

5G NTN 定时提前调整策略分析

Analysis on Timing Advance Adjustment Strategies of 5G NTN

叶向阳¹, 单 单¹, 韩春娜², 张建国¹ (1. 华信咨询设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310052; 2. 诺基亚通信系统技术(北京)有限公司浙江分公司, 浙江 杭州 310053)

Ye Xiangyang¹, Shan Dan¹, Han Chunna², Zhang Jianguo¹ (1. Huaxin Consulting Co., Ltd., Hangzhou 310052, China; 2. Nokia Solutions and Networks System Technology Co., Ltd Zhejiang Branch, Hangzhou 310053, China)

摘 要:

首先阐述了5G NTN的网络架构,指出NTN有透明转发和再生转发两大场景,较大的传播时延不可避免地对5G NR定时提前调整策略带来了极大的挑战。然后分析了5G NTN上行定时提前调整策略,通过引入上行时间同步参考点,由gNB指定UE补偿时延的数值,如UE补偿服务链路和馈电链路在内的所有时延,或UE只补偿服务链路的时延;gNB通过向UE广播定时漂移信息,以补偿LEO卫星移动引起的大定时漂移。最后对5G NTN定时关系进行了分析,包括上行定时关系增强和MAC CE定时关系增强。

Abstract:

Firstly, it introduces 5G NTN architectures and points out that NTN has two scenarios: transparent forwarding and regenerative forwarding. The large propagation delay inevitably brings great challenges to the timing advance adjustment strategy of 5G NR. Then, it analyzes uplink timing advance adjustment strategies of 5G NTN. By introducing the uplink time synchronization reference point, gNB specifies the value of UE delay compensation, for example, UE compensates all delays including the service link and the feed link, or UE only compensates the delay of the service link. The gNB broadcasts timing drift information to UE to compensate the large timing drift due to LEO satellite movement. Finally, it analyzes the timing relationship of 5G NTN, including uplink timing relationship enhancement and MAC CE timing relationship enhancement.

Keywords:

5G NTN; Timing advance; Propagation delay; Synchronization reference point; Timing relationship

引用格式:叶向阳, 单 单, 韩春娜, 等. 5G NTN定时提前调整策略分析[J]. 邮电设计技术, 2023(9): 58–62.

关键词:

5G NTN; 定时提前; 传播时延; 同步参考点; 定时关系

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2023.09.011

文章编号: 1007-3043(2023)09-0058-05

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



1 概述

5G承担着赋能千行百业、万物互联的使命,除了传统的地面5G蜂窝移动通信外,3GPP在Rel-17版本中将卫星通信网作为地面5G蜂窝移动通信网的重要补充,简称为非地面网络(Non-Terrestrial Networks, NTN),NTN与5G NR网络相融合,发挥各自的技术优势,可以实现全球无缝覆盖和星地融合的端到端业务贯通。

NTN具有覆盖范围大的优势,因此能够大大加强5G服务的可靠性,可以为物联网设备或飞机、轮船、高铁等交通工具上的用户提供连续服务,也能够确保在任何区域都有可利用的5G信号,尤其是铁路、海事、航空等领域;当发生地震、洪水等重大自然灾害,地面通信系统失灵后,NTN网络可以提供应急通信^[1]。

地面5G蜂窝移动通信系统的传播时延通常小于1 ms,而NTN网络的传播时延非常大。因此不可避免地对5G NR定时提前调整策略带来了极大的挑战,Rel-15/Rel-16版本设计的定时提前调整方法已不再适合NTN网络,因此需要重新设计定时提前调整策略

收稿日期: 2023-07-10

以满足 NTN 网络超长的传播时延。

2 5G NTN 的网络结构

5G NTN 网络的典型结构如图 1 所示, NTN 网关和 NTN 平台(卫星或 UAS 平台)之间的链路称为馈电链路(Feeder link), NTN 平台和 UE 之间的链路称为服务链路(Service link)。根据 NTN 平台对无线信号处理的不同, NTN 分为两大场景, 即透明转发和再生转发。对于透明转发, 信号在 NTN 平台上只有频率转换、信号放大等过程, 透明转发也称为弯管转发; 对于再生转发, NTN 平台具有部分或全部 gNB 功能, 包括频率转换、信号放大及解调/解码、交换和/或路由、编码/调制等过程。3GPP Rel-17 版本只支持透明转发。

