

# NB-IoT 系统物理随机接入信道设计

## Physical Random Access Channel Design for NB-IoT

刘锬/LIU Kun

戴博/DAI Bo

杨维维/YANG Weiwei

(中兴通讯股份有限公司, 广东 深圳 518057)  
(ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

随着通信以及互联网技术的不断发展,移动通信正在从人到人(H2H)向人到机器(H2M)以及机器到机器(M2M)通信的方向转变,万物互联成为移动通信发展的必然趋势。以车联网、智慧城市、智慧医疗、智能家居等为代表的物联网应用将产生海量连接,为了实现这一切则需要有一个无处不在的网络,运营商网络是全球覆盖最为广泛的网络,在接入能力上有独特的优势,但是考虑到物联网产生的连接数量远远超过H2H通信需求,当前的4G网络在连接能力上明显不足,因此有必要根据物联网业务特征和移动通信网络特点,研究以适应蓬勃发展的物联网业务需求的接入系统。业界上有许多物联网的技术以及相关标准被不断提出<sup>[1-3]</sup>,窄带物联网(NB-IoT)<sup>[4]</sup>是物联网领域一个新兴的技术,占用了200 kHz带宽,且具备四大特点:广覆盖,将提供改进的室内覆盖,在同样的频段下,NB-IoT比现有的网络增益20 dB;具备支持海量连接的能力,支持低延时敏感度和优化的网络架构;

收稿时间: 2016-11-15  
网络出版时间: 2016-12-28

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2017) 01-0006-004

**摘要:** 提出了两种用于窄带物联网(NB-IoT)终端接入网络的物理随机接入信道(PRACH)的设计方案,包括多子载波PRACH方案和单子载波PRACH方案。多子载波PRACH方案遵循长期演进(LTE)PRACH的设计原理,在PRACH带宽、子载波间隔以及Zadoff-Chu(ZC)序列的选取方面进行了重新设计,用以满足NB-IoT系统随机接入的需求;单子载波PRACH方案将终端全部功率集中在一个子载波上,可以提供更高的功率谱密度,更适合恶劣的无线信道环境下终端接入需求。从单子载波PRACH检测性能着手,结合仿真验证,给出满足NB-IoT系统随机接入的需求的单子载波PRACH设计方案。

**关键词:** NB-IoT; PRACH; 单子载波; 多子载波

**Abstract:** Two kinds of narrowband Internet of things (NB-IoT) physical random access channel (PRACH) design schemes are proposed in this paper, including multi-tone PRACH and single-tone PRACH. Multi-tone PRACH scheme follows long term evolution (LTE) PRACH design principle, and PRACH bandwidth, subcarrier spacing and the selection of Zadoff-Chu (ZC) sequence are redesigned to meet the requirements of random access in NB-IoT system. Single-tone PRACH with Tx power concentrated in a single subcarrier can provide higher power spectral density and is more suitable for terminal in harsh wireless channel environment. In this paper, a single-tone PRACH design scheme which is meet the requirements of random access in NB-IoT system is given based on the analysis and simulation verification of PRACH detection performance.

**Key words:** NB-IoT; PRACH; single-tone; multi-tone

更低功耗,NB-IoT终端使用AA电池便待机时间可长达10年;更低的模块成本。

针对NB-IoT系统,为了能够支持广覆盖以及海量连接能力,接入信道的设计则显得尤为重要。物理随机接入信道(PRACH)<sup>[5]</sup>是4G长期演进(LTE)网络承担终端接入系统的重要信道,用于宽带无线系统的终端接入需求,因此无法直接用于NB-IoT系统。文章中,我们结合NB-IoT系统的特点,提出了两种用于NB-IoT终端接入网络的随机接入信道的设计方案,包括多子载波PRACH方案

以及单子载波PRACH方案,可以有效地支持NB-IoT系统内终端的接入需求。

### 1 多子载波 PRACH 方案

多子载波PRACH方案以LTE PRACH结构作为设计基础,在频域上配置一段频带作为前导带宽,时域上由循环前缀(CP)、前导序列以及保护时间(GT)组成,其中前导序列可以根据需求重复多次发送。

