked measurement and control systems[C]//Proceedings of 2nd ISA/IEEE Sensors for Industry Conference. Piscataway: IEEE Press, 2003: 98-105.
- [6] ITU-T. Timing characteristics of primary reference time clocks: G.8272/Y.1367 [S]. 2018.
- [7] ITU-T. Timing characteristics of enhanced primary reference time clocks: G.8272.1/Y.1367.1 [S]. 2019.
- [8] 吴伟陵, 牛凯. 移动通信原理 (第 2 版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 223-251.
WU W L, NIU K. Principles of mobile communication (2nd edition)[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009: 223-251.
- [9] 王晟劼. 基于 5G 大规模有源阵列天线的波束研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2018.
WANG S J. The beam research base on large scale active array antenna for 5G mobile communication technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2018.
- [10] 3GPP. Base station (BS) radio transmission and reception: TS 38.104[S]. 2022.
- [11] 3GPP. NR physical channels and modulation: TR 38.211[S]. 2022.
- [12] 彭端. 宽带无线移动通信系统中的同步理论和技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2006.
PENG D. Researches on theory and technique of synchronization in broadband wireless mobile communication systems[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2006.
- [13] 羌佳琳, 李锦川, 谭国平, 等. TD-LTE 异构网络时隙配置干扰仿真研究[J]. 电子技术应用, 2014, 40(3): 101-103, 111.
QIANG J L, LI J C, TAN G P, et al. The simulation study of interference in TD-LTE heterogeneous network with slot configuration[J]. Application of Electronic Technique, 2014, 40(3): 101-103, 111.
- [14] ZHAO Y Q, SHEN F, XU G H, et al. A spatial-temporal approach based on antenna array for GNSS anti-spoofing[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2021, 21(3): 929.
- [15] 中华人民共和国信息产业部. 基于 SDH 传送网的同步网技术要求: YD/T 1267—2003[S]. 北京: 人民邮电出版社, 2003.
Ministry of Information Industry of the People's Republic of China. Technical specification for synchronization network based on SDH transport network: YD/T 1267—2003[S]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2003.
- [16] 中华人民共和国工业和信息化部. 5G 数字蜂窝移动通信网 6 GHz 以下频段基站设备技术要求 (第一阶段): YD/T 3929—2021[S]. 北京: 人民邮电出版社, 2021.
Ministry of Industry and Information of the People's Republic of China. 5G digital cellular mobile telecommunication network-technical specification of sub 6 GHz gNB equipment (phase I): YD/T 3929—2021[S]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2021.
- [17] 中华人民共和国工业和信息化部. 5G 数字蜂窝移动通信网 6 GHz 以下频段基站设备测试方法 (第一阶段): YD/T 3930—2021[S]. 北京: 人民邮电出版社, 2021.
Ministry of Industry and Information of the People's Republic of China. 5G digital cellular mobile telecommunication network test method of sub 6 GHz gNB equipment(phase I): YD/T 3930—2021[S]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2021.
- [18] 中华人民共和国信息产业部. 数字同步网节点时钟系列及其定时特性: YD/T 1012—1999[S]. 北京: 人民邮电出版社, 1999.
Ministry of Information Industry of the People's Republic of China. Node clock set of digital synchronization network and its timing feature: YD/T 1012—1999[S]. Beijing: Posts & Telecom Press, 1999.
- [19] 中华人民共和国工业和信息化部. 软件定义同步网技术要求: YD/T 3770—2020[S]. 北京: 人民邮电出版社, 2020.
Ministry of Industry and Information of the People's Republic of China. Technical requirements for software-defined synchro-



nization network: YD/T 3770—2020[S]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2020.

- [20] ITU-T. Packet delay variation network limits applicable to packet-based methods (frequency synchronization): G.8261.1/Y.1361.1[S]. 2012.

[作者简介]



缪新育 (1983—)，男，北京邮电大学信息与通信工程学院博士生，主要从事同步领域的专项研究和标准制定工作。



胡昌军 (1971—)，男，中国信息通信研究院技术与标准研究所教授级高级工程师、副总工程师，主要从事同步和光通信领域的标准制定、技术咨询、专项研究及测试评估工作。



程华 (1964—)，女，中国信息通信研究院技术与标准研究所教授级高级工程师，主要从事传输与同步专业技术标准研究及测试验证工作。