

# 5G NTN 随机接入过程分析

## Analysis of 5G NTN Random Access Procedure

于江涛<sup>1</sup>,王 森<sup>2</sup>,张建国<sup>1</sup>(1. 华信咨询设计研究院有限公司,浙江 杭州 310052;2. 中讯邮电咨询设计院有限公司,北京 100048)

Yu Jiangtao<sup>1</sup>, Wang Sen<sup>2</sup>, Zhang Jianguo<sup>1</sup>(1. Huaxin Consulting Co., Ltd., Hangzhou 310052, China; 2. China Information Technology Designing & Consulting Institute Co., Ltd., Beijing 100048, China)

### 摘 要:

首先分析了5G NTN的传播时延和差分时延,指出超长的且快速变化的传播时延不可避免地对5G NR的随机接入过程带来了极大的挑战。然后分析了5G NTN时间同步补偿策略,通过引入上行同步参考点、广播2个定时漂移参数和2个调度偏移参数,UE可以有效补偿超长的传播时延和较大的定时漂移,并满足5G NR的时序关系。最后给出了基于竞争的5G NTN随机接入过程。

### 关键词:

5G NTN; 定时提前; 随机接入过程; 同步参考点; 传播时延

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2023.10.008

文章编号: 1007-3043(2023)10-0040-05

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):



### Abstract:

Firstly, it analyzes the propagation delay and differential delay of 5G NTN, it points out that the extremely long and rapidly changing propagation delay inevitably brings great challenges to the random access procedure of 5G NR. Then the time synchronization compensation strategies of 5G NTN are analyzed. By introducing the uplink synchronization reference point, broadcasting two timing drift parameters and two scheduling offset parameters, UE can effectively compensate for the ultra long propagation delay and large timing drift, and satisfy the timing relationship of 5G NR. Finally, it puts forward contention-based random access procedure of 5G NTN.

### Keywords:

5G NTN; Timing advance; Random access procedure; Synchronization reference point; Propagation delay

引用格式: 于江涛,王森,张建国. 5G NTN随机接入过程分析[J]. 邮电设计技术, 2023(10): 40-44.

## 1 概述

随着5G网络的大规模部署,5G网络的应用场景不断扩大,并开始向空中和水下扩展。卫星通信成为重点的研究方向,在3GPP Rel-17协议中,引入了非地面网络(Non-Terrestrial Networks, NTN),作为地面5G蜂窝移动通信网络的重要补充,NTN与地面5G蜂窝移动通信网络互相融合,可以有效覆盖地面、空中、海

洋,实现空天地一体化通信。

NTN由地面网关(含gNB)、卫星、UE三大部分组成,地面网关和卫星之间的链路是馈电链路,UE和卫星之间的链路是服务链路。根据卫星对无线信号的处理方式,NTN包括透明转发和再生转发两大场景,对于透明转发,卫星只对信号进行放大和频率转换;对于再生转发,卫星具有gNB的全部或部分功能。卫星包括低轨道(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。目前业界研究的重

收稿日期: 2023-08-28

点是GEO卫星和LEO卫星<sup>[1]</sup>。

地面5G基站的高度通常在100 m以内,覆盖距离在几百米到几千米,因此地面5G蜂窝移动通信网络的双向传播时延通常不超过1 ms。而卫星的轨道高度至少在几百千米以上,覆盖距离可达数百千米到数千千米,导致NTN的传播时延和差分时分延比地面5G蜂窝移动通信网络增加了很多,因此给5G NR随机接入过程带来了极大的挑战,Rel-15/Rel-16设计的随机接入过程已不再适合NTN,因此需要重新设计随机接入过程以满足NTN超长的且快速变化的传播时延。

## 2 NTN的传播时延和差分时分延

对于透明转发,单向时延定义为从UE经过卫星

到地面网关的时延,双向时延定义为从UE经过卫星到地面网关,再从地面网关经过卫星到UE的时延。对于再生转发,单向时延定义为从UE到卫星的时延,双向时延定义为从UE到卫星,再从卫星到UE的时延。

差分时分延指的是在波束覆盖范围内,在特定位置选择的2个点之间的传播时延的差值。仰角为90°的天底点和仰角最小的覆盖边缘点之间的差分时分延最大。小的波束直径对应着小的差分时分延,为了减少差分时分延,3GPP协议规定,GEO卫星的波束直径最大为1 500 km,LEO卫星的波束直径最大为500 km。不同高度卫星的传播时延和差分时分延见表1<sup>[2]</sup>。