考虑到NB-IoT系统的应用场景主要是低速移动或静止的,我们选取LTE系统中适用中低速度场景的

PRACH 前导作为 NB-IoT 多子载波 PRACH 的设计基础。前导序列使用的 Zadoff-Chu (ZC) 序列<sup>[6-7]</sup>  $x_{u,v}(n)$  按照式(1)生成:

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

其中,

•  $x_u(n)$  为 ZC 根序列,按照式(2)生成, $u$  是根序列的索引,  $N_{ZC}$  是 ZC 序列的长度

$$x_u(n) = e^{-j\frac{\pi u n(n+1)}{N_{ZC}}}, \quad 0 \leq n \leq N_{ZC} - 1 \quad (2)$$

$$C_v = \begin{cases} vN_{CS} & v=0,1,\dots, \lfloor N_{ZC}/N_{CS} \rfloor - 1, N_{CS} \neq 0 \\ 0 & N_{CS} = 0 \end{cases}$$

其中,  $N_{ZC}$  是 ZC 序列的长度,  $N_{CS}$  即为循环移位的大小。

PRACH 前导时域信号生成及检测流程如图 1 所示,其中,  $y_{u,v}(n)$  可以理解为  $x_{u,v}(n)$  的一条循环移位序列,  $y_{u,v}(n) = x_{u,v}(n - \tau)$ 。由于 ZC 序列属于恒包络零自相关(CAZAC)序列<sup>[6]</sup>,所以  $x_{u,v}(n)$  与  $y_{u,v}(n)$  满足式(3):

$$\text{Corr}(x_{u,v}(n), y_{u,v}(n)) = 0 \quad (3)$$

式(3)为计算  $x_{u,v}(n)$  与  $y_{u,v}(n)$  之间的互相关值,且满足  $\text{Corr}(x_{u,v}(n), y_{u,v}(n)) = 0$  的  $\tau$  最小取值为 1,即只要  $x_{u,v}(n)$  与  $y_{u,v}(n)$  不同,就会满足  $\text{Corr}(x_{u,v}(n), y_{u,v}(n)) = 0$ 。

但是考虑到  $x_{u,v}(n)$  在转换到  $\tilde{x}(t)$  时,等同于经过了  $N_2/N_{ZC}$  倍的过采样操作,接收端在恢复  $y_{u,v}(n)$  时,同样需要经过  $N_2/N_{ZC}$  倍的降采样操作,这样就会导致并不是任意的往返时延(RTD)都会使得  $\text{Corr}(x_{u,v}(n), y_{u,v}(n)) = 0$ ,满足  $\text{Corr}(x_{u,v}(n), y_{u,v}(n)) = 0$  的最小 RTD 为  $1/\Delta f_{RA} N_{ZC}$ ,其中,  $\Delta f_{RA}$  为 PRACH 子载波间隔。

因此,为了提高基站检测出  $y_{u,v}(n)$  的精准度,  $1/\Delta f_{RA} N_{ZC}$  取值越小越好,并且由于  $\Delta f_{RA} N_{ZC}$  近似等于 PRACH 信道带宽,也就是说 PRACH 信道配置的带宽越大,基站的前导检测精准度越高。NB-IoT 系统带宽为 180 kHz,则  $\Delta f_{RA} N_{ZC}$  最大配置也就是 180 kHz。因此,针对多子载波

