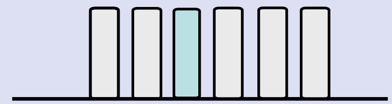
NB-IoT物理层原理

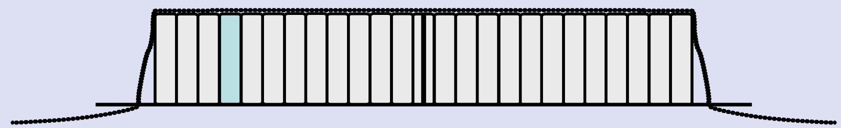
华诺 王磊

三种操作模式

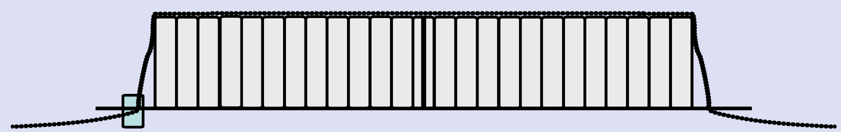
Stand-alone 模式：
利用单独的频带，比如GERAN空闲出来的带宽
不存在与现有LTE系统共存问题



In-band 模式：
利用LTE系统中载波频带
需考虑与现有LTE系统共存问题

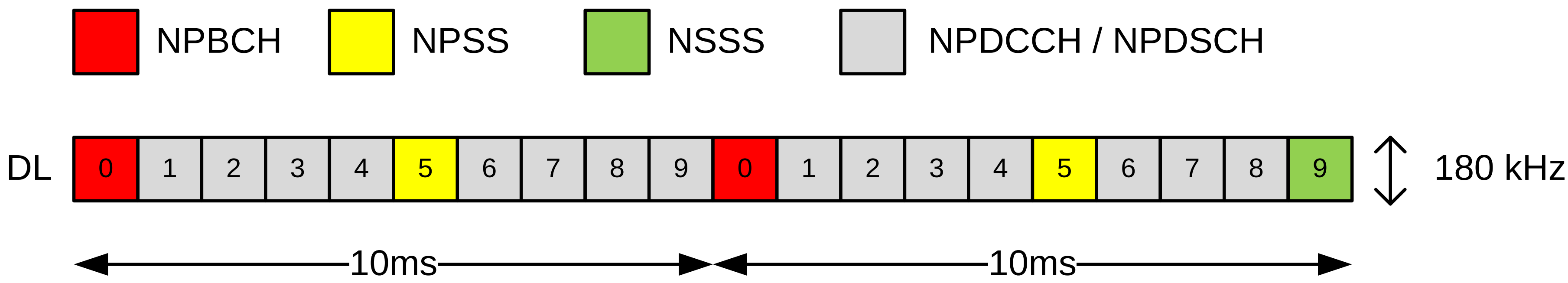


Guard-band 模式：
利用LTE系统中边缘无用频带
需考虑与现有LTE系统共存问题



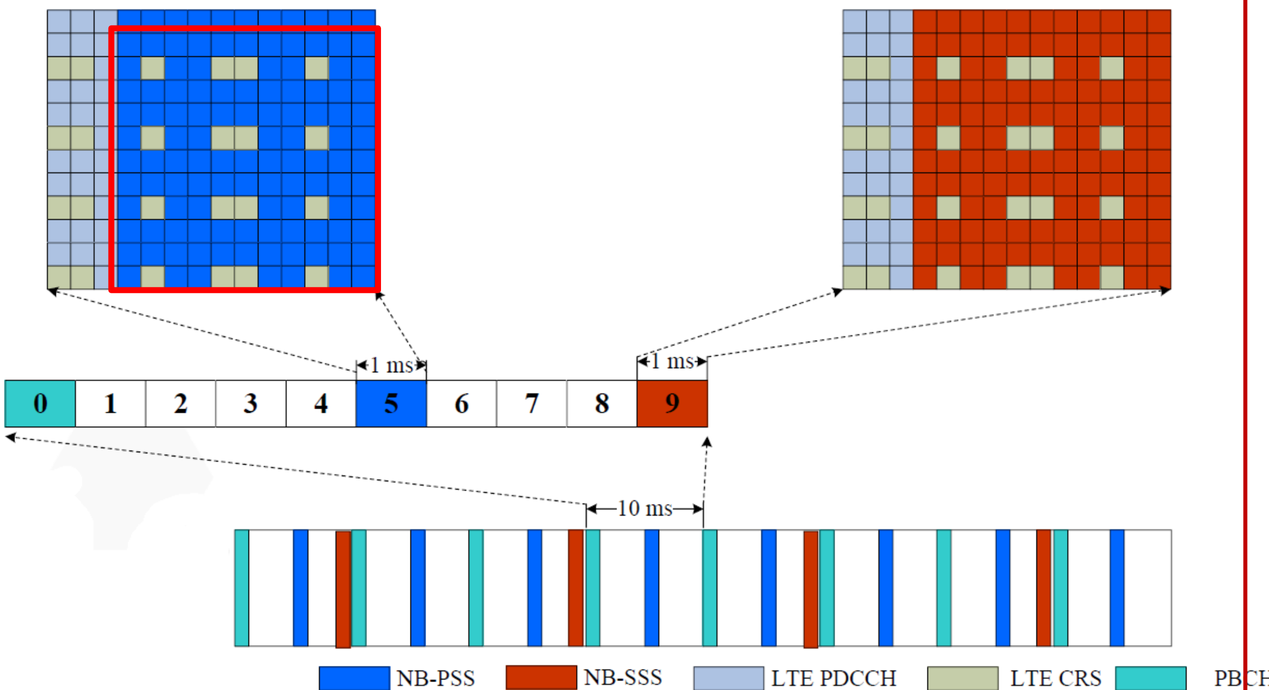
- **为了与传统LTE共存，NB-IoT引入全新的信道结构设计**

下行物理信道



- 采用OFDMA，单载波带宽为180kHz，仅支持15kHz的子载波间隔
- 包含NPBCH、NPSS、NSSS、NPDCCH、NPDSCH、NRS
- 引入新的同步信号NPSS和NSSS
- 引入新的参考信号NRS
- 引入DL GAP的概念
- 不支持PCFICH，子帧中起始OFDM符号根据操作模式和SIB1中信令指示
- 不支持PHICH，采用上行授权进行PUSCH的重传

NPSS/NSSS



NSSS：

1、用于携带504个小区ID信息和80ms帧定时信息，占用偶数帧的#9子帧，周期为20ms

2、采用长度131的ZC序列循环移位扩展至132，不同根索引u与扰码序列q的组合指示小区ID，循环移位指示帧定时

$$d(n)=b_q(m)e^{-j2\pi\theta_f n}e^{-j\frac{\pi u n'(n'+1)}{131}}$$

$$u=N_{\mathrm{ID}}^{\mathrm{Ncell}}\bmod 126+3$$

$$q=\left\lfloor\frac{N_{\mathrm{ID}}^{\mathrm{Ncell}}}{126}\right\rfloor$$

$$\theta_f=\frac{33}{132}(n_f/2)\bmod 4$$

NPSS：

1、用于完成时间和频域同步，占用每个无线帧的#5子帧，周期为10ms

2、采用长度11的ZC序列并进行时域扩展（×11），映射至一个PRB的前11个载波上

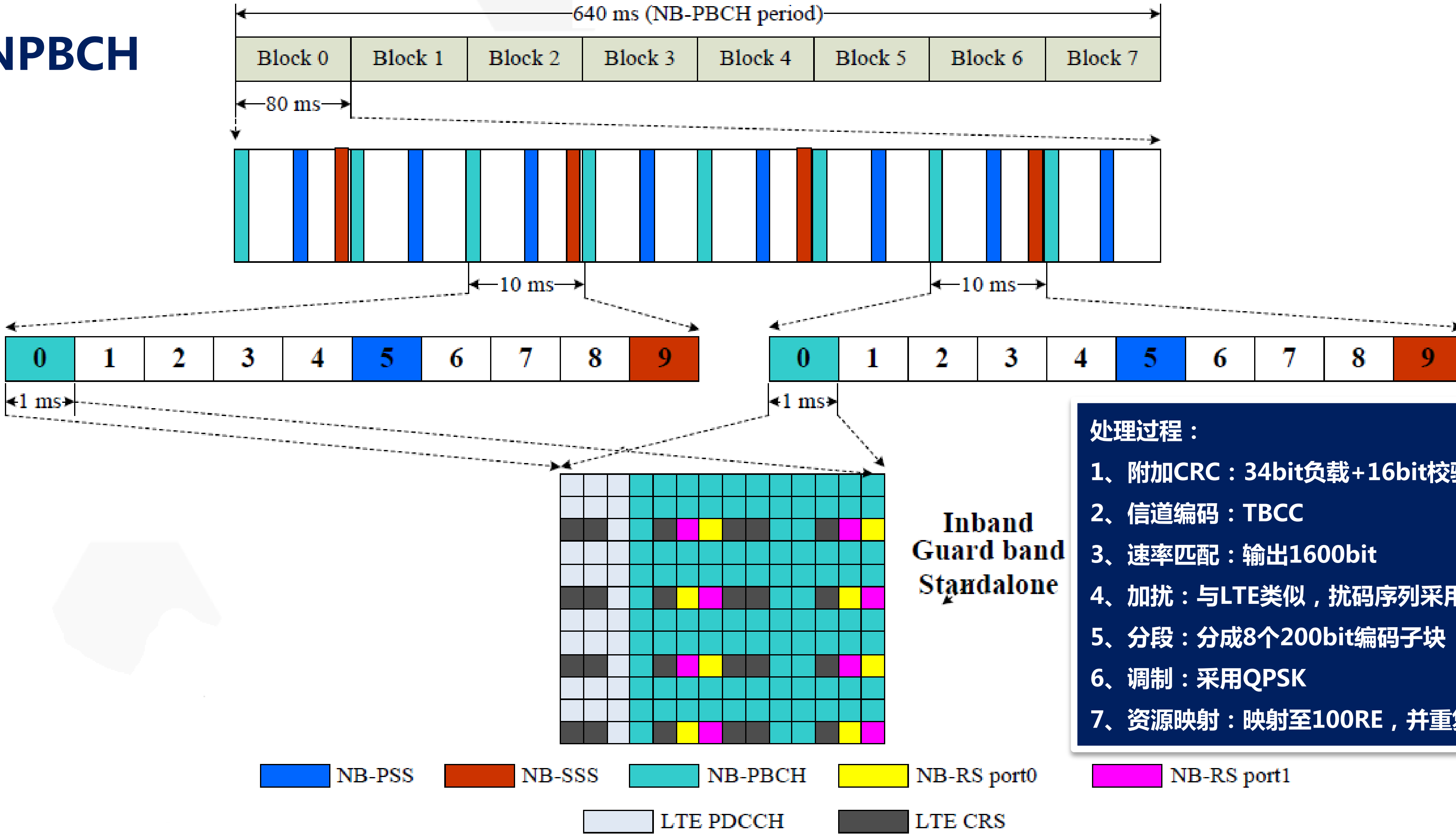
$$d_l(n)=S(l)\cdot e^{-j\frac{\pi u n(n+1)}{11}},\quad n=0,1,\ldots 10$$