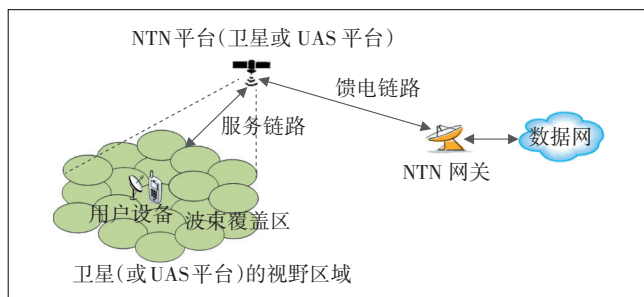


图 1 NTN 网络的典型结构

NTN 平台包括卫星以及无人机系统(Unmanned Aircraft System, UAS)平台。根据轨道高度的不同, 卫星又分为低轨道(Low Earth Orbit, LEO)卫星、中轨道(Middle Earth Orbit, MEO)卫星、地球静止轨道(Geostationary Earth Orbit, GEO)卫星和高椭圆轨道(High Elliptical Orbit, HEO)卫星。UAS 平台中的空中载体平台(High Altitude Platform Station, HAPS)位于平流层, 相对于地球固定在某个特定位置, 具有覆盖半径大、时延小、容量大等特点。NTN 平台类型如表 1 所示。

对于表 1 中的 NTN 平台, GEO 卫星提供洲际或区域通信服务; LEO 卫星和 MEO 卫星以星座组网的方式在北半球和南半球提供通信服务, 在某些条件下, 也

表 1 NTN 平台类型

平台	高度方位/km	轨道	典型波束直径尺寸/km
LEO 卫星	300~1 500	环绕地球的圆形	100~1 000
MEO 卫星	7 000~25 000		100~1 000
GEO 卫星	35 786	相对地球保持静止, 对于地面上的某个点, 具有固定的高度和方向角	200~3 500
UAS 平台(包括 HAPS)	8~50 (HAPS 是 20)		5~200
HEO 卫星	400~50 000	环绕地球的椭圆形	200~3 500

可以为包括极地在内的全球区域提供通信服务, UAS 平台提供本地通信服务, HEO 卫星通常为高纬度地区提供通信服务。

卫星的波束覆盖区是典型的椭圆形, 可以产生固定波束或可调整波束, 因此在地面上产生移动的或固定的波束覆盖区, 波束分为 3 种类型。

a) 地面固定波束: 在所有的时间内, 同一个地理区域由固定的波束持续地覆盖, 例如 GEO 卫星产生的波束。

b) 准地面固定波束: 在某个有限的周期内, 某个地理区域由一个波束覆盖, 在其他周期内, 该区域由其他波束覆盖, 例如非 GEO 卫星产生的可调整波束。

c) 地面移动波束: 波束的覆盖区域沿着地面滑动, 如非 GEO 卫星产生的固定的或不可调整的波束。

NTN 网络的传播时延与传统的地面 5G 蜂窝移动网相比增加了很多。对于 GEO 卫星, 单向传播时延达到 270.73 ms(透明转发); 对于 LEO 卫星, 单向传播时延达到 12.89 ms(透明转发, 卫星高度 600 km)和 20.89 ms(透明转发, 卫星高度 1 200 km)^[2]。

3 上行定时提前调整策略

根据是否具有 GNSS 能力, UE 分为具有 GNSS 能力的 UE 和不具有 GNSS 能力的 UE, 不具有 GNSS 能力的 UE 不能评估 UE 到卫星之间的传播时延, 为了补偿非常大的传播时延, 需要对 3GPP 规范进行较大的修改, 为了尽可能地减少对规范的修改, 3GPP Rel-17 版本规定, UE 必须具有 GNSS 能力。