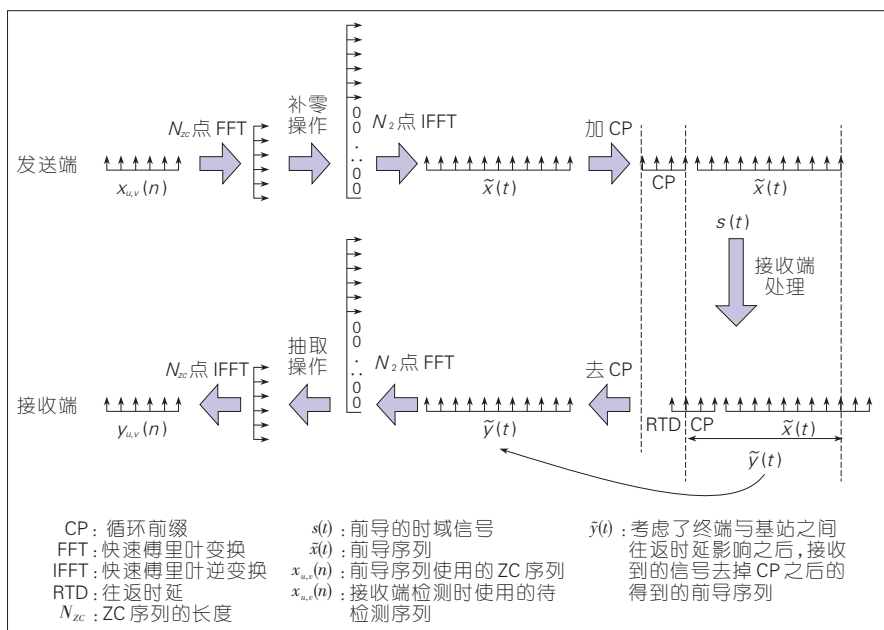
PRACH,我们给出 180 kHz 带宽的 PRACH 设计方案。

图 2 中为多子载波 PRACH 的频域结构示意图,PRACH 频域总共占用了 180 kHz 带宽,子载波之间的间隔为 1 250 Hz,前导序列基于 ZC 序列生成,ZC 序列长度为 139,PRACH 频域带宽的前后分别预留 3.75 kHz 和 2.5 kHz 的保护带宽。

由于下行频偏估计的偏差以及多普勒频移等造成前导发送时的实际频率会与配置的频率产生一定的

偏差,导致前导发送时出现相位旋转的问题。当前导发送时间过长,相位旋转会变得很大,进而接收端相干检测时会产生大量的误检,影响前导的检测精准度。以频率偏差  $\pm 50$  Hz, 50 Hz] 为例,经过仿真评估,为了保证前导的检测性能,前导的时域长度不要超过 4 ms。

按照上述分析,前导的时域结构如图 3 所示。其中,CP 和 GT 的长度为 0.3 ms,可以支持 45 km 的小区覆盖;前导序列长度为 0.8 ms,并且重



▲ 图 1 PRACH 前导生成及检测流程

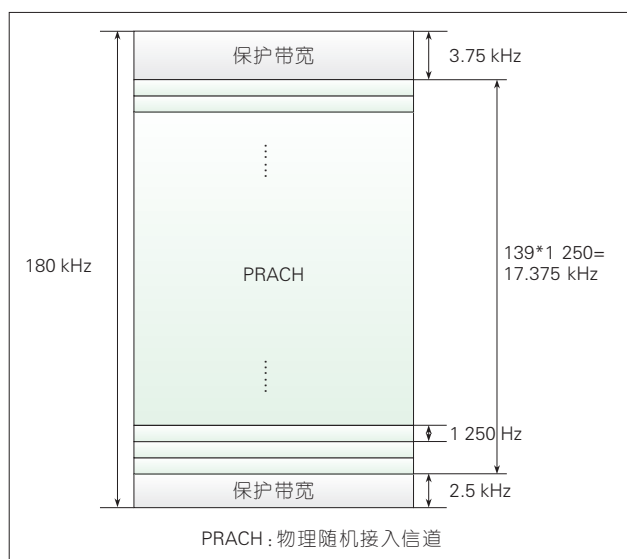
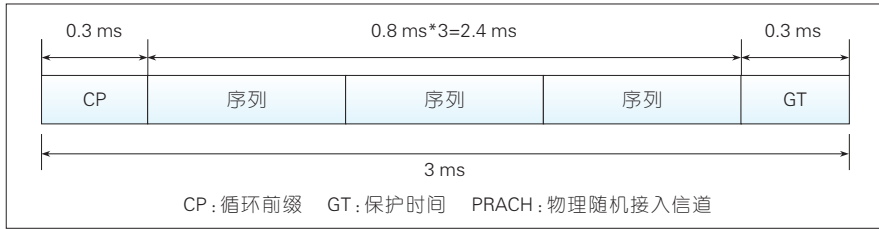


