5G NR随机接入信号的规划研究

Research on Random Access Signal Planning of 5G NR

张建国[1]，韩春娜[2]，杨东来[1]（1. 华信咨询设计研究院有限公司，浙江 杭州 310052；2. 诺基亚上海贝尔股份有限公司，浙江 杭州 310053）
Zhang Jianguo[1]，Han Chunna[2]，Yang Donglai[1]（1. Huaxin Consulting Co.，Ltd.，Hangzhou 310052，China；2. Nokia Shanghai Bell Co.，Ltd.，Hangzhou Granch，Hangzhou 310006，China）

摘　要：
介绍了随机接入前导序列并给出了随机接入信号的规划方法。首先，根据小区的最大覆盖半径、应用场景等因素，选择PRACH前导格式和限制集合类型；然后，根据小区的最大覆盖半径、限制集合类型、PRACH前导格式等因素选择N_{cs}配置，对于限制集合A和B，建议选择较小的N_{cs}配置；最后，根据限制集合类型和N_{cs}配置等因素，计算逻辑根序列索引的范围和每个小区配置的根序列数量，以降低小区内及小区间的随机接入前导发生冲突的概率。

关键词：
5G NR；PRACH；随机接入前导；循环移位；根序列
doi：10.12045/j.issn.1007-3043.2019.08.009
中图分类号：TN929.5
文献标识码：A
文章编号：1007-3043(2019)08-0040-05

Abstract：
It introduces random access preamble sequence and provides the planning method for random access signal. Firstly，PRACH preamble formats and restricted set types are selected according to the maximum cell radius and the application scenarios. Then，N_{cs} configuration is selected according to the maximum cell radius，restricted set types and PRACH preamble formats. For restricted set A and B，smaller configurations are recommended. Finally，the range of logical root sequence index and the number of root sequences for each cell are calculated according to restricted set types and N_{cs} configuration to reduce the collision probability of random access preambles for intra-cell and inter-cell.

Keywords：
5G NR；PRACH；Random access preamble；Cyclic shift；Root sequence

引用格式：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.

0 引言

5G NR的随机接入过程与LTE类似，也包括随机接入过程初始化、随机接入资源选择、随机接入信号发射、随机接入响应接收和竞争解决等步骤。其中随机接入资源选择包括选择随机接入信号的前导码、初始发射功率、频率等，随机接入资源选择直接影响了随机接入的成功率。本文接下来主要分析随机接入信号的规划，包括与设计密切相关的PRACH前导格式规划、N_{cs}规划和根序列规划。

收稿日期：2019-06-13

1 随机接入前导序列

随机接入前导（random access preamble）序列由具有零相关区的Zadoff-Chu序列（ZC-ZCZ）产生，而ZC-ZCZ序列由1个或多个根Zadoff-Chu序列产生。随机接入前导$x_{u,v}(n)$根据式（1）和式（2）产生。

$$x_{u,v}(n)=x_u((n+C_v)\bmod L_{RA}) \quad (1)$$

$$x_u(i)=e^{-j\frac{\pi ui(i+1)}{L_{RA}}} \quad (2)$$

式中：

u——ZC序列的根序列（以下简称根序列），取值是0~837或0~137

L_{RA}——ZC序列的长度，取值是839或139

C_v——ZC序列的循环移位（CS ——Cyclic Shift），C_v的数值与限制集合类型、循环移位N_{cs}等有关

i——取值是0,1,…,L_{RA}-1

ZC序列的长度不同，应用的频率范围（FR——Frequency Range）也不同，L_{RA}=839应用于FR1（450~6 000 MHz），随机接入前导的子载波间隔Δf^{RA}是1.25 kHz或者5 kHz；L_{RA}=139应用于FR1（450~6 000 MHz）和FR2（24 250~52 600 MHz），$\Delta f^{RA}=15\times2^{\mu}$ kHz，其中$\mu\in\{0,1,2,3\}$。本文只讨论L_{RA}=839这种情况。

2 PRACH前导格式规划

PRACH在时域上由CP（长度是T_{CP}）、1个或多个随机接入前导（单个随机接入前导的长度是T_{SEQ}）和保护时间（长度是T_{GT}）3部分组成。CP的长度与时延扩展有关，长的CP允许更大的时延扩展，因此可以支持更大的小区半径。单个随机接入前导的长度T_{SEQ}与随机接入前导子载波间隔Δf^{RA}的关系为$T_{SEQ}\times\Delta f^{RA}=1$，总的序列长度影响基站对随机接入前导的接收质量，更长的序列长度意味着基站能够接收更多的能量，从而获得更好的解调性能。保护时间内不发送任何信号，保护时间决定了小区的最大覆盖半径，即小区的最大覆盖半径=$c\times T_{GT}/2$，其中$c=3\times10^8$ m/s。

