

doi:10.13756/j.gtxyj.2020.01.009

无线通信技术

基于 5G 系统的随机接入前导检测算法

王 丹,张怡凡,杜颜敏

(重庆邮电大学 通信与信息工程学院,重庆 400065)

摘要:针对已有的随机接入前导算法存在难以在实际基站中实现以及算法运算量大的缺点,文章提出了 5G 随机接入前导检测算法。首先将接收到的信号经过发送端的逆过程处理得到频域前导,然后生成频域 ZC 序列并进行分组,将各个组内频域 ZC 序列相加并与频域前导相关,最后通过设置阈值来检测前导序列,利用多天线分集梳理修改相对阈值的累积分布函数,根据相对检测阈值确定绝对检测阈值,即相对检测阈值与时变噪声电平的乘积。仿真结果表明,与频域固定阈值前导检测算法相比,在加性高斯白噪声信道中,所提算法的正确检测概率性能提升了 1 dB;在节拍延迟线(TDLC300-100)信道中,所提算法的正确检测概率性能提升了 2 dB。

关键词: 5G;随机接入;前导检测;阈值

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

文章编号: 1005-8788(2020)01-0047-05

Random Access Preamble Detection Algorithm based on 5G System

WANG Dan,ZHANG Yi-fan,DU Yan-min

(School of Communication and Information Engineering, CUPT, Chongqing 400065, China)

Abstract: Aiming at the shortcomings of the heavy computational complexity in existing random access preamble algorithm, a 5G random access preamble detection algorithm is proposed. First, the received signal is processed by the inverse process of the transmitting end to obtain a frequency domain preamble. Then a frequency domain ZC sequence is generated and grouped, and the ZC sequences in each group are correlated with the frequency domain preamble. Finally, the threshold is detected by setting a threshold. The sequence uses a multi-antenna diversity combing to modify the Cumulative Distribution Function(CDF) of the relative threshold, and determines an absolute detection threshold. The threshold is a product of the relative detection threshold and the time-varying noise level, based on the relative detection threshold. The simulation results show that compared with the frequency domain fixed threshold preamble detection algorithm, the correct detection probability performance of the proposed algorithm is improved by 1 dB in the Additive White Gaussian Noise (AWGN) channel. In the Tapped Delay Line (TDLC300-100) channel, the correct detection probability performance of the proposed algorithm is improved by 2 dB.

Key words: 5G; random access; preamble detection; threshold

0 引 言

在 5G 系统中,随机接入过程是一个至关重要的过程,通过随机接入过程实现上行同步后,用户设备才能进行上行数据传输。随机接入过程的第一步就是通过物理随机接入信道(Physical Random Access Channel, PRACH)实现随机接入前导的发送^[1]和检测^[2]。

近年来,针对随机接入前导检测的研究层出不穷:文献[3]提出了一种基于频偏补偿的前导码检测算法来解决中低速模式下频偏对随机接入过程的影响;文献[4-5]给出了长期演进多窗口联合前导检测算法,解决了高速模式下频偏对前导检测的影响;文献[6]提出了频域固定阈值前导检测算法,该算法通过虚警概率来确定固定检测阈值,因为需要反复计

算阈值得到累积分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF),所以该算法难以在实际的基站中实现;文献[7]提出了动态阈值检测算法,虽然这种算法的虚警概率低,但算法运算量大,无形中增加了接入延迟。以上算法均没有对 5G 系统 PRACH 进行分析,其他现有的文献关于 5G 系统 PRACH 的研究,如文献[8]研究的 5G 随机接入前导码的设计,也没有对 5G 系统随机接入前导提出相应的检测算法。因此,在实现随机接入前导正确检测的基础上降低算法复杂度,并保证一定虚警概率成为 5G 系统研究的重点。

基于以上分析,本文提出了一种 5G 随机接入前导检测算法,该算法将频域 ZC 序列分组进行检测,通过设置阈值来检测前导序列,利用多天线分集梳理修改相对阈值的 CDF,根据相对检测阈值确定

收稿日期:2019-02-25

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2017ZX03001021)