图 2 多子载波 PRACH 频域结构示意图



▲图3 多子载波 PRACH 时域结构示意图

复3次发送。

前导误检概率和正确检测概率如表1所示,具体仿真配置参考文献[8]。其中仿真配置中最小耦合损耗(MCL)为144 dB,对应NB-IoT系统非覆盖增强需求的最大MCL取值。

考虑到NB-IoT需要提供更广的覆盖以及更优的室内覆盖性能,因此前导如需要在更恶劣的无线信道环境下工作,则前导的检测性能需要进一步的提升。例如,在前导的基础上支持多次重复发送实现前导检测性能的提升。

## 2 单子载波 PRACH 方案

相比于多子载波 PRACH 方案,单子载波 PRACH 方案<sup>[10-13]</sup>频域上仅占用1个子载波,终端可以将全部功率集中在这个子载波上,可以提供更高的功率谱密度,更适合恶劣的无线信道环境下终端接入需求。本节中,我们给出了两种单子载波 PRACH 设计方案。

### 2.1 第1种前导结构

由于单子载波 PRACH 的频率上只支持1个子载波,那么前导序列只能在时域上设计,例如,前导序列为长度为 $N$ 的ZC序列 $x(n)$ ,且将 $x(n)$ 配置在时域上连续 $N$ 个正交频分复用(OFDM)符号上发送。

前导设计时需要遵循以下原则:

(1)同多子载波 PRACH 的分析一样,单子载波 PRACH 同样也需要考虑频率偏差造成的相位旋转对前导性能检测的影响,因此前导时域长度不建议超过4 ms。

(2)由于单子载波 PRACH 的频

率带宽非常小,仅为1个子载波间隔,频率上容易受到频率选择性衰落的影响,造成前导检测性能下降。因此,前导发送时需要支持频率跳频,获得理想的频率分级增益,进而抑制频率选择性衰落的影响。

(3)PRACH 子载波间隔在允许的范围需要尽量大一些,这样可以保证在相同的时域周期内序列 $x(n)$ 的长度更长,可以获得更好的自相关性和更低的互相关性。

基于上述原则,我们给出前导的具体结构,如图4所示,前导长度为4 ms,子载波间隔为15 kHz,OFDM符号长度为66.7  $\mu$ s。前导序列由2个符号组组成:1个符号组包括长度为4个OFDM符号的CP以及长度为23的ZC序列,另1个符号组配置的子

载波间隔150 kHz,GT长度是4个OFDM符号。

前导误检概率和正确检测概率如表2所示,其中,具体仿真配置见参考文献[11],仿真中配置的MCL=144 dB,对应NB-IoT非覆盖增强需求的最大MCL取值。

考虑到NB-IoT需要支持更广的覆盖以及改进室内覆盖性能的需求,因此前导需要能够在更恶劣的无线信道环境(例如MCL大于144 dB)中工作,前导的检测性能需要更进一步的提升,例如通过支持多次重复发送实现前导检测性能的提升。

前导结构可以支持前导的码分复用,进而提升PRACH信道容量。但是由于频域上不同的PRACH信道之间不能保证正交性,因此需要配置保护带宽用来抑制PRACH信道之间的干扰。由于单子载波PRACH的有效带宽仅为1个子载波,保护带宽相比于PRACH有效带宽开销过大,会对PRACH信道容量会有影响。

### 2.2 第2种前导结构

由于第1种前导结构需要配置保

▼表1 各子载波 PRACH 前导误检概率和正确检测概率统计结果

| 重复次数 | SNR /dB | MCL/dB | 误检概率     | 正确检测概率 |
|------|---------|--------|----------|--------|
| 1    | 0.4     | 144    | 8/10 000 | 98.9%  |