根据CP、随机接入前导、保护时间以及Δf^{RA}的不同，PRACH前导格式分为4种，分别是格式0~3，如图1所示。PRACH前导格式规划即根据小区覆盖半径、应用场景等来选择合适的PRACH前导格式。

PRACH前导格式0的长度是1 ms，CP、随机接入前导、保护时间的长度分别是0.103、0.8、0.097 ms，子载波间隔Δf^{RA}=1.25 kHz，小区的最大覆盖半径是14.53 km。格式0适合于正常半径的小区覆盖，如市区、农村和郊区等环境。

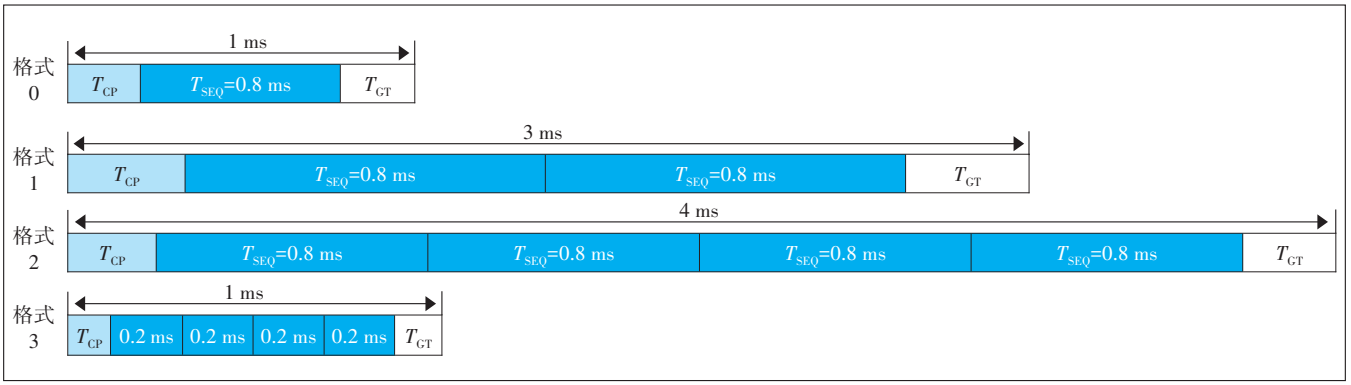

图1　PRACH前导格式

PRACH前导格式1的长度是3 ms，CP、随机接入前导、保护时间的长度分别是0.684、2×0.8=1.6、0.716 ms，子载波间隔Δf^{RA}=1.25 kHz，小区的最大覆盖半径是107.34 km。格式1的随机接入前导重复2次，在较低的SINR下有较好的接收质量，且CP和保护时间最大，因此适合于大的小区半径，如海面、沙漠等环境。

PRACH前导格式2的长度是4 ms，CP、随机接入前导、保护时间的长度分别是0.153、4×0.8=3.2、0.647 ms，子载波间隔Δf^{RA}=1.25 kHz，小区的最大覆盖半径是97.11 km。格式2的随机接入前导重复4次，在低的SINR下也有相对较好的接收质量，因此适合于时延扩展小、信号传播损耗大的场景，如深度覆盖等。

PRACH前导格式3的长度是1 ms，CP、随机接入前导、保护时间的长度分别是0.103、4×0.2、0.097 ms，子载波间隔Δf^{RA}=5 kHz，小区的最大覆盖半径是14.53 km。格式3的子载波间隔较大，对多普勒频移和相位噪声不敏感，因此适合于高速场景。

3 N_{cs}规划

5G NR的N_{cs}与随机接入前导的子载波间隔、限制集合的类型有关，如表1所示。N_{cs}规划即根据小区的最大覆盖半径、限制集合类型、PRACH前导格式等因素选择合适的N_{cs}配置，以降低小区内随机接入前导发生冲突的概率。