$$u=5\qquad S(l)=\{1,1,1,1,-1,-1,1,1,1,-1,1\}$$

与LTE的干扰协调：

不同操作模式采用统一的信道结构设计，避让LTE-PDCCH资源，被LTE-CRS/NRS打孔

NPBCH



处理过程：

1、附加CRC：34bit负载+16bit校验

2、信道编码：TBCC

3、速率匹配：输出1600bit

4、加扰：与LTE类似，扰码序列采用PCID初始化

5、分段：分成8个200bit编码子块

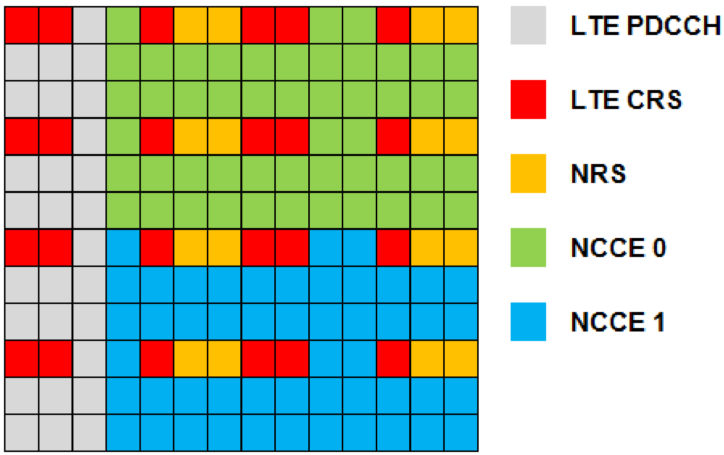
6、调制：采用QPSK

7、资源映射：映射至100RE，并重复8次

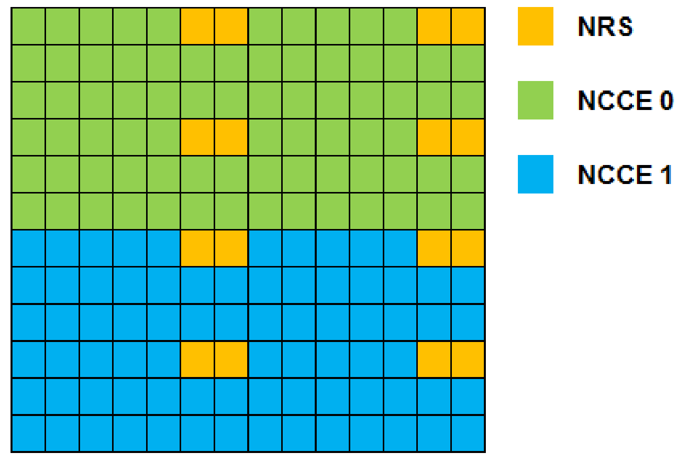
- MIB-NB传输周期为640ms，被分成8个编码子块（皆可自解码），每个编码子被重复传输8次，扩展到80ms的时间间隔上（即在80ms内的每个子帧#0对应一次传输）
- 不同操作模式采用统一的信道结构设计，避让LTE-PDCCH资源，被LTE-CRS/NRS打孔

NPDCCH

In-band模式



Stand-alone/Guard-band模式



处理过程：

1、附加CRC： 39/31bit负载+16bit校验

2、信道编码：TBCC

3、加扰：与LTE类似，但每4个NPDCCH子帧重置扰码序列

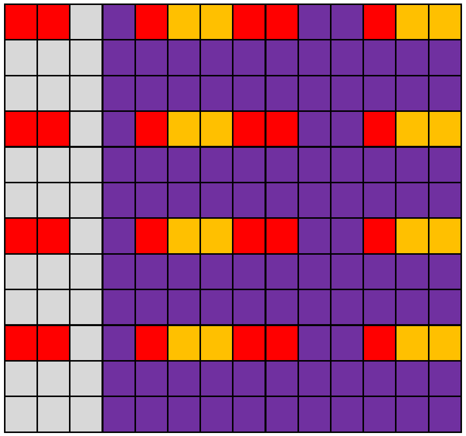
4、调制：采用QPSK

5、资源映射：重复传输（最大2048次），遇不可用子帧向后顺延

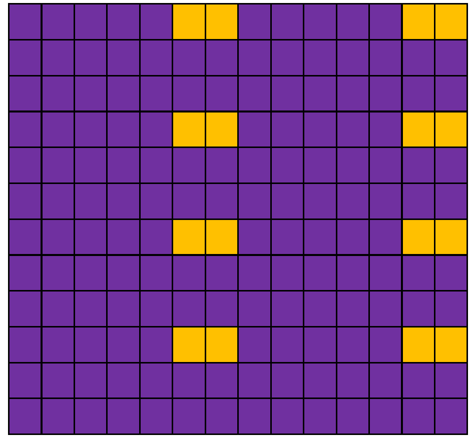
- 支持两种聚合等级，即AL=1NCCE和AL=2NCCE，每个NCCE频域占用6个子载波
- In-band模式：根据SIB1-NB配置的控制域起始OFDM符号开始使用资源，至少11个OFDM符号
- Stand-alone/Guard-band模式：从子帧中第一个OFDM符号开始使用资源
- 支持3种DCI格式，N0/N1/N2
  - N0：上行NPUSCH调度
  - N1：下行NPDSCH调度；PDCCH order触发的随机接入
  - N2：承载Paging的NPDSCH调度；系统消息更新直接指示

NPDSCH

In-band模式



Stand-alone/Guard-band模式



处理过程：

1、附加CRC：*负载+24bit校验

2、信道编码：TBCC

3、速率匹配：输出N_{SF}个子帧承载比特

4、加扰：与LTE类似，但每个重复周期开始重置扰码序列

5、调制：采用QPSK

6、资源映射：基于子帧和重复周期进行M_{rep}次重复传输

- SIB1-NB子帧中，In-band模式从第4个符号开始， Stand-alone/Guard-band模式从第1个符号开始
- 其他NPDSCH子帧中， In-band模式由SIB1-NB配置的eutraControlRegionSize指示， Stand-alone/Guard-band模式从第1个符号开始
- 由连续的[1，2，3，4，5，6，8，10]个子帧构成，最大TBS为680bit
- 使用单HARQ进程，使用异步自适应重传

Table 16.4.1.5.1-1: Transport block size (TBS) table.

I_{TBS}	I_{SF} 0	1	2	3	4	5	6	7
0	16	32	56	88	120	152	208	256
1	24	56	88	144	176	208	256	344
2	32	72	144	176	208	256	328	424
3	40	104	176	208	256	328	440	568
4	56	120	208	256	328	408	552	680
5	72	144	224	328	424	504	680	
6	88	176	256	392	504	600		
7	104	224	328	472	584	680		
8	120	256	392	536	680			
9	136	296	456	616				
10	144	328	504	680				
11	176	376	584					
12	208	440	680					

$I_{TBS} = I_{MCS}$

I_{TBS} 11 and 12 只应用于Stand-alone、Guard-band模式

Table 16.4.1.5.2-1: Transport block size (TBS) table for NPDSCH carrying *SystemInformationBlockType1-NB*

$I_{TBS} = \text{schedulingInfoSIB1 in MIB-NB}$

I_{TBS}	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
TBS	208	208	208	328	328	328	440	440	440	680	680	680	Reserved			

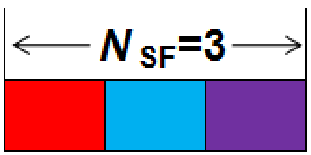
NPDSCH重复传输

Table 16.4.1.3-3: Number of repetitions for NPDSCH carrying *SystemInformationBlockType1-NB*.