作者简介:王丹(1982—),女,重庆人。高级工程师,博士,主要研究方向为 5G 系统物理层协议及 DSP 软件开发。

通信作者:张怡凡,硕士。E-mail:1425405455@qq.com

绝对检测阈值,即相对检测阈值与时变噪声功率的乘积。最后,在不同信道条件下进行仿真,仿真结果表明,所提出的随机接入前导检测算法能满足 5G 系统 PRACH 检测性能的要求,提高了 5G 系统随机接入的成功率。

1 5G 系统 PRACH 发送端

随机接入前导序列是由 ZC 序列经过循环移位生成的,ZC 序列生成公式如下^[9]

$$x_u(i) = e^{\frac{-j\pi u i(i+1)}{L_{RA}}}, \quad 0 \leq i \leq L_{RA} - 1, \quad (1)$$

式中: e 为常量; j 为虚数; L_{RA} 为 ZC 序列的长度; i 为 L_{RA} 中的一个点; u 为物理根序列号。

ZC 序列通过循环移位生成具有长度为 $N_{CS} - 1$ 的零相关区域的随机接入前导码,公式如下^[9]

$$x_{u,v}(i) = x_u((i + C_v) \bmod L_{RA}), \quad (2)$$

式中: C_v 为循环移位值; N_{CS} 为循环移位偏移。

PRACH 时间连续信号定义为^[9]:

$$s_t^{(p,u)}(t) = \beta_{PRACH} \sum_{k=0}^{L_{RA}-1} y_{u,v}(k) e^{j2\pi(k+Kk_1+\bar{k})\Delta f_{RA}(t-N_{CP,l}^{RA}T_c-t_{start}^{RA})}, \quad (3)$$

式中: β_{PRACH} 为幅度比例因子; k 为 L_{RA} 中的一个点; $y_{u,v}(k)$ 为经过离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transformation,DFT)后的频域前导序列; K 为随机接入前导与上行数据之间的子载波间隔的差别; k_1 为 PRACH 前导的频域位置; $\bar{k}$ 为固定的频率偏移值; Δf_{RA} 为 PRACH 单位子载波间隔; $N_{CP,l}^{RA}$ 为循环前缀(Cyclic Prefix,CP)的长度; T_c 为 5G 中基本的时间单元; t_{start}^{RA} 为 PRACH 前导在一个子帧的起始位置。

随机接入过程发送端流程如图 1 所示。从生成的 64 个前导序列中随机选择 1 个前导序列,经过 DFT 将前导信号变换到频域再进行子载波映射,对映射后的信号进行快速傅里叶逆变换(Inverse Fast Fourier Transformation,IFFT),得到时域信号进行过采样,对不同格式的前导信号进行序列重复,最后插入 CP、保护间隔(Guard Period,GP)以及 PRACH 前导在一个子帧的起始位置。

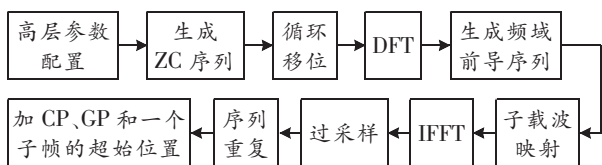


图 1 随机接入过程发送端流程

2 随机接入前导检测算法

接收端流程如下:

第 1 步:将接收到的信号去除 CP、GP 和 PRACH 前导在一个子帧的起始位置。

第 2 步:进行降采样。

第 3 步:进行快速傅里叶变换(Fast Fourier Transformation,FFT),得到频域序列。

第 4 步:子载波解映射。由于在基带信号生成过程中,为了完成对长度为 L_{RA} 的频域前导序列的 N 点离散傅里叶逆变换(Inverse Discrete Fourier Transform,IDFT),对其中 k 个子载波进行了补零处理,所以在接收端要进行相反的处理,即将补零的子载波去除。在实现过程中,假设频移量用参数 $Freq_offset$ 表示,公式如下:

$$Freq_offset = Kk_1 + \bar{k}. \quad (4)$$

本地生成频移量不同的前导序列与接收的频域序列进行点乘确定发送端的 PRACH 传输时机索引,从而确定补零的子载波位置,去除补零的子载波,留下非零子载波组成长度为 L_{RA} 的频域前导序列 $Y(k)$ 。

