doi:10.14132/j.cnki.1673-5439.2020.06.001

超高速移动下随机接入前导检测算法的分析与仿真

陈发堂,曾 勤,骆维扬

(重庆邮电大学 通信与信息工程学院,重庆 400065)

摘要:针对多普勒频移导致功率分散的问题,提出一种五窗口检测技术与双门限技术相结合的联合检测方法,规避了超高速场景下多普勒频偏带来的接收端相关峰值的能量泄漏的影响,提高了检测质量。文中算法能够保证在虚警概率满足 3GPP 协议要求的情况下,对接收端的随机接入前导进行检测,降低了漏检概率,提高了检测成功率。仿真结果表明,在超高速移动场景下,最大多普勒频偏为 1 960 Hz 的情况下,随机接入前导通过加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN)信道传输,基站侧漏检概率相比已有算法性能提升了 1 dB,通过扩展典型城市(Extended Typical Urban,ETU)模型信道传输,基站侧漏检概率相比已有算法性能提升了 0.7 dB,同时也有效地降低了虚警概率,能够较好地检测出随机接入前导序列。

关键词:5G;随机接入;前导;多普勒频偏;双门限

中图分类号:TN929.5 **文献标志码**:A **文章编号**:1673-5439(2020)06-0001-06

Analysis and simulation of random access preamble detection algorithm in the super-high speed scene

CHEN Fatang, ZENG Qin, LUO Weiyang

(College of Telecommunications and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: According to the characteristics of power dispersion caused by Doppler frequency shift, a joint detection method for a five-window detection technology and a dual-threshold technology are adopted, avoiding the influence of the energy leakage on a correlation peak of a receiver caused by Doppler frequency offset in the super-high speed scene and improving the detection quality. The algorithm can ensure that when the false alarm probability meets the requirements of 3GPP protocol, it can detect the random access preamble to the receiver, and reduce the missed detection probability and improve the detection success rate. The simulation results show that in the super-high speed scene, when the maximum Doppler frequency offset is 1 960 Hz, the probability of the missed detection on the base station side is improved by 1 dB compared with the existing algorithms by additive white Gaussian noise (AWGN) channel, and the probability of the missed detection on the base station side is improved by 0.7 dB compared with the existing algorithms by extended typical urban (ETU) model channel. Meanwhile, it can also effectively reduce the false alarm probability and detect the random access preamble sequence better.

Keywords: 5G; random access; preamble; Doppler frequency shift; dual-threshold

收稿日期:2020-08-21 **本刊网址**:http://nyzr.njupt.edu.cn

基金项目:重点产业共性关键技术创新(cstc2017zdcy-zdzxX0004)资助项目

作者简介:陈发堂,男,研究员,chenft@cqupt.edu.cn;曾勤(通信作者),女,硕士研究生,1776329736@qq.com

引用本文:陈发堂,曾勤,骆维扬. 超高速移动下随机接入前导检测算法的分析与仿真[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版),2020,40(6):1-6.

第五代移动蜂窝网络(The Fifth Generation Mobile Cellular Network,5G)具有更高流量密度、更快传输速率、更高用户移动性要求的特点[1]。对移动通信而言,随机接入是一个非常重要的过程。物理随机接入信道(Physical Random Access Channel ,PRACH)采用 Zadoff-Chu(ZC)序列作为前导序列,对 ZC 序列进行循环移位以对每个用户产生唯一的用户识别[2]。ZC 序列具有良好的自相关性和互相关性[3],这就使得用户可以很好地抵抗干扰。

如今,中国的高速铁路的最高实验速度可达到 605 km/h,这样的超高速移动会使得用户设备(User Equipment,UE)的随机接入前导发生较大的多普勒频偏[4]。根据最大多普勒频偏公式[5]:$f_d = \frac{f}{c} * v$,其中,f 为中心频率,v 为移动速度,在 5G 的频谱划分中,有 3.5 GHz 的频段[6],在这一频段中,最大多普勒频移有1 960.6 Hz,远远超过了 PRACH 在高速小区下的检测范围。这使得已有的前导序列的生成方式和检测算法不能很好地适应需求。

在这种情况下,国内外学者提出了一些检测方法。文献[4]提出根据特定的初始物理根序列号使相关峰值的偏移集中在单一的搜索窗口内,然后用单个搜索窗口进行前导检测,但是这种方法只在特定的初始物理根序列号下使用,有一定的局限性。文献[7]提出在高速移动时采用三窗口联合检测算法,以提高用户的系统接入概率,然而在超高速模式下,多普勒频偏更大,这种方法不再适用。文献[8]提出由于多普勒频偏会产生多个副峰,因此采用五窗口检测算法对前导序列进行检测,但这种方法无法判断检测的信号是否为所需要的信号。