对于具有 GNSS 能力的 UE, 由于 UE 知道自身位置和卫星星历, 能够在发射 MSG1(PRACH)前自动评估 UE 到卫星之间的定时提前(Timing Advance, TA)。根据 UE 补偿的链路不同, 有 2 种可选的方案^[3]。

方案 1: 补偿服务链路和馈电链路的时延。这种方案是 UE 在发射 MSG1 之前, 补偿 UE 到 NTN 网关之间的全部时延, 包括服务链路和馈电链路。UE 根据自身位置和卫星星历, 自动评估服务链路的 TA, gNB 向 UE 广播馈电链路的 TA。这种方案可以确保下行(DownLink, DL)帧和上行(UpLink, UL)帧在 gNB 处是对齐的。该方案适合于 GEO 卫星, 因为馈电链路的传播时延不随时间变化。但是对于 LEO 卫星, 由于 LEO 卫星快速移动, 将导致馈电链路的传播时延迅速变化, 一种解决方法是 gNB 不向 UE 指示 TA 值, 而是指示 NTN 网关的位置, 但是随着 LEO 卫星的移动, NTN

网关会发生更换,因此需要考虑NTN网关更换这种行为。

方案2:仅补偿服务链路的时延。由于在同一个波束内,馈电链路的时延对所有UE都是相同的,只有服务链路的时延是不相同的,因此UE只需要补偿服务链路的TA,馈电链路的时延补偿由gNB来管理。对于再生转发,DL帧和UL帧在gNB处是对齐的;对于透明转发,由于反馈链路时延和卫星处理时间的原因为,DL帧和UL帧在gNB处是不对齐的,因此需要gNB来管理这个帧定时差异。

上述2种方案各有优缺点,经过技术讨论后,最终选择了一个折中方案,即定义一个上行时间同步参考点(以下简称参考点),由gNB指定UE补偿时延的数值,如果参考点在TNT网关,UE补偿包括服务链路和馈电链路在内的所有时延;如果参考点在卫星,UE只补偿服务链路的时延。当然,参考点也可以定义在卫星到NTN网关之间的某个点上^[4]。

引入参考点后,上行TA补偿示意图如图2所示^[5]。

引入参考点后,gNB需要向UE提供公共TA(TA_{Common}),公共TA的主要作用是补偿参考点到卫星之间的传播时延。如果 $TA_{Common} = 0$,对应着参考点在卫星上;如果 $TA_{Common} > 0$,对应着参考点在馈电链路上,通常在NTN网关。

对于上述方案,UE能够补偿大部分的TA,gNB处理残余的定时误差,由于残余的定时误差足够小,PRACH接收机按照地面5G蜂窝网络的方法即可补偿

残余的定时误差,然后gNB向UE发送MSG2即随机接入响应(Random Access Response,RAR),以便对UL定时进一步校准,UE根据MSG2中的定时命令,在MSG3(PUSCH)中应用新的定时校准。

对于GEO卫星,由于GEO卫星是静止的,在UE发送MSG3后,定时误差主要由UE移动引起,gNB可以按照地面5G蜂窝网络的方法,通过媒体接入控制(Medium Access Control,MAC)控制单元(Control Element,CE)的TA命令,对UE的定时进行实时调整^[6]。

但是对于LEO卫星,按照地面5G蜂窝网络进行TA调整存在以下2个问题。

a) 由于卫星高速移动,UE和NTN网关之间的传播时延是持续变化的,当传播时延很大时,gNB发送的TA命令到达UE的时刻,TA命令可能是过期的。例如,因LEO卫星移动引起的最大定时漂移可以达到 $40 \mu\text{s/s}$,当传播时延是 15 ms 时,则TA命令到达UE的时刻,偏离了 $15 \text{ ms} \times 40 \mu\text{s/s} = 0.6 \mu\text{s}$, $0.6 \mu\text{s}$ 已经超过了SCS=120 kHz的CP(Cyclic Prefix,循环前缀)持续时间($0.57 \mu\text{s}$)^[7]。一种可能的解决方案是gNB在 t 时刻发射的TA值转换成在 $t + t_{\text{delay}}$ 的TA值,其中 t_{delay} 是从gNB发送TA命令到UE接收到该命令所经历的时延。