UE接入到NTN的难点是如何补偿UE到gNB之

表1 不同高度卫星的传播时延和差分时分延

参数		GEO卫星(高度35 786 km)	LEO卫星(高度600 km)	LEO卫星(高度1 500 km)
地面网关与卫星之间的最小仰角/ $^{\circ}$		10	10	10
UE与卫星之间的最小仰角/ $^{\circ}$		10	10	10
透明转发	单向时延/ms	270.73	12.89	20.89
	双向时延/ms	541.46	25.77	41.77
再生转发	单向时延/ms	135.37	6.44	10.45
	双向时延/ms	270.73	12.89	20.89
单向差分时分延的最大值/ms		10.30	3.12	3.18

间的传播时延。第1个难点是UE到gNB之间的传播时延和差分时分延非常大,见表1。第2个难点是对于LEO卫星,由于卫星高速移动,导致服务链路和馈电链路的时延都在不停地快速变化。NTN采用与传统地面5G蜂窝移动通信网络类似的流程,即gNB根据UE发送的随机接入前导码计算定时提前(Timing Advance, TA),然后再通过定时提前命令(Timing Advance Command, TAC)通知给UE,UE提前发射上行信息,以便不同UE发送的上行信息在同一个时刻到达gNB,只要定时误差落在循环前缀(Cyclic Prefix, CP)范围内,gNB就能正确接收UE所发送的上行数据。为了适应NTN超长的且快速变化的传播时延,TA的计算方式有较大的变化。

## 3 NTN时间同步补偿策略

如果UE不具有全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)能力,由于UE不知道自身位置信息,UE需要补偿的单向时延至少是6.44 ms(LEO卫星,高度为600 m),即使补偿差分时分延,也需

要至少补偿3.12 ms(LEO卫星,高度为600 km),远远超过了Rel-15/Rel-16的设计能力。如果UE具有GNSS能力,则UE可以根据自身位置信息和卫星星历,粗略评估UE到卫星之间的传播时延,残余的定时误差足够小,按照地面5G蜂窝移动通信网络的方法即可补偿。为了降低复杂度,3GPP Rel-17规定,UE必须具有GNSS能力,同时对协议进行了必要的增强,以补偿UE到gNB之间超长的且快速变化的传播时延<sup>[3]</sup>。

a) 在地面网关和卫星之间引入了一个上行同步参考点,参考点既可以在地面网关上,也可以在卫星上,还可以定义在卫星到地面网关之间的任何一点上。UE负责补偿UE到参考点之间的传播时延,包括服务链路TA和公共TA,经过UE补偿后,DL帧和UL帧在参考点处是对齐的。参考点到gNB之间的传播时延由gNB负责处理,对UE是透明的<sup>[4]</sup>。

b) 为了补偿快速变化的传播时延,即为了补偿定时漂移,gNB向UE广播2个定时漂移参数( $TA_{CommonDrift}$ 和 $TA_{CommonDriftVariant}$ ),由UE补偿因LEO卫星高速运动引起的时延变化,其理论基础是不同的UE在同一个波束覆

盖区内,所经历的定时漂移基本上是相同的<sup>[5-6]</sup>。

c) NTN 超长的传播时延为 5G NR 的时序关系带来了挑战,为了保证协议的兼容性,3GPP Rel-17 定义了 2 个调度偏移参数( $K_{\text{offset}}$  和  $k_{\text{mac}}$ )。 $K_{\text{offset}}$  主要用于上行方向,UE 使用这个参数可以保证 gNB 和 UE 的时序同步,其值应该大于 UE 到参考点之间的双向时延。 $k_{\text{mac}}$  主要用于下行方向,是对 MAC 层定时关系的增强,UE 使用这个参数可以保证 DL 帧和 UL 帧在 gNB 侧是对齐的,其值应该大于地面网关到参考点之间的双向时延<sup>[7-8]</sup>。