Value of *schedulingInfoSIB1*	Number of NPDSCH repetitions
0	4
1	8
2	16
3	4
4	8
5	16
6	4
7	8
8	16
9	4
10	8
11	16
12-15	Reserved

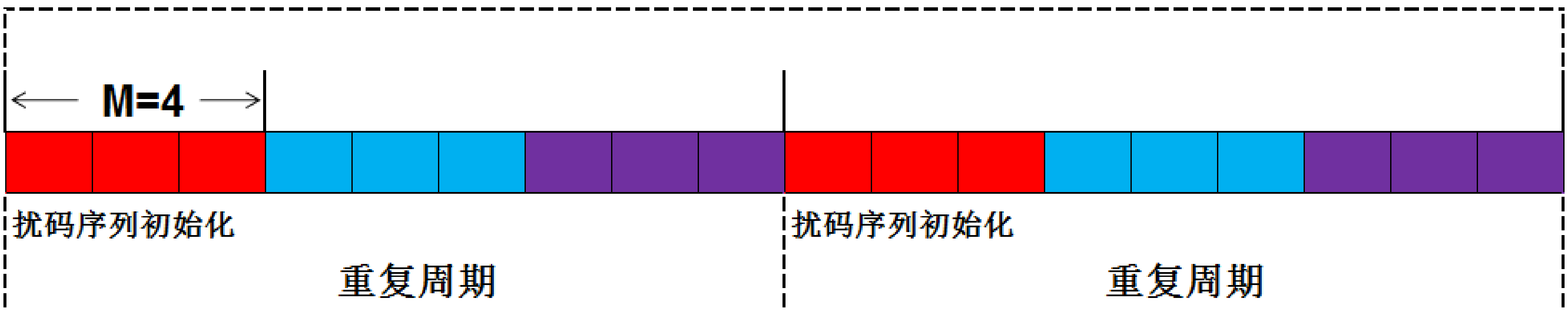
Table 16.4.1.3-2: Number of repetitions (N_{Rep}) for NPDSCH.

I_{Rep}	N_{Rep}
0	1
1	2
2	4
3	8
4	16
5	32
6	64
7	128
8	192
9	256
10	384
11	512
12	768
13	1024
14	1536
15	2048

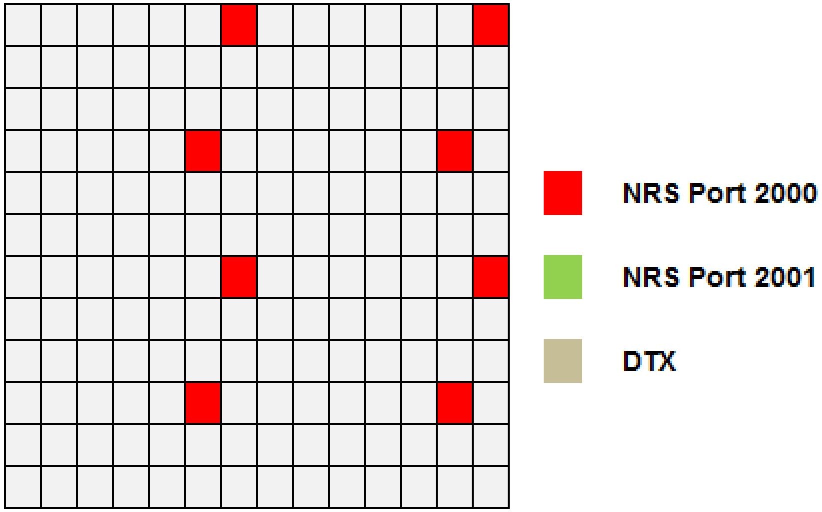


DCI中 “M_{rep}” =8

$$\boxed{M = \min\left(M_{\mathrm{rep}}^{\mathrm{NPDSCH}}, 4\right)}$$



NRS



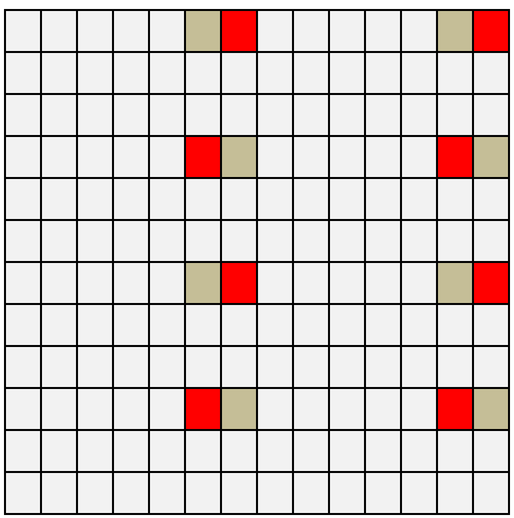
① 天线端口号：2000、2001

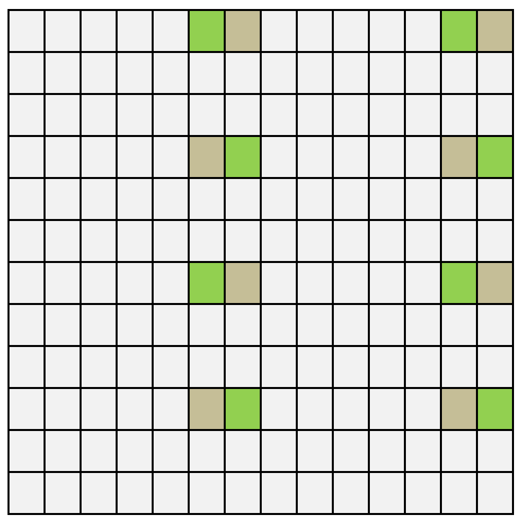
② 发射方式：单天线或2天线发射分集SFBC

③ 作用：信道质量测量或信道估计等

④ 位置：下行有效子帧、NPBCH子帧、SIB1-NB子帧（#4），映射至slot的最后两个OFDM符号

⑤ 序列：重用LTE CRS方式进行序列生成





DL GAP

20dB覆盖提升需求->下行连续重复传输->阻塞其他终端

解决方案：DL GAP

当 $R_{\max} > N_{\text{gap,threshold}}$ 时，则终端处于极端覆盖区域，启动DL GAP延迟传输，否则不执行

$$\left(10n_f + \lfloor n_s/2 \rfloor\right) \bmod N_{\text{gap,period}} = 0$$

$$N_{\text{gap,duration}} = N_{\text{gap,coeff}} N_{\text{gap,period}}$$

NPDCCH-ConfigDedicated-NB information element

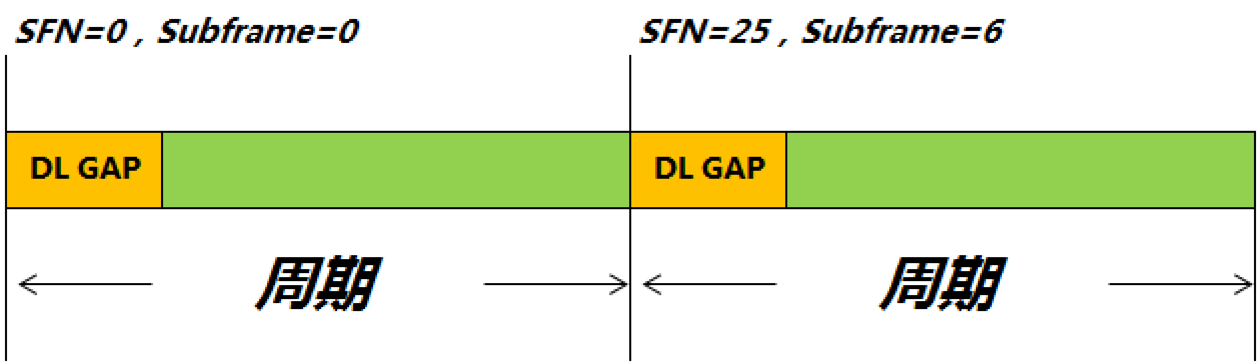
```
-- ASN1START

NPDCCH-ConfigDedicated-NB-r13 ::=   SEQUENCE {
    npdcch-NumRepetitions-r13           ENUMERATED {r1, r2, r4, r8, r16, r32, r64, r128,
                                                    r256, r512, r1024, r2048,
                                                    spare4, spare3, spare2, spare1},
    npdcch-StartSF-USS-r13              ENUMERATED {v1dot5, v2, v4, v8, v16, v32, v48, v64},
    npdcch-Offset-USS-r13               ENUMERATED {zero, oneEighth, oneFourth, threeEighth}
}

-- ASN1STOP
```

NPDCCH-ConfigDedicated-NB field descriptions
npdcch-NumRepetitions Maximum number of repetitions for NPDCCH UE specific search space (USS), see TS 36.213 [23, 16.6]. UE monitors one set of values (consisting of aggregation level, number of repetitions and number of blind decodes) according to the configured maximum number of repetitions.

DL-GapConfig-NB information element

```
-- ASN1START

DL-GapConfig-NB-r13 ::=     SEQUENCE {
    dl-GapThreshold-r13         ENUMERATED {n32, n64, n128, n256},
    dl-GapPeriodicity-r13       ENUMERATED {sf64, sf128, sf256, sf512},
    dl-GapDurationCoeff-r13     ENUMERATED {oneEighth, oneFourth, threeEighth, oneHalf}
}

-- ASN1STOP
```

DL-GapConfig-NB field descriptions
dl-GapDurationCoeff Coefficient to calculate the gap duration of a DL transmission: dl-GapDurationCoeff * dl-GapPeriodicity, Duration in number of subframes. See TS 36.211 [21, 10.2.3.4].
dl-GapPeriodicity Periodicity of a DL transmission gap in number of subframes. See TS 36.211 [21, 10.2.3.4].
dl-GapThreshold Threshold on the maximum number of repetitions configured for NPDCCH before application of DL transmission gap configuration. See TS 36.211 [21, 10.2.3.4].