如果不考虑限制集合类型因素，根据小区的最大覆盖半径（假定小区的最大覆盖半径是3 km），确定N_{cs}配置的过程如下：

a）计算2个循环移位的最小间隔：3 km小区的最大环回时间是3 000/(3×10^8)×2=20 μs；假定定时误差是2 μs，多径时延余量是7 μs；安全余量是7 μs，则2

表1 N_{cs}的配置

N_{cs}配置	Δf^{RA}=1.25 kHz			Δf^{RA}=5 kHz		
	非限制集合	限制集合A	限制集合B	非限制集合	限制集合A	限制集合B
0	0	15	15	0	36	36
1	13	18	18	13	57	57
2	15	22	22	26	72	60
3	18	26	26	33	81	63
4	22	32	32	38	89	65
5	26	38	38	41	94	68
6	32	46	46	49	103	71
7	38	55	55	55	112	77
8	46	68	68	64	121	81
9	59	82	82	76	132	85
10	76	100	100	93	137	97
11	93	128	118	119	152	109
12	119	158	137	139	173	122
13	167	202	–	209	195	137
14	279	237	–	279	216	–
15	419	–	–	419	237	–

个循环移位的最小间隔是20+2+7+7=36 μs。

b）计算N_{cs}的最小值

$$N_{cs}/L_{RA}>\text{最小间隔}/T_{SEQ} \tag{3}$$

其中，L_{RA}=839；当Δf^{RA}=1.25 kHz时，T_{SEQ}=800 μs，当Δf^{RA}=5 kHz，T_{SEQ}=200 μs。根据式（3），可以计算当Δf^{RA}=1.25 kHz时，N_{cs}的最小值=⌈36/800×839⌉=38；当Δf^{RA}=5 kHz时，N_{cs}的最小值=⌈36/200×839⌉=152。

c）查表获得N_{cs}允许的配置：根据表1，可以看出当Δf^{RA}=1.25 kHz时，无限制集合、限制集合A和限制集合B允许的最小的N_{cs}分别是38、38、38，对应的N_{cs}配置分别是7、5、5。当Δf^{RA}=5 kHz时，无限制集合、限制集合A允许的最小的N_{cs}分别是209、152，对应的N_{cs}配置分别是13、11。

根据以上分析，可以得出以下2个结论：

a）在其他参数相同的条件下，小区的最大覆盖半径越大，N_{cs}也越大。

b）在其他参数相同的条件下，Δf^{RA}=5 kHz较Δf^{RA}=1.25 kHz需要更大的N_{cs}。

4 根序列规划

根据协议，每个PRACH都有64个随机接入前导，这64个随机接入前导首先由某个逻辑根序列索引（该序列索引通过高层参数PRACHRootSequenceIndex发送给UE）对应的根序列通过循环移位的方式得到，并按照可用循环移位C_v的大小进行升序排列，如果PRACHRootSequenceIndex对应的根序列无法产生64个随机接入前导，则逻辑根序列索引加1，其对应的根序列继续产生随机接入前导，如果随机接入前导还不到64个，则逻辑根序列索引继续加1，直至多个连续的逻辑根序列索引对应的根序列产生64个随机接入前导为止。

逻辑根序列索引与根序列u是一对一的映射关系，该映射关系见3GPP TS 38.211协议的表6.3.3.1-3，逻辑根序列索引0~4对应的根序列u分别是129、710、140、699、120。

根序列的规划包括计算逻辑根序列索引的范围和计算每个小区配置的根序列数量2个部分，主要是为相邻小区配置不同的根序列，以便降低小区间随机接入前导发生冲突的概率。由于随机接入前导是通过根序列的循环移位获得的，本文接下来不严格区分循环移位和随机接入前导这2个概念。

4.1 逻辑根序列索引的范围

逻辑根序列索引的范围与限制集合类型有关。5G NR有无限制集合、限制集合A和限制集合B 3种类型，与LTE类似，无限制集合适用于UE移动速度慢的小区，限制集合A和B适用于UE移动速度快的小区。