采取以上 3 个措施后,NTN 定时关系示意如图 1 所示。

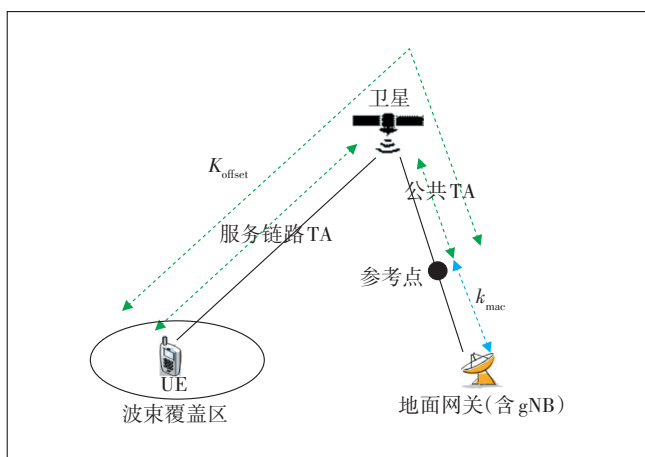


图 1 NTN 定时关系示意

在 UE 侧,DL 帧和 UL 帧的定时关系如图 2 所示。即 UE 应该相对于 DL 帧  $i$ ,提前  $T_{\text{TA}}$  发送上行帧  $i$ ,才可以保证 DL 帧和 UL 帧在参考点处是对齐的。

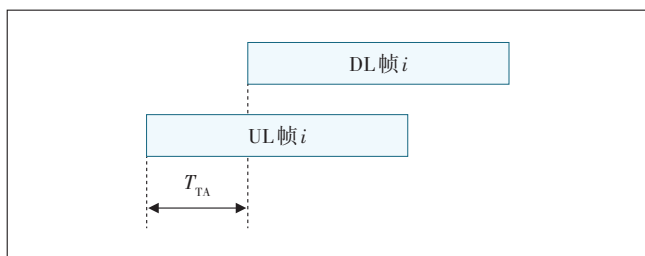


图 2 UE 侧 DL 帧和 UL 帧的定时关系

需要注意的是,UE 无论是发送第 1 个上行信道 PRACH 上的数据,还是后续 PUSCH 和 PUCCH 上的数据,都必须保证提前量是  $T_{\text{TA}}$ 。UE 需要根据 gNB 发送的定时提前命令,不停地调整  $T_{\text{TA}}$ , $T_{\text{TA}}$  的计算如下:

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

其中, $T_c=0.509 \text{ ns}$ 。其他 4 个参数的含义如下。

a)  $N_{\text{TA}}$  主要补偿 UE 位置变化引起的上行定时误差,gNB 通过 MAC 层信令将  $N_{\text{TA}}$  通知给 UE,属于 UE 专用参数。分为如下 3 种情况。

(a) 对于 PRACH,由于 gNB 不知道 UE 的位置,因此  $N_{\text{TA}}=0$ 。

(b) 对于随机接入响应(Random Access Response, RAR)调度的 PUSCH,gNB 通过 RAR 通知给 UE,有 12 bit。

(c) 对于其余的 PUCCH 和 PUSCH,gNB 通过绝对定时提前调整 CE 或者相对定时调整 CE 通知给 UE,对于绝对定时提前调整 CE,有 12 bit;对于相对定时提前调整 CE,有 6 bit<sup>[9]</sup>。

b)  $N_{\text{TA,offset}}$  由 gNB 通过系统参数 n-TimingAdvance-Offset 通知给 UE 或采用默认参数。

c)  $N_{\text{TA,adj}}^{\text{common}}$  对应图 1 中的公共 TA,可根据式(2)计算:

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

其中, $\text{TA}_{\text{Common}}$  用于补偿参考点到卫星之间的公共时延; $\text{TA}_{\text{CommonDrift}}$  和  $\text{TA}_{\text{CommonDriftVariant}}$  用于补偿因 LEO 卫星高速运动引起的定时漂移; $t_{\text{epoch}}$  是卫星星历时间的辅助信息,这 3 个参数由 gNB 通过系统消息通知给 UE。