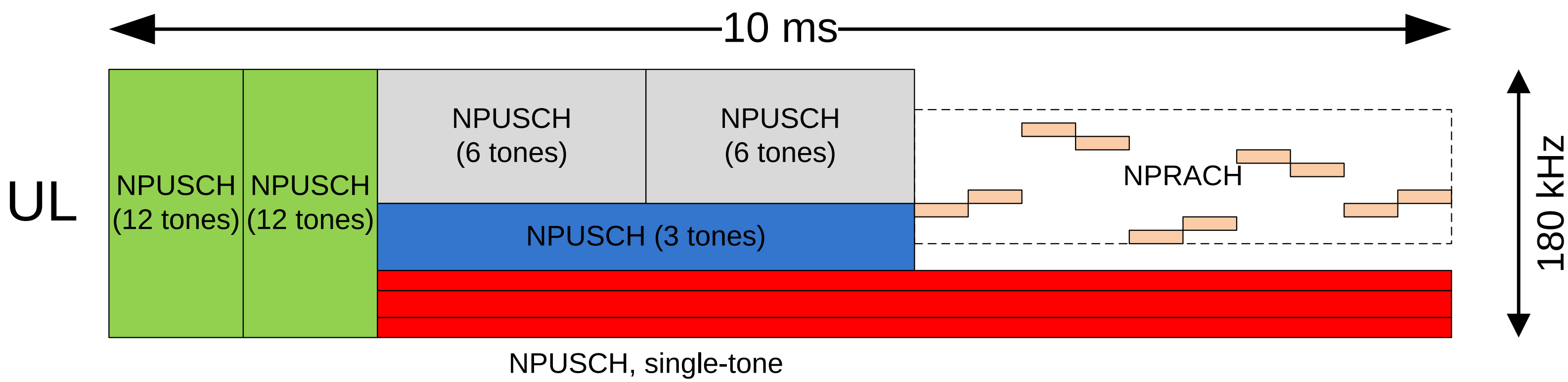


dl-GapPeriodicity-r13=256

dl-GapDurationCoeff-r13=1/4

NOKIA

上行物理信道



- 采用SC-FDMA，单载波带宽为180kHz，支持3.75kHz、15kHz的子载波间隔
- 包含NPRACH、NPUSCH（内含格式1和格式2）、DMRS
- 针对3.75kHz子载波间隔，新定义一个2ms长度的窄带时隙结构
- 引入资源单元（Resource Unit）的概念
- 引入UL GAP的概念
- 不支持PUCCH，ACK/NACK由NPUSCH格式2承载，不再支持CQI、SR上报

上行帧结构

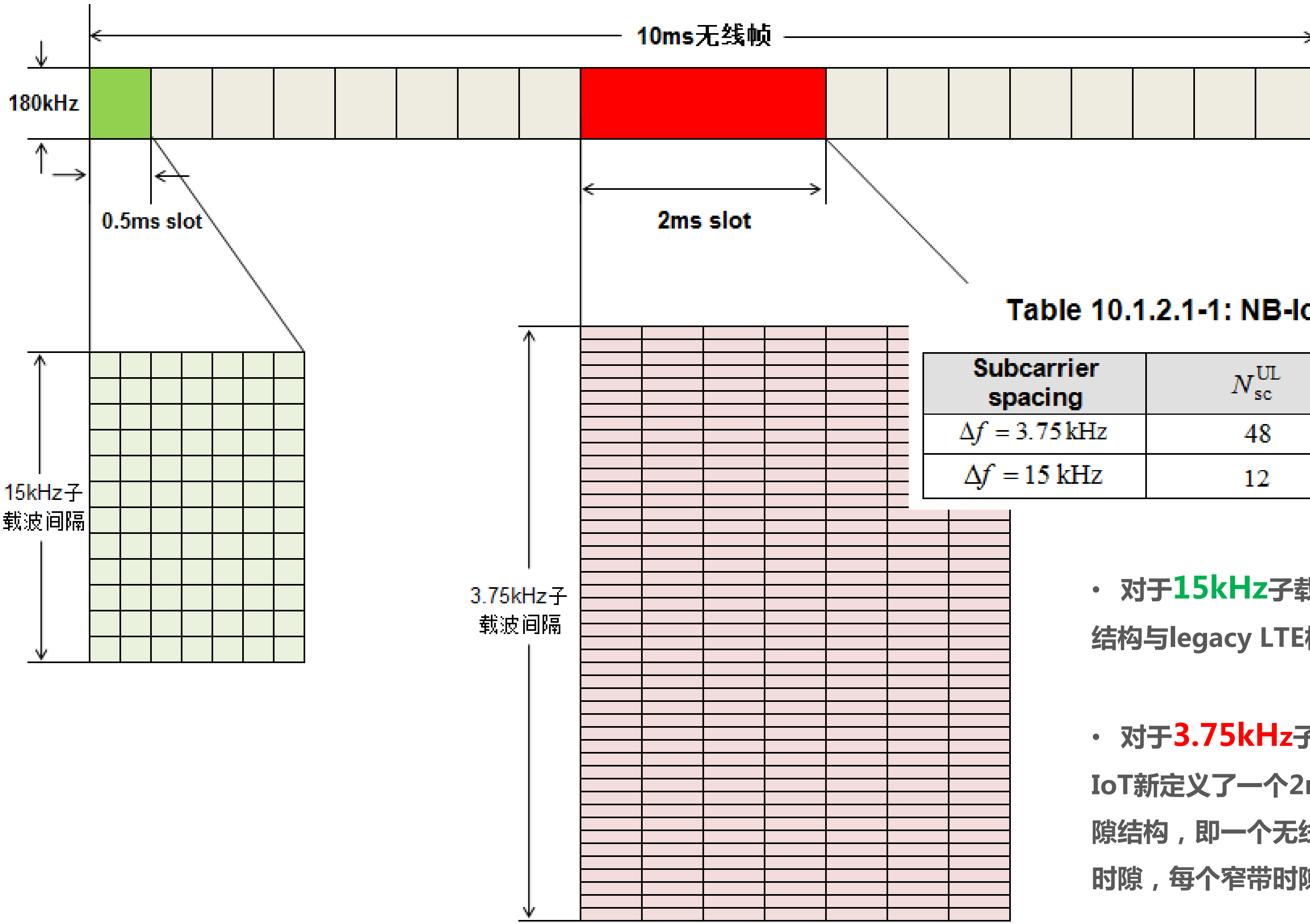


Table 10.1.2.1-1: NB-IoT parameters.

Subcarrier spacing	N_{sc}^{UL}	T_{slot}
$\Delta f = 3.75\,\text{kHz}$	48	$61440 \cdot T_s$
$\Delta f = 15\,\text{kHz}$	12	$15360 \cdot T_s$

- 对于15kHz子载波间隔，上行帧结构与legacy LTE相同
- 对于3.75kHz子载波间隔，NB-IoT新定义了一个2ms长度的窄带时隙结构，即一个无线帧包含5个窄带时隙，每个窄带时隙包含7个符号

RU（Resource Unit）

- 上行数据的调度和上行控制信息的发送是以资源单元（ Resource Unit ）为单位的
- 一个RU，在时域上为 $N_{\mathrm{symb}}^{\mathrm{UL}} N_{\mathrm{slots}}^{\mathrm{UL}}$ 个连续符号，在频域上为 $N_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{RU}}$ 个连续子载波

Table 10.1.2.3-1: Supported combinations of $N_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{RU}}$, $N_{\mathrm{slots}}^{\mathrm{UL}}$, and $N_{\mathrm{symb}}^{\mathrm{UL}}$.

NPUSCH format	Δf	$N_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{RU}}$	$N_{\mathrm{slots}}^{\mathrm{UL}}$	$N_{\mathrm{symb}}^{\mathrm{UL}}$
1	3.75 kHz	1	16	7
	15 kHz	1	16	
		3	8	
		6	4	
		12	2	
2	3.75 kHz	1	4	
	15 kHz	1	4	

NPUSCH

Format 1:

- 用于携带UL-SCH
- 支持2种子载波间隔，3.75kHz和15kHz
- 支持Single-tone和multi-tone发送
- 一个TB可映射至[1，2，3，4，5，6，8，10]个RU上，最大TBS为1000bit
- 使用单HARQ进程，使用异步自适应重传

Format 2:

- 用于携带上行HARQ-ACK信息
- 支持2种子载波间隔，3.75kHz和15kHz
- 仅支持Single-tone发送
- 与Format 1处理过程有两点不同
  - 信道编码采用1/16重复编码
  - 调制方式采用BPSK

处理过程（Format 1）：

1、附加CRC：*负载+24bit校验

2、信道编码：Turbo，支持两种RV版本（RV0、RV1）

3、速率匹配：输出N_{RU}*N_{slots}个时隙承载比特

4、加扰：与LTE类似，但码字的每$M_{identical}$次传输，重置扰码序列

5、调制：当子载波个数为1时，BPSK或QPSK；当子载波个数大于1时，QPSK

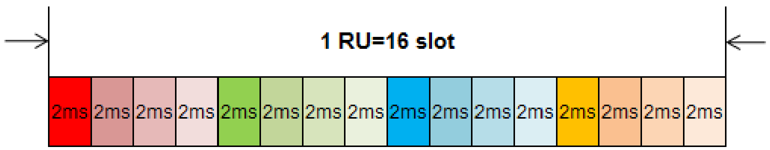
6、资源映射：子载波间隔为3.75kHz，重复传输基于时隙；当子载波间隔为15kHz，重复传输基于子帧

Table 16.5.1.2-2: Transport block size (TBS) table for NPUSCH.