对于无限制集合，逻辑根序列索引的范围是0~837。

对于限制集合A或B，逻辑根序列索引的范围与N_{cs}的配置有关，可以通过以下步骤计算限制集合A和B的逻辑根序列索引的范围。

a）根据逻辑根序列索引，通过查找3GPP TS 36.211协议的表6.3.3.1-3得到根序列u，根据式（4）计算出q，q是满足条件的最小非负整数。

$$(qu)\bmod L_{RA}=1 \tag{4}$$

b）根据q，通过式（5）计算出d_u。

$$d_u=\begin{cases} q & 0\leqslant q<L_{RA}/2 \\ L_{RA}-q & otherwise \end{cases} \tag{5}$$

c）对于限制集合A，如果d_u满足式（6），则该逻辑根序列索引对应的根序列u有可用的随机接入前导，如果d_u不满足式（6），则该根序列u没有可用的随机接入前导。

$$N_{cs}\leqslant d_u\leqslant(L_{RA}-N_{cs})/2 \tag{6}$$

d）对于限制集合B，如果d_u满足式（7），则该逻辑根序列索引对应的根序列u有可用的随机接入前导，如果d_u不满足式（7），则该逻辑根序列索引对应的根序

列u没有可用的随机接入前导。

$$N_{cs} \leqslant d_u \leqslant (L_{RA}-N_{cs})/4 \text{ 或}$$
$$(L_{RA}+N_{cs})/4 \leqslant d_u \leqslant (L_{RA}-N_{cs})/3 \text{ 或}$$
$$(L_{RA}+N_{cs})/3 \leqslant d_u \leqslant (L_{RA}-N_{cs})/2 \quad (7)$$

以Δf^{RA}=1.25 kHz为例来演示限制集合A可用的逻辑根序列索引的计算过程。

假设N_{cs}的配置是0，则N_{cs}=15，假设逻辑根序列索引是0，查表可知逻辑根序列索引0对应的根序列u是129，满足式(4)的q是826，根据式(5)计算d_u=13，d_u=13不满足式(6)，因此，逻辑根序列索引0对应的根序列129不能用于限制集合A。令逻辑根序列索引依次取值1~837，可以发现当逻辑根序列索引是1~23、820~837时，计算得到的d_u都不满足式(6)，当逻辑根序列索引是24~819时，计算得到的d_u均满足式(6)。因此，当N_{cs}=15时，可用的逻辑根序列索引的范围是24~819。

依次类推，可以计算当Δf^{RA}=1.25 kHz、N_{cs}配置是1~15时，限制集合A可用的逻辑根序列索引的范围。同理，可以计算出当Δf^{RA}=5 kHz、N_{cs}配置是0~15时，限制集合A可用的逻辑根序列索引的范围。

依次类推，可以计算当Δf^{RA}=1.25 kHz和Δf^{RA}=5 kHz，限制集合B可用的逻辑根序列索引的范围，由于公式(7)中的d_u在N_{cs}和$(L_{RA}-N_{cs})/2$之间是不连续的，可用的逻辑根序列索引在0~837是不连续的，限于篇幅，本文不再给出限制集合B可用的逻辑根序列索引的范围。无限制集合、限制集合A可用的逻辑根序列索引的范围如表2所示。

根据表2，可以得出以下结论：对于限制集合A，随着N_{cs}的增加，可用的逻辑根序列索引的数量逐渐减少，该结论对限制集合B同样适用。

4.2 每个小区配置的根序列数量

由于每个小区的随机接入前导是64个，通过表2获得逻辑根序列索引的范围后，还要计算出每个根序列产生的随机接入前导数量，进而计算出每个小区需要配置的逻辑根序列索引的数量，以确保相邻小区使用不同的随机接入前导，降低小区间随机接入前导发生冲突的概率。

计算每个根序列u产生的随机接入前导数量的步骤如下。

a）对于无限制集合，循环移位C_v通过式(8)产生。

$$C_v = \begin{cases} vN_{cs} & N_{cs} \neq 0 \\ 0 & N_{cs} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

表2 无限制集合、限制集合A可用的逻辑根序列索引的范围

N_{cs}配置	Δf^{RA}=1.25 kHz				Δf^{RA}=5 kHz			
	无限制集合		限制集合A		无限制集合		限制集合A	
	N_{cs}	逻辑根序列索引	N_{cs}	逻辑根序列索引	N_{cs}	逻辑根序列索引	N_{cs}	逻辑根序列索引
0	0	0~837	15	24~819	0	0~837	36	62~789
1	13	0~837	18	30~815	13	0~837	57	114~765
2	15	0~837	22	36~809	26	0~837	72	134~729
3	18	0~837	26	43~803	33	0~837	81	136~729
4	22	0~837	32	52~795	38	0~837	89	166~713
5	26	0~837	38	64~789	41	0~837	94	168~713
6	32	0~837	46	76~777	49	0~837	103	186~663
7	38	0~837	55	90~765	55	0~837	112	202~659
8	46	0~837	68	116~751	64	0~837	121	202~659
9	59	0~837	82	136~729	76	0~837	132	262~639
10	76	0~837	100	168~707	93	0~837	137	262~639
11	93	0~837	128	204~659	119	0~837	152	264~629
12	119	0~837	158	264~629	139	0~837	173	326~563
13	167	0~837	202	328~561	209	0~837	195	328~561
14	279	0~837	237	384~513	279	0~837	216	384~513
15	419	0~837	–	–	419	0~837	237	384~513