b) 在连接模式下,gNB需要持续的发送TA命令给UE,以便维持UL定时。在Timing Delta MAC CE中,有6 bit信息用于调整TA。UE根据式(1)计算新的TA值:

$$N_{TA_new} = N_{TA_old} + (T_A - 31) \times 16 \times 64 \times 2^{-\mu} (T_c) \quad (1)$$

其中, $T_A \in \{0, 1, \dots, 63\}$, $T_c = 0.509 \text{ ns}$ 。

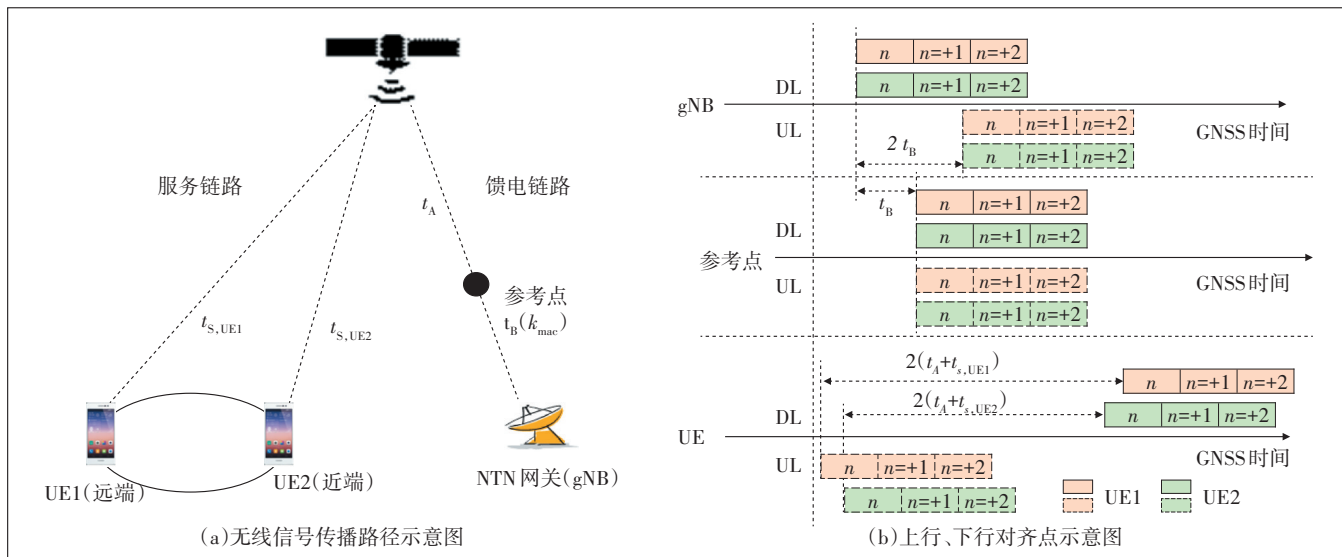


图2 引入参考点后,上行TA补偿示意图

从式(1)可以发现,TA值的最大变化是 $32 \times 16 \times 64 \times 2^{-\mu} T_c$ 。当SCS=15、30、60和120 kHz时,TA值的最大变化分别是16.67、8.33、4.16和2.08 μs ,为了处理高达40 $\mu\text{s/s}$ 的定时漂移,gNB每秒需要分别发送至少3、5、10、20次TA命令,这将导致信令负荷过大^[3]。

针对LEO卫星移动引起的大传播时延和大的定时漂移,gNB需要授权UE,由UE调整UL定时,在一个波束内,不同的UE经历的定时漂移典型上是相同的,因此gNB可以向UE广播定时漂移信息($TA_{\text{CommonDrift}}$ 和 $TA_{\text{CommonDriftVariant}}$)。