第 5 步:本地 ZC 序列进行 DFT,即

$$X_u(k) = DFT[x_u(k)]. \quad (5)$$

第 6 步:将获得的 M 个频域 ZC 序列分为 K 分组,每个组包括 M/K 个频域 ZC 序列,将各个组内的频域 ZC 序列相加。

第 7 步:将第 6 步得到的信号取共轭与频域前导序列 $Y(k)$ 点乘,即

$$Z_u(k) = Y(k) \cdot X_u^*(k), \quad (6)$$

式中: $X_u^*(k)$ 为本地频域 ZC 序列的共轭; $Z_u(k)$ 为本地频域 ZC 序列与频域前导序列相关得到的序列。

第 8 步:将第 7 步得到的序列 $Z_u(k)$ 补零,将序列的长度扩展为 2 的幂,然后进行 IFFT,即

$$z_u(l) = IFFT[Z_u(l)], \quad (7)$$

式中: $Z_u(l)$ 为第 7 步得到的相关序列补零到 2 的幂后得到的序列。

第 9 步:计算功率时延谱(Power Delay Profile,PDP),即

$$PDP = |z_u(l)|^2. \quad (8)$$

第 10 步:在计算功率时延谱后,将来自不同天线的所有结果组合在一起以获得分集增益。与最大比组合相比,等增益组合^[10]的性能仅略微降低,而计算复杂度远低于最大比组合,因此,本文将采用等

增益组合作为分集梳理方案。

第11步：对多个天线组合的PDP进行检测。设置阈值A，这是到达信号的阈值。在各个组中，如果功率电平 $\leq$ 阈值A，则认为在该组中没有前导发送。如果功率电平 $>$ 阈值A，继续比较功率电平与阈值B，阈值B是决定是否检测到前导码的最终阈值。如果组内的峰值功率高于阈值B，则将该组内各个频域ZC序列与频域前导信号相关，再将得到的PDP与阈值B比较，若 $>$ 阈值B则认为检测到前导，从而计算前导序列号以及时间提前量；否则认为没有检测到前导，具体的检测阈值设置方法在第3节中给出。

接收端流程如图2所示。

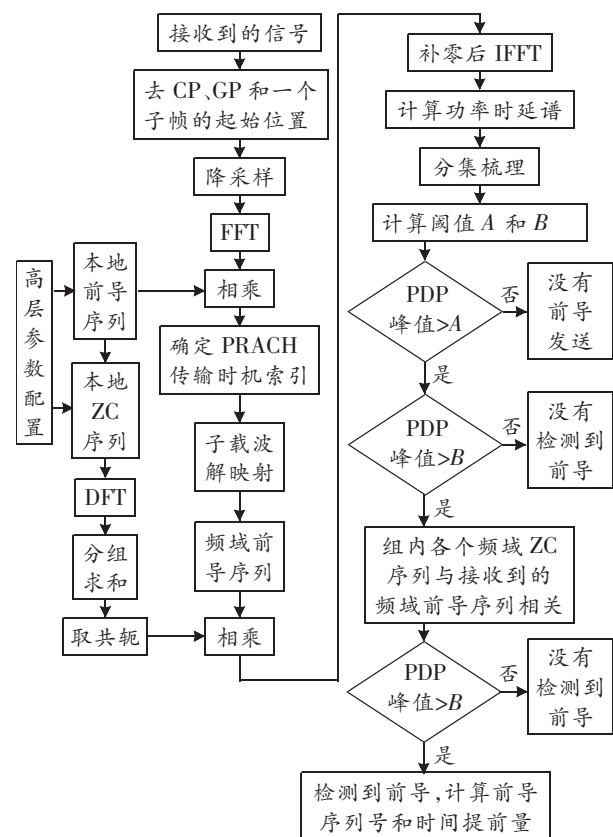


图2 接收端流程

3 检测阈值设置

一种传统的阈值设置算法是将检测阈值B的值由虚警概率确定。该虚警概率是接收方在发送方没有发送任何前导时错误地检测到前导码访问的总概率。

考虑到在加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN)信道中AWGN的影响，在没有发送前导时，功率时延谱为^[11]

$$z_p(n) = \sum_{a=1}^{N_a} |z_w(n)|^2, \quad (9)$$

式中： $z_w(n) \sim N(0, \delta_w^2)$ ； N_a 为天线数； $z_p(n)$ 服从自由度为 $2N=2N_a$ 的中心卡方分布。