其中，当$N_{cs}\neq 0$时，v=0,1,…,$\lfloor L_{RA}/N_{cs}\rfloor-1$。根据式(8)，可以计算出1个根序列$u$产生的循环移位有$\lfloor L_{RA}/N_{cs}\rfloor$个。当$N_{cs}$=13时，可产生$\lfloor 839/13\rfloor$=64个循环移位，每个小区只需要配置1个逻辑根序列索引即可获得64个随机接入前导。而当N_{cs}=59时，可产生$\lfloor 839/59\rfloor$=14个循环移位，每个小区需要配置5个连续的逻辑根序列索引才能获得64个随机接入前导。

b）对于限制集合A，循环移位C_v通过式(9)产生。

$$C_v = d_{start}\lfloor v/n_{shift}^{RA}\rfloor + (v \bmod n_{shift}^{RA})N_{cs} \quad v = 0,1,\cdots w-1$$
$$w = n_{shift}^{RA} n_{group}^{RA} + \bar{n}_{shift}^{RA} \quad (9)$$

其中，n_{shift}^{RA}、n_{group}^{RA}、$\bar{n}_{shift}^{RA}$的计算公式参见3GPP TS 36.211协议的6.3.3节，限于篇幅，本文不再具体列出以上3个参数的计算公式。

对于限制集合A，一个根序列u产生的循环移位分为n_{group}^{RA}组，每组有n_{shift}^{RA}个循环移位，共计有$n_{group}^{RA}\times n_{shift}^{RA}$个循环移位。

假定N_{cs}=15，逻辑根序列索引176产生的循环移位共计有2×7=14个，C_v分别是0、15、30、45、60、75、90、341、356、371、386、401、416、434，C_v的组间间隔是251，C_v的组内间隔是15；逻辑根序列索引178产生的循环移位共计有1×6=6个，C_v分别是0、15、30、45、60、75，C_v的组内间隔是15；逻辑根序列索引182产生的循环移位共计有2×7=14个，C_v分别是0、15、30、45、60、

75、90，321、336、351、366、381、396、411，C_v的组间间隔是231，C_v组内间隔是15。

假定N_{cs}=55，逻辑根序列索引176产生的循环移位共计有2×2=4个，C_v分别是0、55、346、401，C_v的组间间隔是291，C_v的组内间隔是55；逻辑根序列索引178产生的循环移位共计有2×1=2个，C_v分别是0、158，C_v的组间间隔是158；逻辑根序列索引182产生的循环移位共计有3×1=3个，C_v分别是0、257、514，C_v的组间间隔是257。

c）对于限制集合B，循环移位C_v通过式（10）获得。

$$C_v=\begin{cases} d_{start}\left\lfloor v/n_{shift}^{RA}\right\rfloor+\left(v \bmod n_{shift}^{RA}\right)N_{cs} & v=0,1,\cdots w-1 \\ \bar{\bar{d}}_{start}+\left(v-w\right)N_{cs} & v=w,\cdots,w+\bar{\bar{n}}_{shift}^{RA}-1 \\ \bar{\bar{\bar{d}}}_{start}+\left(v-w-\bar{\bar{n}}_{shift}^{RA}\right)N_{cs} & v=w+\bar{\bar{n}}_{shift}^{RA},\cdots,w+\bar{\bar{n}}_{shift}^{RA}+\bar{\bar{\bar{n}}}_{shift}^{RA}-1 \end{cases}$$

$$w=n_{shift}^{RA}\times n_{group}^{RA}+\bar{n}_{shift}^{RA} \quad (10)$$

其中，n_{shift}^{RA}、n_{group}^{RA}、$\bar{n}_{shift}^{RA}$、$\bar{\bar{n}}_{shift}^{RA}$、$\bar{\bar{\bar{n}}}_{shift}^{RA}$的计算公式参见3GPP TS 36.211协议的6.3.3节，限于篇幅，本文不再具体列出以上5个参数的计算公式。