I_{TBS}	I_{RU}							
	0	1	2	3	4	5	6	7
0	16	32	56	88	120	152	208	256
1	24	56	88	144	176	208	256	344
2	32	72	144	176	208	256	328	424
3	40	104	176	208	256	328	440	568
4	56	120	208	256	328	408	552	680
5	72	144	224	328	424	504	680	872
6	88	176	256	392	504	600	808	1000
7	104	224	328	472	584	712	1000	
8	120	256	392	536	680	808		
9	136	296	456	616	776	936		
10	144	328	504	680	872	1000		
11	176	376	584	776	1000			
12	208	440	680	1000				

NPUSCH重复传输

基于时隙的重复传输（适用3.75KHz）



DCI中“M_{rep}”=2

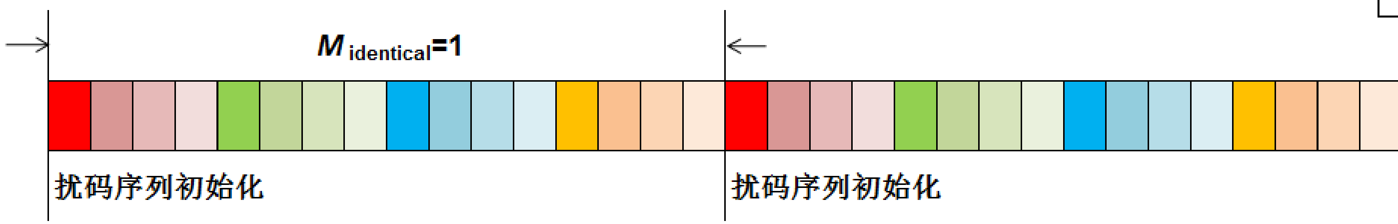


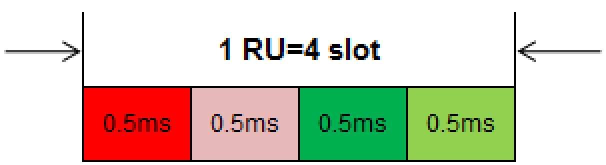
Table 16.5.1.1-3: Number of repetitions (N_{Rep}) for NPUS

I_{Rep}	N_{Rep}
0	1
1	2
2	4
3	8
4	16
5	32
6	64
7	128

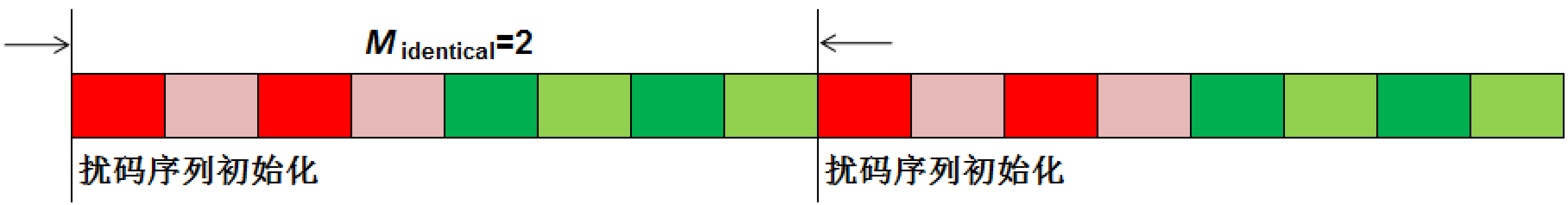
基于子帧的重复传输（适用15KHz）

$$M_{\text{identical}}^{\text{NPUSCH}} = \begin{cases} \min\left(\left\lceil M_{\text{rep}}^{\text{NPUSCH}}/2 \right\rceil, 4\right) & N_{\text{sc}}^{\text{RU}} > 1 \\ 1 & N_{\text{sc}}^{\text{RU}} = 1 \end{cases}$$

$$N_{\text{slots}} = \begin{cases} 1 & \Delta f = 3.75\,\text{kHz} \\ 2 & \Delta f = 15\,\text{kHz} \end{cases}$$



DCI中“M_{rep}”=4



NPRACH

- 采用3.75kHz子载波间隔，Single-tone发送
- 支持两种Preamble Format
  - Format 0：CP长度为66.7us，对应10km的小区覆盖
  - Format 1：CP长度为266.7us，对应35km的小区覆盖

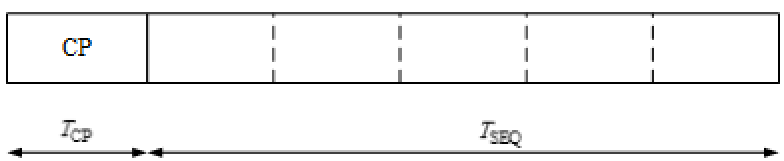


Figure 10.1.6.1-1: Random access symbol group

Format	$T_{CP}+T_{SEQ}$	Symbol Group
0	$43008T_s$	1.4ms
1	$49152T_s$	1.6ms

Table 10.6.1.1-1: Random access preamble parameters

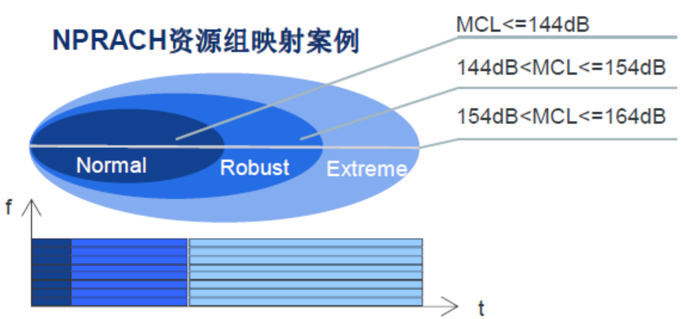
Preamble format	T_{CP}	T_{SEQ}
0	$2048T_s$	$5\cdot 8192T_s$
1	$8192T_s$	$5\cdot 8192T_s$

NPRACH

NPRACH-ConfigSIB-NB information elements

NB-IoT小区中可以定义1~3组NPRACH资源，分别用于不同的UE覆盖级别：（Normal Coverage、Robust Coverage、Extreme Coverage）

- 不同覆盖级别的覆盖门限在SIB2-NB中定义
- 不同覆盖级别对应的NPRACH资源也在SIB2-NB中定义
- 最多可以定义3个NPRACH资源组
- 每个NPRACH资源组中将通过参数定义时域和频域资源

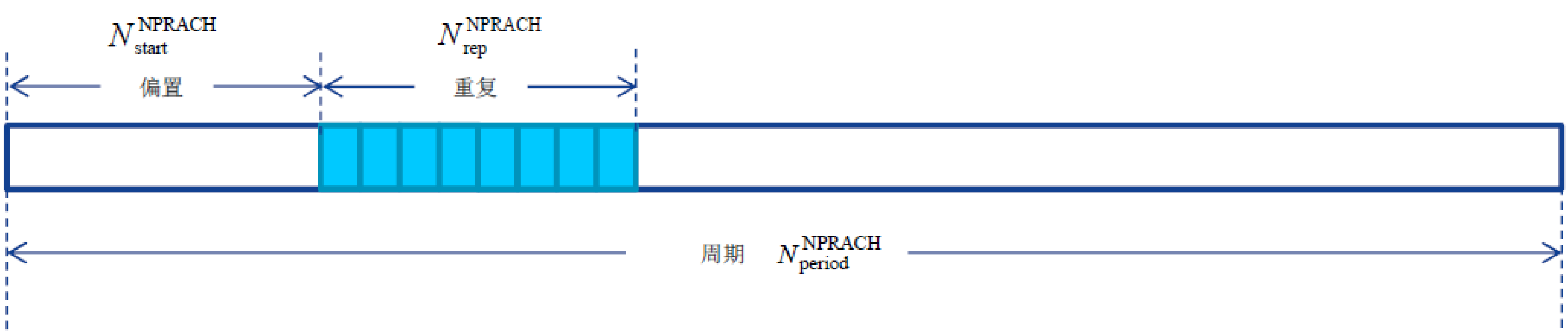



```
-- ASN1START

NPRACH-ConfigSIB-NB-r13 ::=         SEQUENCE {
    nprach-CP-Length-r13                ENUMERATED {us66dot7, us266dot7},
    rsrp-ThresholdsPrachInfoList-r13    RSRP-ThresholdsNPRACH-InfoList-NB-r13   OPTIONAL,    -- need
OP
    nprach-ParametersList-r13       NPRACH-ParametersList-NB-r13
}

NPRACH-ConfigSIB-NB-v1330 ::=       SEQUENCE {
    nprach-ParametersList-v1330         NPRACH-ParametersList-NB-v1330
}

NPRACH-ParametersList-NB-r13 ::=    SEQUENCE (SIZE (1.. maxNPRACH-Resources-NB-r13)) OF NPRACH-
Parameters-NB-r13

NPRACH-ParametersList-NB-v1330 ::=  SEQUENCE (SIZE (1.. maxNPRACH-Resources-NB-r13)) OF NPRACH-
Parameters-NB-v1330

NPRACH-Parameters-NB-r13::=     SEQUENCE {
    nprach-Periodicity-r13                  ENUMERATED {ms40, ms80, ms160, ms240,
                                                ms320, ms640, ms1280, ms2560},
    nprach-StartTime-r13                    ENUMERATED {ms8, ms16, ms32, ms64,
                                                ms128, ms256, ms512, ms1024},
    nprach-SubcarrierOffset-r13             ENUMERATED {n0, n12, n24, n36, n2, n18, n34, spare1},
    nprach-NumSubcarriers-r13               ENUMERATED {n12, n24, n36, n48},
    nprach-SubcarrierMSG3-RangeStart-r13    ENUMERATED {zero, oneThird, twoThird, one},
    maxNumPreambleAttemptCE-r13             ENUMERATED {n3, n4, n5, n6, n7, n8, n10, spare1},
    numRepetitionsPerPreambleAttempt-r13    ENUMERATED {n1, n2, n4, n8, n16, n32, n64, n128},
    npdcch-NumRepetitions-RA-r13            ENUMERATED {r1, r2, r4, r8, r16, r32, r64, r128,
                                                r256, r512, r1024, r2048,
                                                spare4, spare3, spare2, spare1},
    npdcch-StartSF-CSS-RA-r13               ENUMERATED {v1dot5, v2, v4, v8, v16, v32, v48, v64},
    npdcch-Offset-RA-r13                    ENUMERATED {zero, oneEighth, oneFourth, threeEighth}
}

NPRACH-Parameters-NB-v1330 ::=      SEQUENCE {
    nprach-NumCBRA-StartSubcarriers-r13     ENUMERATED {n8, n10, n11, n12, n20, n22, n23, n24,
                                                n32, n34, n35, n36, n40, n44, n46, n48}
}

RSRP-ThresholdsNPRACH-InfoList-NB-r13 ::= SEQUENCE (SIZE(1..2)) OF RSRP-Range

-- ASN1STOP
```