基于此,本文综合考虑算法对随机接入前导检测的适应性和算法的复杂度,最终借鉴多重滑窗峰值检测的方法,进行了算法的改进:利用多普勒频偏对新限制集方法生成的随机接入前导序列影响,在接收端采用 5 个检测窗口对前导码进行联合检测;并且在此基础上,改进噪声估计法[9],通过相关信号的概率分布来设置门限,采用改进的二次阈值判决法来进一步提高检测成功率。通过分析和仿真结果显示,该算法可以有效地化解多普勒频偏对随机接入前导序列检测带来的影响,提高了检测质量。

1 5G 系统 PRACH 检测模型

遵循 5G 标准[10],UE 通过选择前导码来启动基于内容的随机接入访问过程,通过从 gNodeB 分配的一个专用前导来启动无内容访问。PRACH 基于 ZC 序列,通过循环移位建立前导序列集,然后循环移位序列加上循环前缀(Cyclic Prefix,CP)以及保护间隔(Guard Period,GP)形成前导,如图 1 所示。

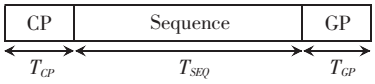


图 1 随机接入前导的基本结构

前导码是基于长度为 L_{RA} 的 ZC 序列的循环移位序列,其被认为是基序列。每个时频 PRACH 场合有 64 个前导,这 64 个前导依据基序列通过不同循环移位 C_v 产生。

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

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

其中,u 为物理根序列号。其频域表示为

$$y_{u,v}(n) = \sum_{m=0}^{L_{RA}-1} x_{u,v}(m) \cdot e^{-j\frac{2\pi mn}{L_{RA}}} \tag{3}$$

随机接入过程的发送端流程如图 2 所示。其流程为通过高层下发参数,生成 ZC 序列,经过循环移位生成 64 个前导序列,从中随机选择一个前导序列,通过离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform,DFT)将前导信号变换到频域,并进行补零以及子载波映射,之后对信号进行离散傅里叶反变换(Inverse Discrete Fourier Transform,IDFT),对得到的信号进行过采样并进行滤波操作,将前导信号按照协议规定的不同格式进行序列重复,最后插入 CP、GP 以及 PRACH 前导在一个子帧的起始位置。

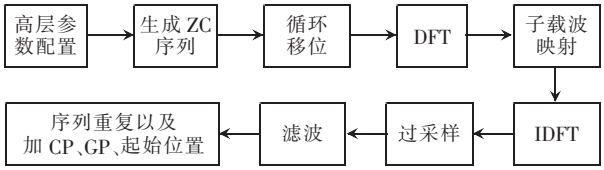


图 2 随机接入发送端流程图

随机接入前导在基站侧的接收流程如图 3 所示。接收端流程就是发送端流程的逆过程,包括降采样滤波、解资源映射等。其步骤如下:

步骤一:对接收到的信号进行降采样滤波,并对所得序列进行快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform,FFT),从而得到频域序列;

步骤二:解资源映射,将补零的子载波除掉,得到非零子载波组成的长度为 L_{RA} 的频域前导序列;

步骤三:将得到的前导序列与本地 ZC 序列进行相关;

步骤四:将上诉频域信号进行快速离散傅里叶

反变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)到时域;

步骤五:将步骤四得到的信号进行模平方,最后进行峰值检测,解出前导序列号和时间提前量。

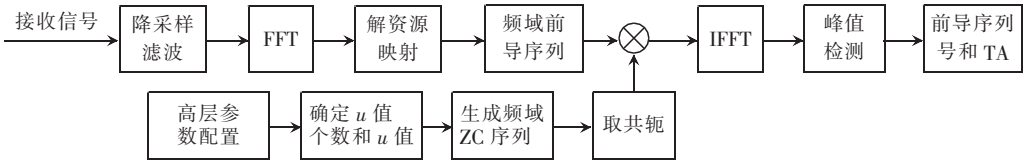


图 3　随机接入接收端流程图

2　本文算法

2.1　多普勒频偏对随机接入前导的影响

在超高速移动情景下,5G 网络希望给用户提供与低速移动场景下一致的业务体验,特别是保证终端用户瞬时连接以及时延无感知的业务体验。当用户快速移动时,会产生较大的多普勒频移,若使用传统算法,就会降低用户接入网络的成功率,影响用户体验。

在第五代移动通信网络中,在中心频率为 3.5 GHz的情况下,用户的临界速度为387.7 km/h;而如今我国的高速铁路的最高实验速度可达到 605 km/h,远远高于临界速度,而此时的多普勒频偏为 1 960.6 Hz,远超传统算法所能解决的频偏。

在中低速移动场景下多普勒频偏对前导检测的影响为

$$x_u(n,\Delta f)=\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\pi\frac{u\left(n-\frac{1}{u}\right)\left(n-\frac{1}{u}+1\right)}{L_{RA}}}\cdot\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi\frac{n}{L_{RA}}(\Delta fT_{SEQ}-1)}\cdot\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\pi\frac{u-1}{uL_{RA}}}=x_u\left(n-\frac{1}{u}\right)\cdot\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi\frac{n}{L_{RA}}(\Delta fT_{SEQ}-1)}\cdot\mathrm{e}^{\mathrm{j}\phi_u}\tag{4}$$