综上,为了确保在参考点处,DL帧和UL帧是对齐的,UE应该相对于接收到的DL帧 i ,提前 T_{TA} 发送UL帧 i , T_{TA} 按照式(2)计算^[8]:

$$T_{TA} = (N_{TA} + N_{TA,offset} + N_{TA,adj}^{common} + N_{TA,adj}^{UE})T_c \quad (2)$$

式(2)中,4个变量的计算过程如下。

a) N_{TA} 的计算分为2种情况。

(a) 当 N_{TA} 由RAR提供或由Timing Advance Command MAC CE提供时,根据式(3)计算 N_{TA} :

$$N_{TA} = T_A \times 16 \times 64 / 2^\mu \quad (3)$$

其中, $T_A = 0, 1, 2, \dots, 3846, \mu$ 是子载波间隔配置,对于SCS=15、30、60、120 kHz, μ 的值分别是0、1、2、3。

(b) 对于其他情况,根据式(1)计算 N_{TA} 。

b) $N_{TA,offset}$ 由gNB通过参数n-TimingAdvanceOffset通知给UE,取值是0、25 600或39 936,如果gNB没有提供n-TimingAdvanceOffset,则UE根据文献[9]确定 $N_{TA,offset}$ 的缺省值。

c) $N_{TA,adj}^{common}$,根据式(4)计算:

$$N_{TA,adj}^{common} = \left[TA_{\text{Common}} + TA_{\text{CommonDrift}} \times (t - t_{\text{epoch}}) + TA_{\text{CommonDriftVariant}} \times (t - t_{\text{epoch}})^2 \right] / T_c \quad (4)$$

式中:

TA_{Common} ——公共TA,取值是0~66 485 757的整数,单位是 $4.072 \times 10^{-3} \mu\text{s}$,即对应着0~270.73 ms

$TA_{\text{CommonDrift}}$ ——公共TA的漂移率(drift rate),取值是-257 303~257 303的整数,单位是 $0.2 \times 10^{-3} \mu\text{s/s}$,对应的漂移率是-51.46~51.46 $\mu\text{s/s}$

$TA_{\text{CommonDriftVariant}}$ ——公共TA的漂移率变化(drift rate variation),取值是0~28 949的整数,单位是 $0.2 \times 10^{-4} \mu\text{s/s}^2$,对应的漂移率变化是0~0.579 $\mu\text{s/s}^2$

t_{epoch} ——卫星星历时间的辅助信息,当 t_{epoch} 通过系统消息或专用信令提供时,该时间是参考点处的DL子帧的开始时间, t_{epoch} 通过无线帧号和子帧号通知给

UE^[10]

d) $N_{TA,adj}^{UE}$,根据UE自身位置和卫星星历计算得到。

4 定时关系增强

5G NR的定时关系是严格要求的,由于NTN的传播时延过大,远远超出地面5G蜂窝网络中定义的相关定时参数,为了不影响标准的兼容性,3GPP Rel-17定义了2个调度偏移参数(K_{offset} 和 k_{mac})。

4.1 上行定时关系增强

K_{offset} 的主要作用是保证UE补偿了上行TA后,gNB与UE的时序保持同步, K_{offset} 补偿的时延应该大于等于服务链路TA和公共TA之和(双向时延)。其使用方法是在所有有影响的定时关系上,增加 K_{offset} 以便补偿信号传播时延。 K_{offset} 按照式(5)计算:

$$K_{\text{offset}} = K_{\text{cell,offset}} - K_{\text{UE,offset}} \quad (5)$$

其中, $K_{\text{cell,offset}}$ 是小区专用的定时偏离,gNB通过系统消息广播给UE,取值是1~1 023的整数,如该域不存在,UE假设 $K_{\text{cell,offset}}=0$; $K_{\text{UE,offset}}$ 是UE专用的定时偏离,gNB通过Differential Koffset MAC CE通知给UE,取值是0~63的整数。 $K_{\text{cell,offset}}$ 和 $K_{\text{UE,offset}}$ 的单位是SCS=15 kHz对应的时隙数。