对于限制集合B，根序列u产生的循环移位分为3部分，第1部分有n_{group}^{RA}个组，每组有n_{shift}^{RA}个循环移位，共计有$n_{group}^{RA}\times n_{shift}^{RA}$个循环移位；第2部分有$\bar{\bar{n}}_{shift}^{RA}$个循环移位；第3部分有$\bar{\bar{\bar{n}}}_{shift}^{RA}$个循环移位。需要注意的是，多数情况下，$\bar{\bar{n}}_{shift}^{RA}$和$\bar{\bar{\bar{n}}}_{shift}^{RA}$都是0，只有在$(L_{RA}+N_{cs})/4\leq d_u\leq 2L_{RA}/7$时，$\bar{\bar{n}}_{shift}^{RA}$和$\bar{\bar{\bar{n}}}_{shift}^{RA}$才有可能都是非0的正整数。

假定N_{cs}=15，逻辑根序列索引364对应的根序列u是58，满足式（4）的q是217，对应的d_u=217，产生的循环移位共有4×1+1+1=6个，第1部分有4个循环移位，C_v分别是0、44、88、132，C_v的组间间隔是44；第2部分有1个循环移位，C_v是364；第3部分有1个循环移位，C_v是596。

假定N_{cs}=15，逻辑根序列索引329对应的根序列是614，满足式（4）的q是220，对应的d_u=220，产生的循环移位共有3×2+0+0=6个，第1部分有6个循环移位，C_v分别是0、15，71、86，142、157，C_v的组间间隔是66，C_v的组内间隔是15；第2部分和第3部分产生的循环移位个数是0。

根据以上的分析，可以得出以下结论：

a）对于无限制集合、限制集合A和B，随着N_{cs}的逐渐增大，每个根序列产生的循环移位逐渐减少，为了保证每个小区有64个随机接入前导，需要的根序列的数量随之逐渐增加。

b）对于无限制集合，如果N_{cs}相同，每个根序列u产生的循环移位的数量也相同。

c）如果N_{cs}相同或者接近，限制集合A和B产生的循环移位的数量明显少于无限制集合，因此，对于限制集合A和B，每个小区需要分配更多的根序列以产生64个随机接入前导。

d）对于限制集合A和B，循环移位C_v的组内间隔是N_{cs}，循环移位C_v的组间间隔明显大于N_{cs}；另外，在其他参数相同的条件下，不同的根序列u产生的循环移位的数量并不相同。

根据结论c），在小区的最大覆盖半径相同的情况下，相对于无限制集合，限制集合A和B需要更多的根序列以保证每个小区有64个随机接入前导，增加根序列后会导致实施的复杂性增加。为了减少复杂度，建议限制集合A和B选择的N_{cs}，小于根据小区的最大覆盖半径计算得出的N_{cs}，由于C_v的组间间隔明显大于N_{cs}，当UE选择的循环移位不在同一个组时，即使N_{cs}较小，随机接入前导也不会发生冲突。

5 结束语

根据前面的分析，可以发现随机接入信号的PRACH前导格式、N_{cs}配置、逻辑根序列索引的范围、每个小区配置的根序列数量这几个参数是互相影响的，在规划过程中，要根据实际的网络结构，合理设置随机接入信号的参数，既要降低小区内及小区间的随机接入前导发生冲突的概率，又要尽量减少每个小区的根序列数量，以减少实施的复杂度。

参考文献：

[1] NR；Base Station（BS）radio transmission and reception；3GPP TS 38.104[S/OL].[2019-04-01].ftp://3gpp.org/specs/.

[2] NR；Physical channels and modulation：3GPP TS 38.211[S/OL].[2019-06-01].ftp://3gpp.org/specs/.

[3] NR；Multiplexing and channel coding：3GPP TS 38.212[S/OL].[2019-04-01].ftp://3gpp.org/specs/.

[4] NR；Physical layer procedures for control：3GPP TS 38.213[S/OL].[2019-04-01].ftp://3gpp.org/specs/.

[5] NR；NR and NG-RAN Overall Description；Stage 2：3GPP TS 38.300[S/OL].[2019-04-01].ftp://3gpp.org/specs/.

作者简介：

张建国，毕业于南京邮电学院，高级工程师，硕士，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，主要从事云计算和5G相关测试工作；杨东来，毕业于北京邮电大学，工程师，学士，主要从事无线网络的规划和设计工作。