d)  $N_{\text{TA,adj}}^{\text{UE}}$ ,对应图 1 中的服务链路 TA,根据 UE 自身位置和卫星星历计算。

## 4 5G NTN 随机接入过程

如图 3 所示,从物理层角度来看,基于竞争的随机

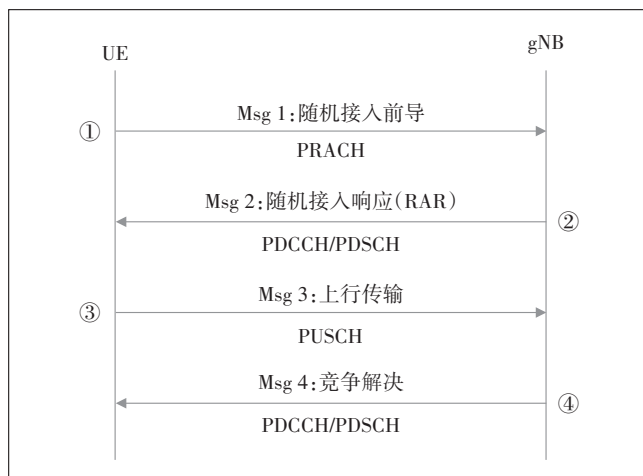


图 3 基于竞争的随机接入过程

接入过程包括4个步骤<sup>[10]</sup>。

#### 4.1 随机接入前导(Msg1)

当PRACH采用长序列格式时,PRACH共有4种前导格式(见图4)。本文建议采用前导格式1,前导格式1的长度是3ms,CP、随机接入前导、保护时间的长度分别是0.684ms、 $2 \times 0.8 = 1.6$ ms、0.716ms,子载波间隔 $\Delta f^{RA} = 1.25$ kHz。前导格式1的CP最大,可以纠正0.684ms以内的定时误差,且前导格式1的随机接入前导重复2次,在较低的信噪比条件下有较好的接收质量,尤其适合于NTN这种小区覆盖半径非常大的场景<sup>[11-15]</sup>。UE按照式(1)的计算结果,在上行时隙 $m-2$ 、 $m-1$ 和 $m$ 上发送随机接入前导(Msg1)。

#### 4.2 随机接入响应(Msg2)

UE发送完Msg1后,在规定的搜索窗口上监听下行控制信息(Downlink Control Information,DCI)格式1\_0的PDCCH。搜索窗口的开始位置是在Msg1对应的PRACH时机的最后1个符号之后,再推迟 $T_{TA} + k_{mac}$ ,也即搜索窗口的开始时间是在时隙 $n = m + T_{TA} + k_{mac}$ 之后, $T_{TA}$ 按照式(1)计算, $k_{mac}$ 由gNB通过系统消息通知给UE,取值是1~512的整数,单位是SCS=15kHz对应的时隙数,如果该域不存在,UE假设 $k_{mac} = 0$ 。搜索窗口的长度由高层参数ra-ResponseWindow提供,在3GPP Rel-15版本中,最大的搜索窗口时间是10ms;在Rel-16版本中,当SCS=15、30、60、120kHz时,最大的搜索窗口的时间分别是160、80、40、20ms。

如果UE在规定的搜索窗口上监听到DCI格式1\_0的PDCCH(使用相应的RA-RNTI对CRC加扰),则UE将该PDCCH调度的传输块也即RAR传递给MAC层,RAR具有固定尺寸,包括12bit的TAC、27bit的上行授权以及16bit的TC-RNTI。12bit的TAC可以调整2ms以内的定时误差;27bit的上行授权主要包括跳频标志、PUSCH频域资源分配、PUSCH时域资源分配、MCS、功率控制命令等。

#### 4.3 RAR上行授权调度PUSCH(Msg3)

Msg3包含来自高层与UE竞争解决地址相关联的信息。UE根据RAR(Msg2)中的27bit上行授权信息,确定PUSCH(Msg3)使用的时频资源、MCS等。UE在上行时隙 $p = n + k_2 + \Delta + K_{cell,offset}$ 上发送Msg3,时隙 $n$ 是包含RAR的PDSCH的最后一个时隙;当PUSCH的SCS=15kHz时,PUSCH时隙偏移 $k_2 = 1, \Delta = 2; K_{cell,offset}$ 由gNB通过系统消息通知给UE,取值是1~1023的整数,如果该域不存在,则UE假设 $K_{cell,offset} = 0$ 。

#### 4.4 携带UE竞争地址的PDSCH(Msg4)

如果UE发送的Msg3消息中包含的是CCCH SDU,则gNB通过PDCCH(使用TC-RNTI对CRC进行扰码)调度Msg4,Msg4中包括UE竞争解决地址MAC CE,该MAC CE是Msg3中包含的上行CCCH SDU消息的复制,UE将该MAC CE与自身在Msg3上发送的上行CCCH SDU进行比较,如果两者相同,则判定为竞争成功,UE使用TC-RNTI作为C-RNTI;如果两者不相