注:TA正确检测范围是[-2.08  $\mu$ s, +2.08  $\mu$ s]<sup>[9]</sup>  
MCL:最小耦合损耗 PRACH:物理随机接入信道 SNR:信噪比 TA:定时提前量

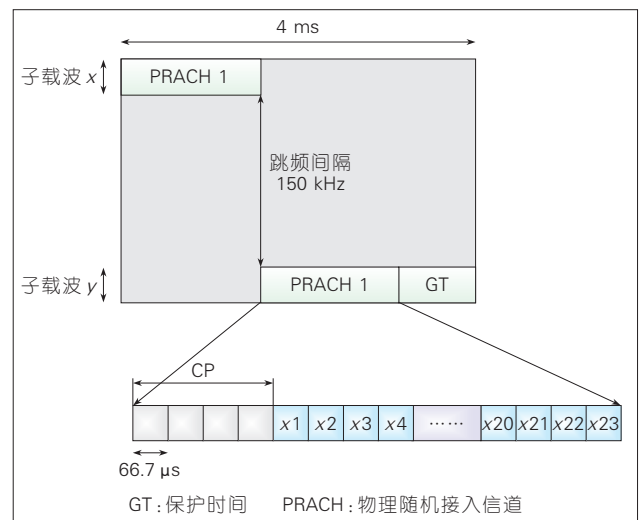


图4 第1种前导结构

▼表2 单载波 PRACH 第1种前导结构的前导误检概率和正确检测概率统计结果

| 重复次数 | SNR/dB | MCL/dB | 误检概率     | 正确检测概率 |
|------|--------|--------|----------|--------|
| 1    | 8.2    | 144    | 3/10 000 | 97.1%  |

注: TA 正确检测范围是  $[-2.08 \mu\text{s}, +2.08 \mu\text{s}]$ <sup>[9]</sup>  
MCL: 最小耦合损耗 PRACH: 物理随机接入信道 SNR: 信噪比 TA: 定时提前量

护带宽,且保护带宽相对于 PRACH 占用的带宽(1 个子载波间隔)来说,开销过大。因此,我们提出了一种不需要配置保护带宽的单子载波 PRACH 结构,如图 5 所示,前导子载波间隔为 3.75 kHz,且默认配置支持跳频。前导发送的最基本单位是 4 个符号组,包括 1 个 CP 以及 5 个符号,且 5 个符号上发送的信号相同,因此可以保证频域上配置多个 PRACH 信道时,不同的 PRACH 前导之间可以基本保证是正交的,即无需在 PRACH 信道之间配置保护带宽。每个符号组发送时占用的子载波相同,且符号组之间配置两个等级的跳频间隔,第 1 和第 2 个符号组之间、第 3 和第 4 个符号组之间配置第 1 等级的跳频间隔  $FH1=3.75 \text{ kHz}$ ;第 2 和第 3 个符号组之间配置第 2 等级的跳频间隔  $FH2=22.5 \text{ kHz}$ 。

表 3 中是在不同的定时提前量(TA)正确检测范围下前导正确检测概率的统计结果。其中,具体仿真配置参考文献[11],仿真中配置的 MCL=144 dB,对应 NB-IoT 非覆盖增强需求的最大 MCL 取值。从表 3 中我们可以看到:为了使第 2 种前导结构可以正常工作,就需要放松 TA 正确检测范围的规定,如从  $[-2.08 \mu\text{s}, +2.08 \mu\text{s}]$  放松到  $[-4.16 \mu\text{s}, +4.16 \mu\text{s}]$ ,此时,前导正确检测概率可以从 54.38% 提升到 91.01%。

### 2.3 方案比较

#### (1) 前导正确检测性能

从 2.1 和 2.2 节中的仿真结果可以看到:第 1 种前导结构的正确检测精准度要优于第 2 种前导结构,主要的原因是第 1 种前导结构的前导序列是基于时域 ZC 序列生成的,ZC 序