NPRACH

NPRACH时域位置由下面参数决定：

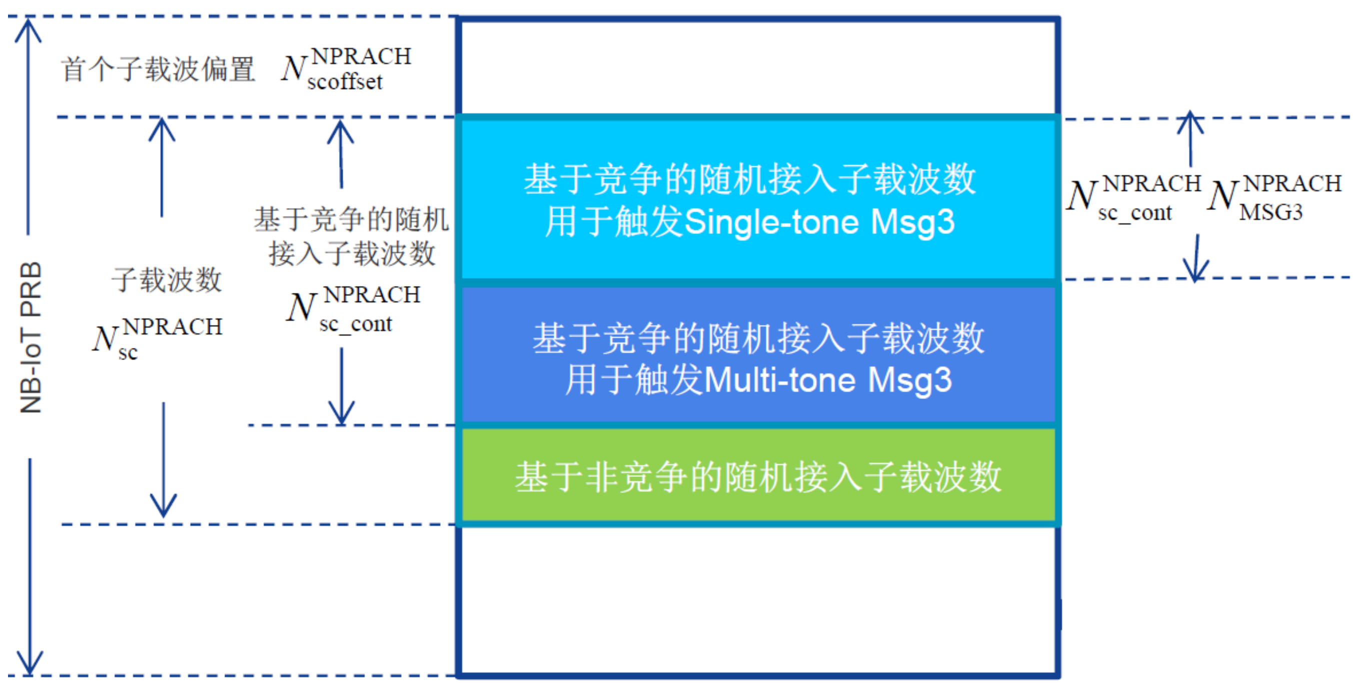
- 周期 $N_{\text{period}}^{\text{NPRACH}}$（*nprach-Periodicity*）（3Bits），取值{ms40, ms80, ms160, ms240, ms320, ms640, ms1280, ms2560}
- 周期中的开始时间 $N_{\text{start}}^{\text{NPRACH}}$（*nprach-StartTime*）（3Bits），取值{ms8, ms16, ms32, ms64, ms128, ms256, ms512, ms1024}
- 重复次数 $N_{\text{rep}}^{\text{NPRACH}}$（*numRepetitionsPerPreambleAttempt*）（3Bits），取值{n1, n2, n4, n8, n16, n32, n64, n128}
- NPRACH传输在满足的 $n_f \bmod \left(N_{\text{period}}^{\text{NPRACH}}/10\right)=0$ 无线帧开始后 $N_{\text{start}}^{\text{NPRACH}}$ ms开始
- 连续发送 $4\cdot 64\left(T_{\text{CP}}+T_{\text{SEQ}}\right)$（即64个重复）以后，必须插入40ms的Gap
- 当重复次数配置为{n32, n64, n128}时，默认不支持Multi-tone Msg3（！规范中没找到）



NPRACH

NPRACH频域位置由下面参数决定：

- 首个子载波的偏置 $N_{\mathrm{scoffset}}^{\mathrm{NPRACH}}$ (*nprach-SubcarrierOffset*)（3Bits），取值{n0, n12, n24, n36, n2, n18, n34, spare1}
- 子载波数 $N_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NPRACH}}$(*nprach-NumSubcarriers*)（2Bits），取值{n12, n24, n36, n48}，$N_{\mathrm{scoffset}}^{\mathrm{NPRACH}} + N_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NPRACH}} \leq 48$
- 这些子载波中，前面的 $N_{\mathrm{sc\_cont}}^{\mathrm{NPRACH}}$（*nprach-NumCBRA-StartSubcarriers*）（4bit）个子载波用于基于竞争的随机接入，取值{n8, n10, n11, n12, n20, n22, n23, n24, n32, n34, n35, n36, n40, n44, n46, n48}
- 在 $N_{\mathrm{sc\_cont}}^{\mathrm{NPRACH}}$ 个用于基于竞争的随机接入的子载波中，前面的 $N_{\mathrm{sc\_cont}}^{\mathrm{NPRACH}} N_{\mathrm{MSG3}}^{\mathrm{NPRACH}}$(*nprach-SubcarrierMSG3-RangeStart*)（2Bits）个子载波用于触发Single-tone Msg3，后面的子载波（如果存在的话）用于触发Multi-tone Msg3。其中 $N_{\mathrm{MSG3}}^{\mathrm{NPRACH}}$ 取值{zero, oneThird, twoThird, one}



NPRACH

Preamble的基本单位为4个Symbol Groups，支持最大128次重复发送

- **第一个1stSymbol Group子载波索引在可用子载波合集中随机选择**
- **其余1stSymbol Group子载波索引由第一个1stSymbol Group子载波索引增加随机跳变量得出**
- **2nd，3rd，4thSymbol Group的子载波索引由1stSymbol Group的子载波索引推导得出**

$$n_{sc}^{RA}(i) = n_{start} + \tilde{n}_{SC}^{RA}(i)$$

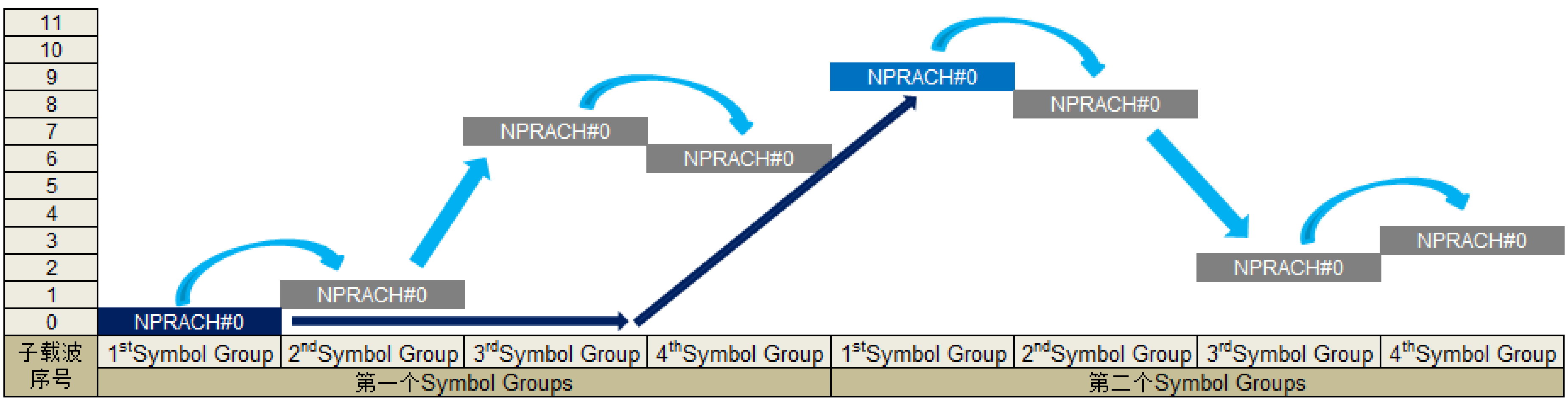
$$n_{start} = N_{scoffset}^{NPRACH} + \left\lfloor n_{init} / N_{sc}^{RA} \right\rfloor \cdot N_{sc}^{RA}$$

$$\tilde{n}_{SC}^{RA}(0) = n_{init} \bmod N_{sc}^{RA}$$

$$n_{init} \text{ selected from } \{0,1,\ldots,N_{sc}^{NPRACH}-1\}$$

$$\tilde{n}_{sc}^{RA}(i) = \begin{cases} \left(\tilde{n}_{sc}^{RA}(0) + f(i/4)\right) \bmod N_{sc}^{RA} & i \bmod 4 = 0 \text{ and } i > 0 \\ \tilde{n}_{sc}^{RA}(i-1)+1 & i \bmod 4 = 1,3 \text{ and } \tilde{n}_{sc}^{RA}(i-1) \bmod 2 = 0 \\ \tilde{n}_{sc}^{RA}(i-1)-1 & i \bmod 4 = 1,3 \text{ and } \tilde{n}_{sc}^{RA}(i-1) \bmod 2 = 1 \\ \tilde{n}_{sc}^{RA}(i-1)+6 & i \bmod 4 = 2 \text{ and } \tilde{n}_{sc}^{RA}(i-1) < 6 \\ \tilde{n}_{sc}^{RA}(i-1)-6 & i \bmod 4 = 2 \text{ and } \tilde{n}_{sc}^{RA}(i-1) \geq 6 \end{cases}$$

$$f(t) = \left(f(t-1) + \left(\sum_{n=10t+1}^{10t+9} c(n) 2^{n-(10t+1)} \right) \bmod \left(N_{sc}^{RA}-1\right) + 1 \right) \bmod N_{sc}^{RA}$$