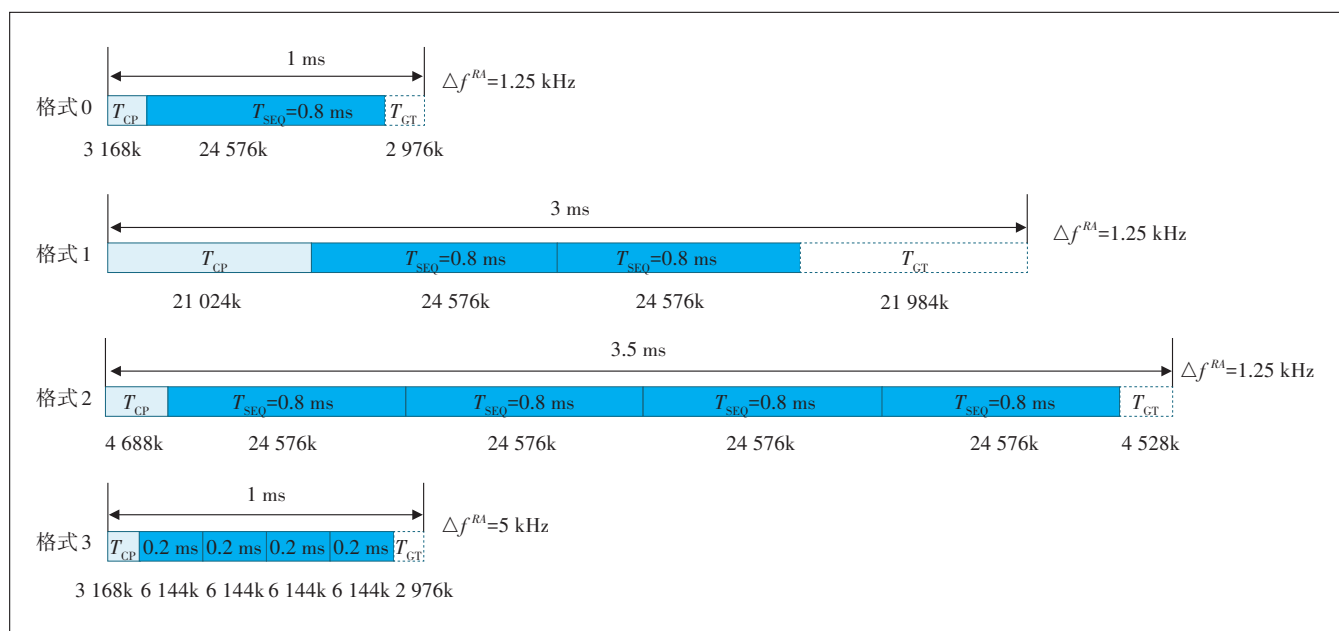


图4 长序列的PRACH前导格式

同, 则判定为竞争失败, UE 重新发起随机接入过程。

5G NTN 随机接入过程的定时关系示意 (SCS=15 kHz) 如图 5 所示。

## 5 结束语

本文分析了具有 GNSS 能力的 UE 接入 5G NTN 的

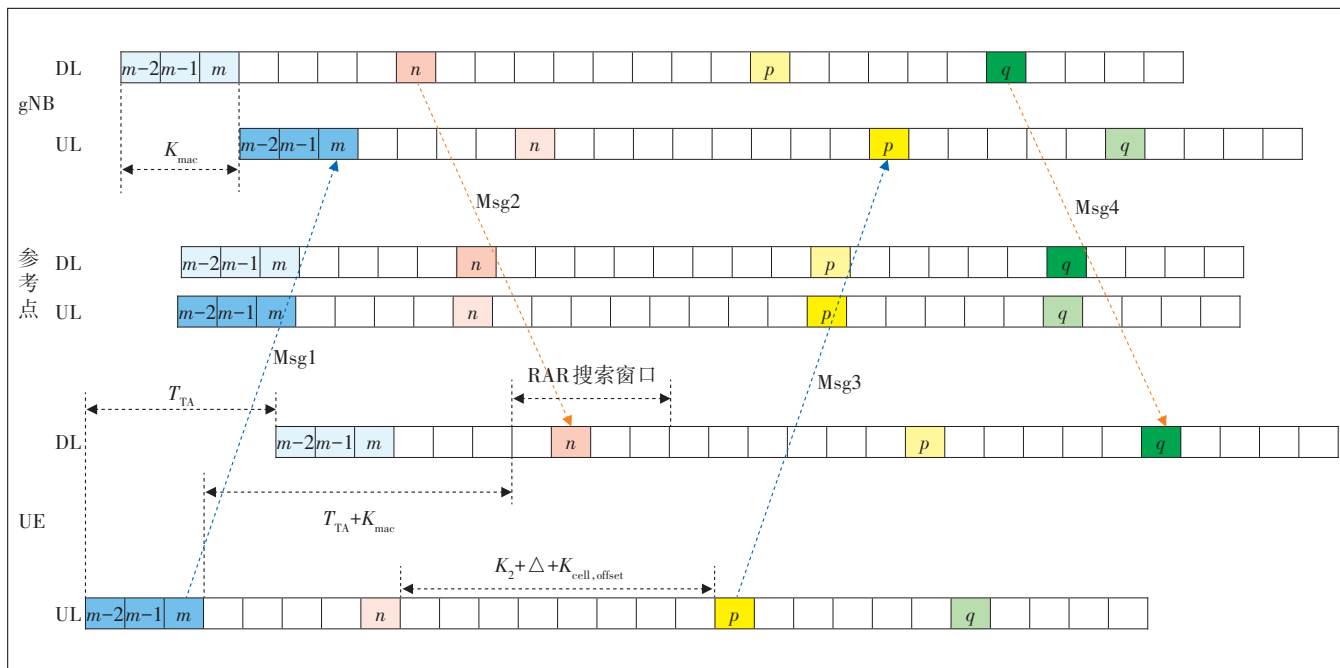


图 5 5G NTN 随机接入过程的定时关系示意 (SCS=15 kHz)

时间同步补偿策略和随机接入过程, 可以确保 UE 在长的快速变化的传播时延环境下, 有效接入 5G NTN 网络。在 Rel-18 以及后续的版本中, 通过重新设计 PRACH 前导格式、重新设计 RAR 的搜索窗口, 可以使 UE 在不依赖 GNSS 的情况下, 也能接入 NTN 网络, 使 NTN 网络的应用扩大到室内、隧道等场景, 进一步拓展 5G NTN 的应用范围。

### 参考文献:

[1] Study on New Radio (NR) to support non-terrestrial networks: 3GPP TR 38.811 [S/OL]. [2023-06-15]. [ftp://3gpp.org/specs/](http://3gpp.org/specs/).  
 [2] Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN): 3GPP TR 38.821 [S/OL]. [2023-06-15]. [ftp://3gpp.org/specs/](http://3gpp.org/specs/).  
 [3] 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 (3): 10-21.  
 [4] NR; NR and NG-RAN Overall Description; Stage 2: 3GPP TS 38.300 [S/OL]. [2023-06-15]. [ftp://3gpp.org/specs/](http://3gpp.org/specs/).  
 [5] NR; Physical channels and modulation: 3GPP TS 38.211 [S/OL]. [2023-06-15]. [ftp://3gpp.org/specs/](http://3gpp.org/specs/).  