3GPP Rel-17在以下定时关系中使用 K_{offset} :下行控制信息(Downlink Control Information, DCI)调度PUSCH传输的定时关系、RAR调度PUSCH传输的定时关系、PDSCH到HARQ反馈的定时关系、MAC CE承载的TA命令的生效时间、PDCCH调度PRACH传输的定时关系等^[11-12]。

对于传统的地面5G蜂窝网络,UE是在UL时隙 $n+K_2$ 发送PUSCH,引入 K_{offset} 后,UE是在UL时隙 $m=n+K_2+2\mu \times K_{\text{offset}}$ 发送PUSCH,对于SCS=15 kHz,子载波配置 $\mu=0$ 。DCI调度PUSCH传输的定时关系示意(SCS=15 kHz)如图3所示^[5]。

图3中,gNB在时隙 n 发送含有调度PUSCH的DCI命令,经过RTT/2传播时延后到达UE,UE在UL时隙 $m=n+K_2+K_{\text{offset}}$ 发送PUSCH,再经过RTT/2传播时延后到达gNB。需要注意的是UE的UL时隙 n 与DL时隙 n 之间的定时偏移是 T_{TA} 。

4.2 MAC CE定时关系增强

k_{mac} 是对MAC CE的定时关系进行增强,当DL帧和UL帧在gNB侧没有对齐时,使用该参数, k_{mac} 应该大于等于馈电链路的差分TA(双向时延)。如果参考点在NTN网关,则 $k_{\text{mac}}=0$,如果参考点在馈电链路上,则

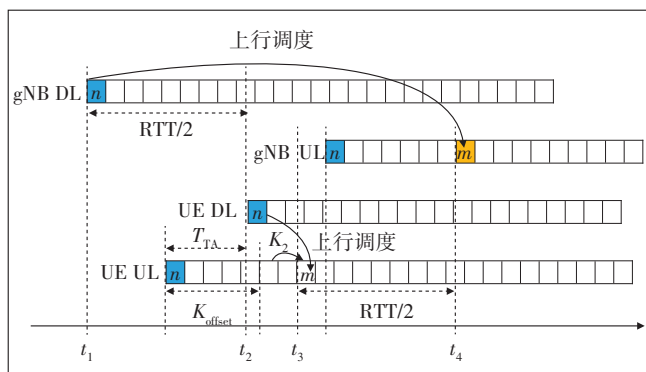


图3 DCI调度PUSCH传输的定时关系示意(SCS=15 kHz)

$k_{\text{mac}} > 0$ 。

k_{mac} 取值是1~512的整数,单位是SCS=15 kHz对应的时隙数,如果该域不存在,UE假设 $k_{\text{mac}}=0$ 。

3GPP Rel-17 在以下定时关系中使用 k_{mac} : MAC CE承载的上行功率控制的生效时间、UE接收RAR窗口的生效时间、MAC CE承载的TCI状态激活的生效时间、MAC CE承载的半持续(或非周期)CSI-RS资源的生效时间等。

如果gNB为UE提供了 k_{mac} ,当UE在UL时隙 n 发送含有HARQ-ACK(该HARQ-ACK是对承载MAC CE命令的PDSCH的确认消息)的PUCCH后,UE应该假设MAC CE激活的下行配置在DL时隙 $p = n + 3N_{\text{subframe},\mu}^{\text{slot}} + 2^{\mu} \times k_{\text{mac}}$ 之后生效, $N_{\text{subframe},\mu}^{\text{slot}}$ 是1个子帧内包含的时隙数,对于SCS=15 kHz, $N_{\text{subframe},\mu}^{\text{slot}} = 1$,子载波配置 $\mu=0$ 。引入 k_{mac} 后,MAC CE定时关系增强示意(SCS=15 kHz)如图4所示^[13]。