DMRS

- DMRS插入NPUSCH中，用于NPUSCH的相关解调
- 时域位置：Format1中有1个符号用于DMRS，Format2中3个符号用于DMRS，具体符号位置如右表所示
- 序列填充：遵循先频域再时域原则

Table 10.1.4.2-1: Demodulation reference signal location for NPUSCH.

NPUSCH format	Values for l	
	$\Delta f = 3.75\ \text{kHz}$	$\Delta f = 15\ \text{kHz}$
1	4	3
2	0,1,2	2,3,4

对于single-tone发送：

DMRS序列生成：

$$\bar{r}_u(n) = \frac{1}{\sqrt{2}}(1+j)\big(1-2c(n)\big)w(n \bmod 16), \quad 0 \le n < M_{\text{rep}}^{\text{NPUSCH}} N_{\text{slots}}^{\text{UL}} N_{\text{RU}}$$

对于NPUSCH Format1（组跳频关闭时）、或NPUSCH Format2

$$u = N_{\text{ID}}^{\text{Ncell}} \bmod \boxed{16}$$

对于NPUSCH Format1（组跳频开启时），u 计算方式见后文

其中：

NPUSCH Format1：$r_u(n) = \bar{r}_u(n)$

NPUSCH Format2：$r_u(3n+m) = \overline{w}(m)\bar{r}_u(n), \quad m = 0,1,2$

其中 $\overline{w}(m)$ 由Table 5.5.2.2.1-2定义，其序列索引由伪随机序列生成

$$\left(\sum_{i=0}^{7} c(8n_s+i)2^i\right) \bmod \boxed{3} \qquad c_{\text{init}} = N_{\text{ID}}^{\text{Ncell}}$$

Table 10.1.4.1.1-1: Definition of $w(n)$

u	$w(0),\ldots,w(15)$															
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
2	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
3	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
4	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1
5	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
6	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
7	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
9	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1
10	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1
11	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1
12	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1
13	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1
14	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1
15	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1

Table 5.5.2.2.1-2: Orthogonal sequences $\left[\overline{w}^{(\tilde{p})}(0)\ \Lambda\ \overline{w}^{(\tilde{p})}(N_{\text{RS}}^{\text{PUCCH}}-1)\right]$ for PUCCH formats 1, 1a 1b

Sequence index $\overline{n}_{\text{oc}}^{(\tilde{p})}(n_s)$	Normal cyclic prefix	Extended cyclic prefix
0	$[1\ \ 1\ \ 1]$	$[1\ \ 1]$
1	$[1\ \ e^{j2\pi/3}\ \ e^{j4\pi/3}]$	$[1\ \ -1]$
2	$[1\ \ e^{j4\pi/3}\ \ e^{j2\pi/3}]$	N/A

DMRS

对于multi-tone发送：

DMRS序列生成：

$$r_u(n)=e^{j\alpha n}e^{j\phi(n)\pi/4},\quad 0\le n<N_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{RU}}$$

当组跳频关闭：

u 可由高层配置

$N_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{RU}}=3$ 时：threeTone-BaseSequence

$N_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{RU}}=6$ 时：sixTone-BaseSequence

$N_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{RU}}=12$时：twelveTone-BaseSequence

如未配置，则由PCI计算得出

$$u=\begin{cases} N_{\mathrm{ID}}^{\mathrm{Ncell}} \bmod \boxed{12} & \text{for } N_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{RU}}=3 \\ N_{\mathrm{ID}}^{\mathrm{Ncell}} \bmod \boxed{14} & \text{for } N_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{RU}}=6 \\ N_{\mathrm{ID}}^{\mathrm{Ncell}} \bmod \boxed{30} & \text{for } N_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{RU}}=12 \end{cases}$$

当组跳频开启，u 计算方式见后文

其中：

当 $N_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{RU}}=3$ 时，$\varphi(n)$ 由Table 10.1.4.1.2-1给出

当 $N_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{RU}}=6$ 时，$\varphi(n)$ 由Table 10.1.4.1.2-2给出

当 $N_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{RU}}=12$时，$\varphi(n)$ 由Table 5.5.1.2-1给出

当 $N_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{RU}}=3$ 时，α 由Table 10.1.4.1.2-3给出，threeTone-CyclicShift由高层配置

当 $N_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{RU}}=6$ 时，α 由Table 10.1.4.1.2-3给出，sixTone-CyclicShift由高层配置

当 $N_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{RU}}=12$时，$\alpha$ 固定为0

Table 10.1.4.1.2-1: Definition of $\varphi(n)$ for $N_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{RU}}=3$

u	$\varphi(0),\varphi(1),\varphi(2)$		
0	1	-3	-3
1	1	-3	-1
2	1	-3	3
3	1	-1	-1
4	1	-1	1
5	1	-1	3
6	1	1	-3
7	1	1	-1
8	1	1	3
9	1	3	-1
10	1	3	1
11	1	3	3

Table 5.5.1.2-1: Definition of $\varphi(n)$ for $M_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{RS}}=N_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{RB}}$.

u	$\varphi(0),\dots,\varphi(11)$											
0	-1	1	3	-3	3	3	1	1	3	1	-3	3
1	1	1	3	3	3	-1	1	-3	-3	1	-3	3
2	1	1	-3	-3	-3	-1	-3	-3	1	-3	1	-1
3	-1	1	1	1	1	-1	-3	-3	1	-3	3	-1
4	-1	3	1	-1	1	-1	-3	-1	1	-1	1	3
5	1	-3	3	-1	-1	1	1	-1	-1	3	-3	1
6	-1	3	-3	-3	-3	3	1	-1	3	3	-3	1
7	-3	-1	-1	-1	1	-3	3	-1	1	-3	3	1
8	1	-3	3	1	-1	-1	-1	1	1	3	-1	1
9	1	-3	-1	3	3	-1	-3	1	1	1	1	1
10	-1	3	-1	1	1	-3	-3	-1	-3	-3	3	-1
11	3	1	-1	-1	3	3	-3	1	3	1	3	3
12	1	-3	1	1	-3	1	1	1	-3	-3	-3	1
13	3	3	-3	3	-3	1	1	3	-1	-3	3	3
14	-3	1	-1	-3	-1	3	1	3	3	3	-1	1
15	3	-1	1	-3	-1	-1	1	1	3	1	-1	-3
16	1	3	1	-1	1	3	3	3	-1	-1	3	-1
17	-3	1	1	3	-3	3	-3	-3	3	1	3	-1
18	-3	3	1	1	-3	1	-3	-3	-1	-1	1	-3
19	-1	3	1	3	1	-1	-1	3	-3	-1	-3	-1
20	-1	-3	1	1	1	1	3	1	-1	1	-3	-1
21	-1	3	-1	1	-3	-3	-3	-3	-3	1	-1	-3
22	1	1	-3	-3	-3	-3	-1	3	-3	1	-3	3
23	1	1	-1	-3	-1	-3	1	-1	1	3	-1	1
24	1	1	3	1	3	3	-1	1	-1	-3	-3	1
25	1	-3	3	3	1	3	3	1	-3	-1	-1	3
26	1	3	-3	-3	3	-3	1	-1	-1	3	-1	-3
27	-3	-1	-3	-1	-3	3	1	-1	1	3	-3	-3
28	-1	3	-3	3	-1	3	3	-3	3	3	-1	-1
29	3	-3	-3	-1	-1	-3	-1	3	-3	3	1	-1

Table 10.1.4.1.2-2: Definition of $\varphi(n)$ for $N_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{RU}}=6$

u	$\varphi(0),\dots,\varphi(5)$					
0	1	1	1	1	3	-3
1	1	1	3	1	-3	3
2	1	-1	-1	-1	1	-3
3	1	-1	3	-3	-1	-1
4	1	3	1	-1	-1	3
5	1	-3	-3	1	3	1
6	-1	-1	1	-3	-3	-1
7	-1	-1	-1	3	-3	-1
8	3	-1	1	-3	-3	3
9	3	-1	3	-3	-1	1
10	3	-3	3	-1	3	3
11	-3	1	3	1	-3	-1
12	-3	1	-3	3	-3	-1
13	-3	3	-3	1	1	-3

Table 10.1.4.1.2-3: Definition of α

$N_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{RU}}=3$		$N_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{RU}}=6$	
threeTone-CyclicShift	α	*sixTone-CyclicShift*	α
0	0	0	0
1	$2\pi/3$	1	$2\pi/6$
2	$4\pi/3$	2	$4\pi/6$
		3	$8\pi/6$