 [6] NR; Radio Resource Control (RRC) protocol specification: 3GPP TS 38.331 [S/OL]. [2023-06-15]. [ftp://3gpp.org/specs/](http://3gpp.org/specs/).  
 [7] NR; Physical layer procedures for control: 3GPP TS 38.213 [S/OL].

[2023-06-15]. [ftp://3gpp.org/specs/](http://3gpp.org/specs/).

[8] NR; Physical layer procedures for data: 3GPP TS 38.214 [S/OL]. [2023-06-15]. [ftp://3gpp.org/specs/](http://3gpp.org/specs/).  
 [9] NR; Medium Access Control (MAC) protocol specification: 3GPP TS 38.321 [S/OL]. [2023-06-15]. [ftp://3gpp.org/specs/](http://3gpp.org/specs/).  
 [10] 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: 335-346.  
 [11] 张建国, 韩春娜, 杨东来. 5G NR 随机接入信号的规划研究[J]. 邮电设计技术, 2019(8): 40-44.  
 [12] 孙建成, 孙嘉颖, 缪德山, 等. 5G NTN 网络架构标准化演进的思考[J]. 电信科学, 2023, 39(9): 76-86.  
 [13] 庞一迪, 谢亮亮. 非地面网络对 5G NR 随机接入的影响分析[J]. 通讯世界, 2021(012): 028.  
 [14] 陈福莉, 姜自森, 蔡罗成, 等. 5G 非地面网络安全研究[J]. 通信技术, 2023, 56(1): 6.  
 [15] 华政翔. 卫星通信在 5G 非地面网络架构中的应用和问题分析[J]. 电信工程技术与标准化, 2019, 32(3): 5.

### 作者简介:

于江涛, 毕业于浙江大学, 高级工程师, 博士, 主要从事移动通信咨询规划、技术研究工作; 王森, 高级工程师, 注册咨询师, 硕士, 主要从事运营商移动通信网络规划建设和解决方案课题研究工作; 张建国, 毕业于南京邮电学院, 教授级高级工程师, 一级建造师, 硕士, 主要从事无线网络的规划和研究工作。