虚警概率应该满足如下条件^[6]：

$$P_{fa}(T_{thre}) = P\{\max(z_p(n) > T_{thre})\} = 1 - CDF\{z_p(n), T_{thre}\}, \quad (10)$$

式中： $CDF\{z_p(n), T_{thre}\}$ 为 $z_p(n)$ 在 T_{thre} 的CDF值；阈值B设置为 $T_B = T_{thre}$ ， T_{thre} 为绝对阈值。

因为需要反复计算阈值B得到CDF，故该方法难以在实际基站中实现，代替这种复杂的方法，相对阈值的计算为^[11]

$$T_r = T_{thre} / \lambda_w, \quad (11)$$

式中， λ_w 为噪声功率。

T_r 的CDF为^[11]

$$F_r = 1 - \exp(-N_a \cdot T_r) \sum_{k=0}^{N_a-1} \frac{1}{k!} (N_a \cdot T_r)^k. \quad (12)$$

考虑到多天线分集梳理时应与阈值设置分开，在等增益分集梳理之后，阈值的设置相当于一个单独的天线，所以 T_r 的CDF可修改为

$$F_r = 1 - \exp(-T_r) \sum_{k=0}^{N_a-1} \frac{1}{k!} (T_r)^k. \quad (13)$$

由式(13)得到的CDF与噪声功率无关，所以相对阈值可以先计算后储存。

阈值A设置为整个序列的功率时延谱分布的平均功率，其表达式如下：

$$T_A = \frac{1}{N_{IFFT}} \sum_{n=0}^{N_{IFFT}-1} |z_s(n)|^2, \quad (14)$$

式中： N_{IFFT} 为N点的IFFT； $z_s(n)$ 为多个天线组合后的序列。

由阈值A获取的噪声功率为

$$\lambda_w = \frac{1}{N_{sa}} \sum_{n=0}^{N_{sa}-1} (|z_s(n)|^2 < T_A), \quad (15)$$

式中， N_{sa} 为公式中累计的点数。

由式(11)可知，阈值B为

$$T_B = T_{thre} = \lambda_w \cdot T_r. \quad (16)$$

4 性能仿真与分析

为了评估本文所提出的前导序列检测算法的性能，在AWGN和TDLC300-100信道中对比本文检测算法与传统频域固定阈值前导检测算法。仿真参数如表1所示。

表 1 仿真参数设置

参 数	配置情况
信道模型	AWGN/TDLC300-100
系统带宽/MHz	100
采样频率/MHz	1 966.08
发送天线/个	1
接收天线/个	2
逻辑序列索引	0
子载波间隔/kHz	1.25
前导格式	0
高速标志位	0
零自相关配置	15

传统的频域固定阈值前导检测算法接收端需要对 M 个频域 ZC 序列一一相关检测,而本文的前导检测算法利用将 M 个频域 ZC 序列分为 K 组,每 M/K 个频域 ZC 序列为一组,采用本文的前导检测算法只需要相关 $K+2$ 次检测。同时两个用户发起随机接入时,需相关 $K+2+2$ 次检测;以此类推,当有 N 个用户发起随机接入时,分组检测需要相关 $K+N\times 2$ 次检测。

在零相关配置为 15 时,需要 32 个 ZC 序列生成 64 个前导,将 32 个频域 ZC 序列分为 16 组,每两个频域 ZC 序列分为一组。传统频域固定阈值前导检测算法与本文前导检测算法需要的相关运算次数如图 3 所示。