DMRS

序列组跳频：

组跳频是否开启由高层参数groupHoppingEnabled（小区级）和groupHoppingDisabled（用户级）确定

对于NPUSCH Format1，当组跳频开启时，u 计算方式为

$$u = \left(f_{\mathrm{gh}}(n_s) + f_{\mathrm{ss}}\right) \bmod N_{\mathrm{seq}}^{\mathrm{RU}}$$

$$f_{\mathrm{gh}}(n_s) = \left(\sum_{i=0}^{7} c(8n_s' + i)\cdot 2^i\right) \bmod N_{\mathrm{seq}}^{\mathrm{RU}}$$

$$f_{\mathrm{ss}} = \left(N_{\mathrm{ID}}^{\mathrm{Ncell}} + \Delta_{\mathrm{ss}}\right) \bmod N_{\mathrm{seq}}^{\mathrm{RU}}$$

其中

$N_{\mathrm{seq}}^{\mathrm{RU}}$ 由Table 10.1.4.1.3-1给出

$\Delta_{\mathrm{ss}} \in \{0,1,\ldots,29\}$ 由高层参数groupAssignmentNPUSCH确定

Table 10.1.4.1.3-1: Definition of $N_{\mathrm{seq}}^{\mathrm{RU}}$

$N_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{RU}}$	$N_{\mathrm{seq}}^{\mathrm{RU}}$
1	16
3	12
6	14
12	30

***NPUSCH-Config-NB* information element**

```
-- ASN1START

NPUSCH-ConfigCommon-NB-r13 ::=      SEQUENCE {
    ack-NACK-NumRepetitions-Msg4-r13    SEQUENCE (SIZE(1.. maxNPRACH-Resources-NB-r13)) OF
                                            ACK-NACK-NumRepetitions-NB-r13,
    srs-SubframeConfig-r13              ENUMERATED {
                                            sc0, sc1, sc2, sc3, sc4, sc5, sc6, sc7,
                                            sc8, sc9, sc10, sc11, sc12, sc13, sc14, sc15
                                        }                                   OPTIONAL,   -- Need OR
    dmrs-Config-r13                     SEQUENCE {
        threeTone-BaseSequence-r13          INTEGER (0..12)                 OPTIONAL,   -- Need OP
        threeTone-CyclicShift-r13           INTEGER (0..2),
        sixTone-BaseSequence-r13            INTEGER (0..14)                 OPTIONAL,   -- Need OP
        sixTone-CyclicShift-r13             INTEGER (0..3),
        twelveTone-BaseSequence-r13         INTEGER (0..30)                 OPTIONAL    -- Need OP
    }       OPTIONAL,   -- Need OR
    ul-ReferenceSignalsNPUSCH-r13       UL-ReferenceSignalsNPUSCH-NB-r13
}

UL-ReferenceSignalsNPUSCH-NB-r13 ::=    SEQUENCE {
    groupHoppingEnabled-r13                 BOOLEAN,
    groupAssignmentNPUSCH-r13               INTEGER (0..29)
}

NPUSCH-ConfigDedicated-NB-r13 ::=   SEQUENCE {
    ack-NACK-NumRepetitions-r13         ACK-NACK-NumRepetitions-NB-r13  OPTIONAL,   -- Need ON
    npusch-AllSymbols-r13               BOOLEAN                         OPTIONAL,   -- Cond SRS
    groupHoppingDisabled-r13            ENUMERATED {true}               OPTIONAL    -- Need OR
}

ACK-NACK-NumRepetitions-NB-r13  ::= ENUMERATED {r1, r2, r4, r8, r16, r32, r64, r128}

-- ASN1STOP
```

UL GAP

终端功放的热耗散->发射机温度变化->晶振频率偏移

解决方案：引入UL GAP，切换至下行链路，利用NPSS、NSSS、NRS进行频偏补偿

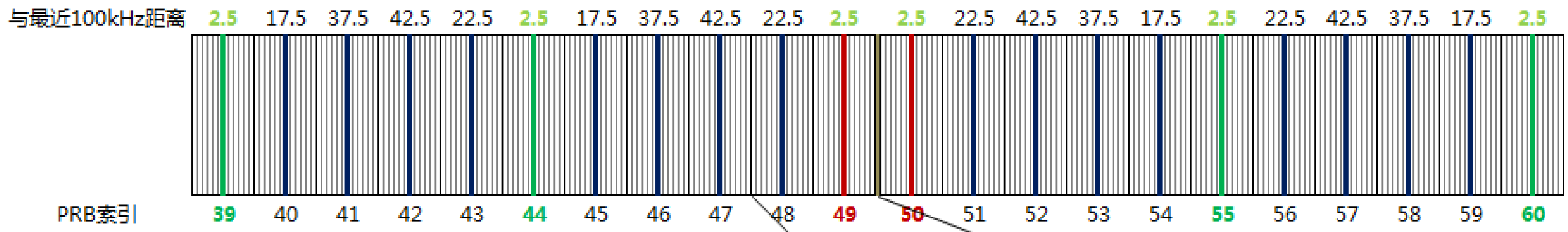
- NPUSCH信道：256ms的数据传输后，插入UL GAP（40ms），剩余数据顺延
- NPRACH信道：64次Preamble重复发送后，插入UL GAP （40ms），剩余Preamble重复顺延

工作频段

Table 5.5-1 E-UTRA operating bands

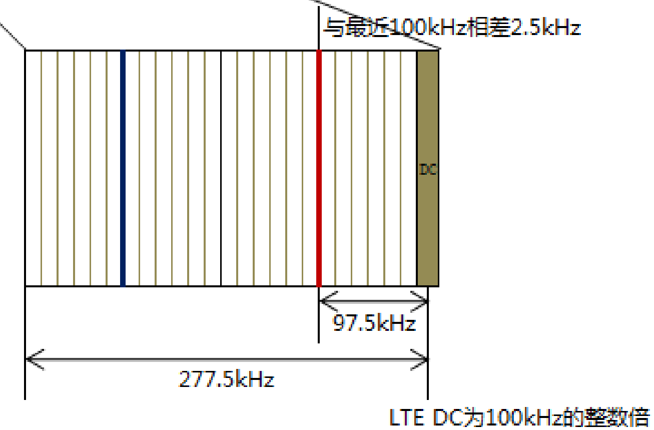
E-UTRA Operating Band	Uplink (UL) operating band BS receive UE transmit			Downlink (DL) operating band BS transmit UE receive			Duplex Mode
	F_{UL_low}	–	F_{UL_high}	F_{DL_low}	–	F_{DL_high}	
1	1920 MHz	–	1980 MHz	2110 MHz	–	2170 MHz	FDD
2	1850 MHz	–	1910 MHz	1930 MHz	–	1990 MHz	FDD
3	1710 MHz	–	1785 MHz	1805 MHz	–	1880 MHz	FDD
5	824 MHz	–	849 MHz	869 MHz	–	894MHz	FDD
8	880 MHz	–	915 MHz	925 MHz	–	960 MHz	FDD
12	699 MHz	–	716 MHz	729 MHz	–	746 MHz	FDD
13	777 MHz	–	787 MHz	746 MHz	–	756 MHz	FDD
17	704 MHz	–	716 MHz	734 MHz	–	746 MHz	FDD
18	815 MHz	–	830 MHz	860 MHz	–	875 MHz	FDD
19	830 MHz	–	845 MHz	875 MHz	–	890 MHz	FDD
20	832 MHz	–	862 MHz	791 MHz	–	821 MHz	FDD
26	814 MHz	–	849 MHz	859 MHz	–	894 MHz	FDD
28	703 MHz	–	748 MHz	758 MHz	–	803 MHz	FDD
66	1710 MHz	–	1780 MHz	2110 MHz	–	2200 MHz	FDD[4]

中心频点



NB-IoT载波的中心频点原则：

- 中心频点在一个PRB的第6个子载波和第7个子载波的最中间
- 载波应与LTE PRB对齐，不占用LTE最中心6个PRB，中心频率与最近的100kHz整数倍偏移为小于等于7.5KHz（In-band ）
- 子载波应与LTE 子载波正交，中心频率与最近的100kHz整数倍偏移为小于等于7.5KHz（Guard-band）
- 中心频率满足100kHz的整数倍，无频率偏移（Stand-alone）



In-band模式下可选择PRB位置

LTE system bandwidth	3MHz	5MHz	10MHz	15MHz	20MHz
PRB indices with 2.5kHz offset	/	/	4, 9, 14, 19, 30, 35, 40, 45	/	4, 9, 14, 19, 24, 29, 34, 39, 44, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95
PRB indices with 7.5 kHz offset	2, 12	2, 7, 17, 22	/	2, 7, 12, 17, 22, 27, 32, 42, 47, 52, 57, 62, 67, 72	/

Guard-band模式下可选择中心频率位置

LTE system bandwidth	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Edge frequency of LTE transmission (kHz)	±2257.5	±4507.5	±6757.5	±9007.5
NB-IoT carrier centre frequency closest to 100kHz channel raster (kHz)	±2392.5	± 4597.5/4702.5 /4807.5/4897.5	± 6892.5/6997.5/7102.5/7207.5/7297.5/7402.5	± 9097.5/9202.5/9307.5/9397.5/9502.5/9607.5/9697.5/9802.5/9907.5
Frequency offset from the 100 kHz channel raster (kHz)	7.5	2.5/-2.5/-7.5/2.5	7.5/2.5/-2.5/-7.5 /2.5/7.5	2.5/-2.5/-7.5/2.5 /-2.5/-7.5/2.5/-2.5/-7.5/2.5

课后作业（10分）

1、请画出15M带宽、In-band模式下可选择PRB示意图（5分）

2、请画出10M带宽、 Guard-band模式下可选择中心频率示意图（5分）