5 结束语

与传统的地面5G蜂窝移动通信网相比,5G NTN的传播时延非常大,对5G NR的定时策略带来了极大的挑战,本文分析了具有GNSS能力UE的上行定时策略和定时关系增强,这些策略能基本满足UE接入5G NTN的需求。在Rel-18以及后续的版本中,通过提高UE上报位置的精度,gNB可以基于UE的位置和自身覆盖情况,进一步提高定时的准确性,提高5G NTN网络的速率,进一步扩展5G NTN网络的应用范围。

参考文献:

- [1] 3GPP. Study on New Radio(NR)to support non-terrestrial networks: 3GPP TR 38.811[S/OL]. [2023-05-15]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.
- [2] 3GPP. Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN): 3GPP TR 38.821[S/OL]. [2023-05-15]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.

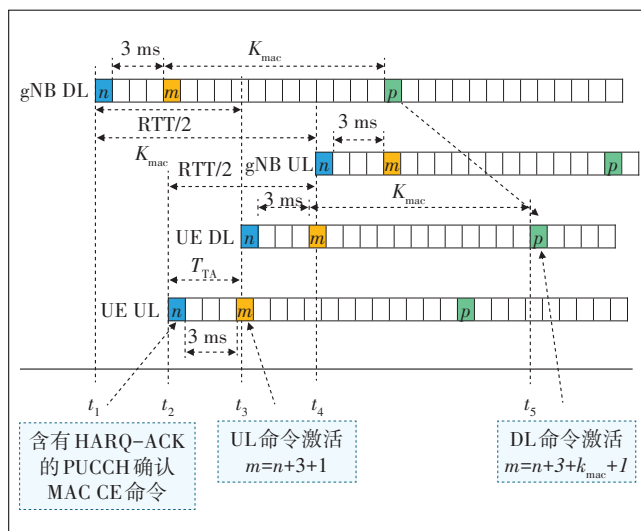


图4 MAC CE定时关系增强示意图(SCS=15 kHz)

- [3] Ericsson. On NTN synchronization, random access, and timing advance: R1-1912725 [S/OL]. [2023-05-15]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.
- [4] Panasonic. Timing advance and PRACH design for NTN: R1-1912903[S/OL]. [2023-05-15]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.
- [5] 缪德山, 柴丽, 孙建成, 等. 5G NTN关键技术与演进展望[J]. 电信科学, 2022, 38(3): 10-21.
- [6] 3GPP. NR; Medium Access Control (MAC) protocol specification: 3GPP TS 38.321[S/OL]. [2023-05-15]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.
- [7] 张建国, 杨东来, 徐恩, 等. 5G NR物理层规划与设计[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2020: 102-105.
- [8] 3GPP. NR; Physical channels and modulation: 3GPP TS 38.211[S/OL]. [2023-05-15]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.
- [9] 3GPP. NR; Requirements for support of radio resource management: 3GPP TS 38.133[S/OL]. [2023-05-15]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.
- [10] 3GPP. NR; Radio Resource Control (RRC) ; Protocol specification: 3GPP TS 38.331[S/OL]. [2023-05-15]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.
- [11] 3GPP. NR; Physical layer procedures for control: 3GPP TS 38.213[S/OL]. [2023-05-15]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.
- [12] 3GPP. NR; Physical layer procedures for data: 3GPP TS 38.214[S/OL]. [2023-05-15]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.
- [13] 3GPP. NR; NR and NG-RAN overall description; Stage-2: 3GPP TS 38.300[S/OL]. [2023-05-15]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.

作者简介:

叶向阳, 华信咨询设计研究院有限公司副总工程师、能效研究院院长, 高级工程师, 主要从事无线网络、IDC电源的规划和设计工作; 单 单, 毕业于浙江大学, 学士, 主要从事无线网络的规划和设计工作; 韩春娜, 毕业于南京邮电学院, 工程师, 硕士, 主要从事5G相关测试和规划工作; 张建国, 毕业于南京邮电学院, 正高级工程师, 硕士, 主要从事无线网络的规划和设计工作。