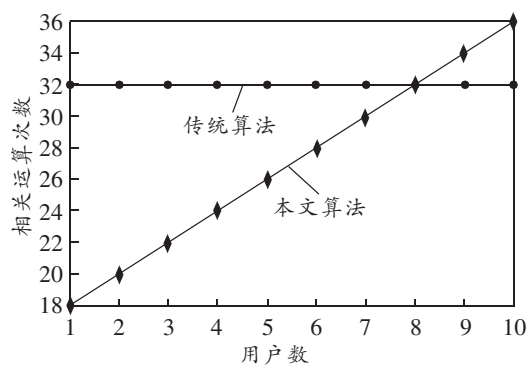


图 3 用户数和 相关运算次数的关系

由图可知,传统频域固定阈值前导检测算法相关运算次数固定为 32。当用户数 <8 时,本文算法的相关运算次数 <32 ;当用户数 $=8$ 时,本文算法的相关运算次数为 32;当用户数 >8 时,本文算法的相关运算次数 >32 。当随机接入的用户次数较少时,相对于传统频域固定阈值前导检测算法,本文算法的运算复杂度较低。在实际的 5G 系统中,多用户启动随机接入的概率很小,所以本文算法适合通常的 5G 系统随机接入过程。

根据 5G 协议规定,虚警概率应 $\leq 0.1\%$,正确

检测概率应 $\geq 99\%$ ^[12]。在中低速模式下,5G 系统中 PRACH 正确检测概率要求如表 2 所示。

表 2 中低速模式下 PRACH 正确检测概率要求

接收天线	信道模型	频率偏移/Hz	信噪比/dB (格式 0)
2	AWGN	0	-15.1
2	TDLC300-100	400	-6.7

式(13)可知,当接收天线数 $N_a=2$ 时,可以计算出虚警概率相对阈值的理论结果,如图 4 所示。

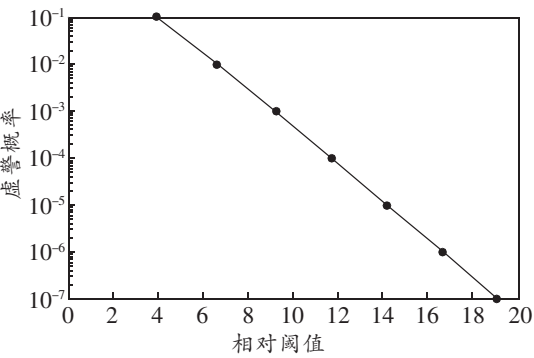


图 4 相对阈值与虚警概率的关系

由图可知,随着相对阈值增加,虚警概率降低。这是因为相对阈值是绝对阈值与噪声功率的比率。当比率较高时,噪声很少超过阈值形成虚警。考虑到信道条件恶劣,设置检测阈值进行峰值检测可以有效降低虚警概率。由于正确检测概率和虚警概率是一对互为矛盾的参量,所以采用固定虚警概率使正确检测概率充分大原则^[13]。选取相对阈值为 9.3 满足协议规定的最低 0.1% 的虚警概率要求,可以保证正确检测概率充分大。

图 5 所示为在 AWGN 信道下的正确检测概率。由图可知,在 AWGN 信道中采用传统频域固定阈值前导检测算法,在信噪比 $SNR=-16$ dB 时,正确检测概率为 99%;而采用本文所提出的前导检测算法,在 $SNR=-17$ dB 时,正确检测概率为

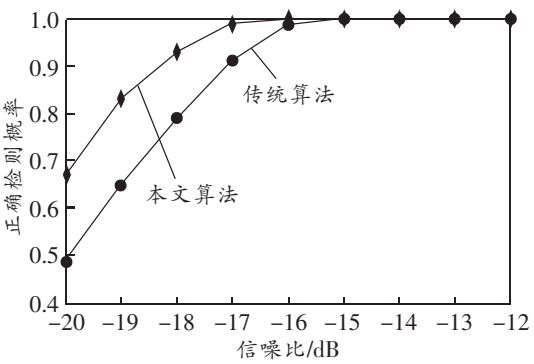


图 5 在 AWGN 信道下的正确检测概率

99%。相比于传统频域固定阈值前导检测算法,本文算法在性能上有 1 dB 的提升。

图 6 所示为在 TDLC300-100 信道下的正确检测概率。由图可知,在 TDLC300-100 信道中采用传统频域固定阈值前导检测算法,在 $\text{SNR} = -7$ dB 时,正确检测概率为 99%;而采用本文所提出的前导检测算法,在 $\text{SNR} = -9$ dB 时,正确检测概率为 99%。相比于传统频域固定阈值前导检测算法,本文算法在性能上有 2 dB 的提升。由于相对阈值的 CDF 的修改和考虑到分集梳理的影响,性能在衰落信道有了明显的提升。