列本身具有良好的自相关性以及很低的互相关性;第 2 种前导结构的前导序列则是简单的时域重复发送的信号(例如配置每个符号发送的都是“1”),这样的前导序列是无法保证良好的自相关性以及很低的互相关性的。

#### (2) PRACH 信道容量

第 1 种前导结构由于前导序列为 ZC 序列,因此可以支持前导的码分复用,进而提升 PRACH 信道容量。但是由于频域上不同的 PRACH 信道之间不能保证正交性,因此需要配置保护带宽用来抑制 PRACH 信道之间的干扰,由于 PRACH 的有效带宽仅为 1 个子载波,保护带宽相比于 PRACH 有效带宽开销过大,因此第 1 种前导结构会对 PRACH 信道容量造成较大的影响。

第 2 种前导结构,由于前导序列在各个 OFDM 符号上发送的信号都

是相同的,因此可以保证频域上配置多条 PRACH 信道时,PRACH 信道之间的正交性,即无需在 PRACH 信道之间配置保护带宽。同时,也由于这样的配置导致前导无法支持码分复用,在 PRACH 信道容量会有一定的限制。

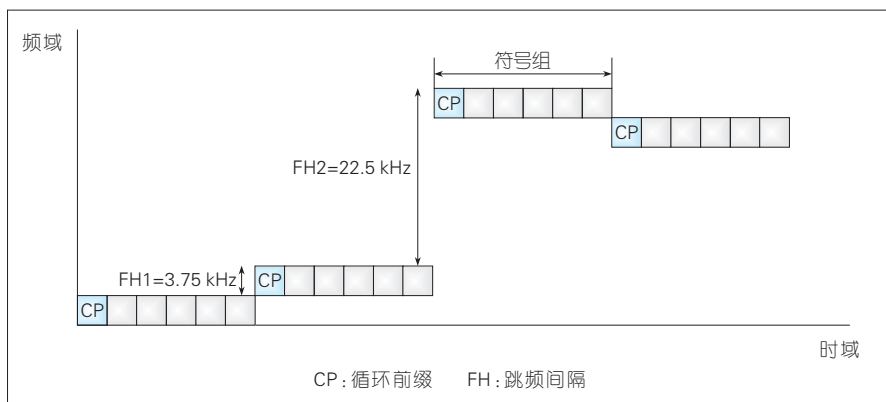
## 3 NB-IoT 标准中 PRACH 方案

NB-IoT 的研究和标准化工作在第 3 代合作伙伴计划(3GPP)标准组织进行,NB-IoT WI 于 2015 年 9 月 RAN #69 次会议正式立项<sup>[14]</sup>,考虑到 NB-IoT 终端中存在仅仅支持单子载波发送的终端,为了支持统一的 PRACH 方案,在 3GPP RAN1 #84 会议中单子载波 PRACH 被建议为唯一的 NB-IoT PRACH 方案<sup>[15]</sup>,并且在 3GPP RAN1 #84b 会议中第 2 种前导结构最终被 NB-IoT 标准采纳<sup>[16]</sup>。

## 4 结束语

单子载波 PRACH 方案中第 1 种前导结构具有良好的前导检测性能,且可以支持码分复用,提高 PRACH

→下转第 20 页



▲图5 第2种前导结构的增强方案3

▼表3 单载波 PRACH 第2种前导结构的前导误检率和正确检测概率统计结果

| TA 正确检测范围                                | 重复次数 | SNR/dB | MCL/dB | 误检概率     | 正确检测概率 |
|--|------|--------|--------|----------|--------|
| $[-2.08 \mu\text{s}, +2.08 \mu\text{s}]$ | 1    | 8.2    | 144    | 3/10 000 | 54.38% |
| $[-4.16 \mu\text{s}, +4.16 \mu\text{s}]$ | 1    | 8.2    | 144    | 3/10 000 | 91.01% |

MCL: 最小耦合损耗 PRACH: 物理随机接入信道 SNR: 信噪比 TA: 定时提前量