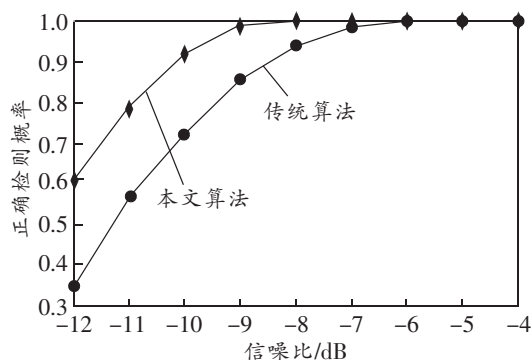


图 6 在 TDLC300-100 信道下的正确检测概率

5 结束语

本文提出了一种 5G 随机接入前导检测算法,该算法通过将频域 ZC 序列进行分组降低了相关运算次数,通过分离分集梳理和阈值设置的过程避免了多天线分集梳理对检测阈值设置的影响,修改了相关阈值的 CDF 使相对阈值可以提前存储起来。仿真结果表明,在 AWGN 和 TDLC300-100 信道环境下,所提出的随机接入前导检测算法满足 PRACH 检测性能的要求,相对于传统的频域固定阈值前导检测算法,提高了正确检测概率,提升了性能。

参考文献:

- [1] De Figueiredo F A P, Mathilde F S, Cardoso F A C M, et al. Efficient Frequency Domain Zadoff-Chu Generator with Application to LTE and LTE-A Systems [C]//2014 International Telecommunications Symposium. Sao Paulo, Brazil: IEEE, 2014: 1-5.
- [2] 许虎,林艺辉,刘小刚. LTE-A 系统中 PRACH 信号检测的研究与实现[J]. 电子技术应用, 2016, 42(6): 74-76, 80.
- [3] Wang Q, Ren G, Wu J. A Multiuser Detection Algorithm for Random Access Procedure with the Presence of Carrier Frequency Offsets in LTE Systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(9): 3299-3312.
- [4] 许梦. 3GPP LTE 上行随机接入的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [5] 黄存刚,马文平,罗炼飞. 超高速场景下随机接入前导序列的检测[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(9): 2100-2105.
- [6] Kim S, Joo K, Lim Y. A Delay-robust Random Access Preamble Detection Algorithm for LTE System [C]//2012 IEEE Radio and Wireless Symposium. Santa Clara, CA: IEEE, 2012: 75-78.
- [7] Sesia S, Toufik I, Baker M. LTE, the UMTS Long Term Evolution: from Theory to Practice[M]. United Kingdom: Wiley, 2009: 437-440.
- [8] Schreiber G, Tavares M. 5G New Radio Physical Random Access Preamble Design [C]//2018 IEEE 5G World Forum. Silicon Valley, CA: IEEE, 2018: 215-220.
- [9] 3GPP TS38. 211. Technical Specification Group Radio Access Network Physical Channels and Modulation[S/OL]. (2018-09-27) [2019-01-16]. <http://www.3gpp.org>.
- [10] Kim J S, Munir D, Hasan S F, et al. Enhancement of LTE RACH Through Extended Random Access Process[J]. Electronics Letters, 2014, 50(19): 1399-1400.
- [11] Leyva-mayorga I, Tello-oquendo L, Pla V, et al. On the Accurate Performance Evaluation of the LTE-A Random Access Procedure and the Access Class Barring Scheme[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(12): 7785-7799.
- [12] 3GPP TS38. 104. Technical Specification Group Radio Access Network Base Station Radio Transmission and Reception[S/OL]. (2018-10-03) [2019-01-15]. <http://www.3gpp.org>.
- [13] 牛凯,吴伟陵. WCDMA 系统下行链路 CPICH 信道捕获性能分析[J]. 北京邮电大学学报, 2003(1): 46-49.