其中,T_{SEQ} 是前导序列的持续时间,ϕ_u 的值为 $-\pi\dfrac{u-1}{uL_{RA}}$。

在超高速移动场景下多普勒频移对前导检测的影响为

$$\begin{aligned}x_u(n,\Delta f)&=\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{\pi un(n+1)}{L_{RA}}}\cdot\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2\pi nK}{L_{RA}}}\cdot\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2\pi n\cdot\delta f\cdot T_{SEQ}}{L_{RA}}}=\\&\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{\pi u}{L_{RA}}(n^2+n-2Knd_u-Kd_u+K^2d_u^2)}\cdot\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{\pi u}{L_{RA}}(Kd_u-K^2d_u^2)}\cdot\mathrm{e}^{\frac{\mathrm{j}2\pi n\delta fT_{SEQ}}{L_{RA}}}=\\&x_u(n-Kd_u\bmod L_{RA})\cdot\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{\pi u}{L_{RA}}(Kd_u-K^2d_u^2)}\cdot\mathrm{e}^{\frac{\mathrm{j}2\pi n\delta fT_{SEQ}}{L_{RA}}}=\\&x_u(n-(K+1)d_u\bmod L_{RA})\cdot\mathrm{e}^{\frac{\mathrm{j}2\pi n(\delta fT_{SEQ}-1)}{L_{RA}}}\cdot\mathrm{e}^{\mathrm{j}\phi_u}\end{aligned}\tag{5}$$

其中,K 为大于 1 的正整数,δf 为不超过前导码的子载波间隔,d_u 为协议规定的多普勒频偏对应的循环移位值。

根据式(5)可知,伪相关峰值出现的位置为 $C_v-(K+1)d_u$,并且,当多普勒频移满足 $K\cdot\Delta f_{RA}<\Delta f\leqslant(K+1)\cdot\Delta f_{RA}$,$K=1,2,3,\cdots$时,伪相关峰出现的位置为$(C_v\pm d_u)\bmod L_{RA}$,$(C_v\pm 2d_u)\bmod L_{RA}$,…,$(C_v\pm(K+1)d_u)\bmod L_{RA}$。

本文通过仿真分析前导峰值随多普勒频偏的位置变化。仿真参数为 $N_{IDFT}=1\ 024$,$u=170$,$L_{RA}=839$,$C_v=1\ 500$,因为只是分析前导峰值的变化,因此在仿真时没有加入噪声。仿真结果如图 4 所示。

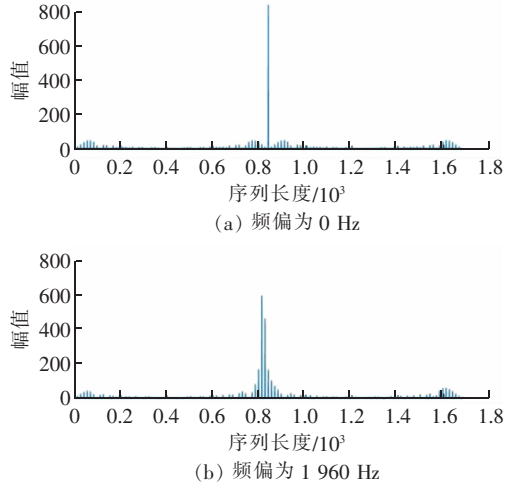


图 4　前导峰值变化图

从图 4 中可以看出,当多普勒频移为 1 960 Hz 时,相关峰值的能量发生了泄漏,出现了伪峰,并且伪峰的能量也超过了主峰。当信道噪声较大或者检测算法不针对这种问题时,会使网络端的前导检测出现困难,使得虚警概率增大,从而影响用户接入网络。

从式(5)中可以看出,当多普勒频偏为单位子载波大小时,相关峰值的位置由 C_v 处移到$(C_v\pm d_u)\bmod L_{RA}$,因此,网络端在检测前导序列时,可用三窗口检测方法进行检测。当在超高速移动场景下,伪峰的位置会出现在$(C_v\pm d_u)\bmod L_{RA}$处以及$(C_v\pm 2d_u)\bmod L_{RA}$处,在这种情况下,在基站端可采用五窗口算法对其进行前导检测。

2.2　前导检测方法分析

随机接入前导的峰值检测[11]主要分为三步:搜索窗检测,确定检测门限以及确定检测结果。在中低速移动场景下,多普勒频偏很小,可以忽略不计,一般采用频域检测算法[12],对接收端相关信号的功

率延时谱进行加窗检测,利用判决值和门限值进行比较,进而判断是否有用户接入。在高速和超高速移动场景下,频偏对检测峰值的影响较大,在检测时需要考虑频偏的影响,采用多重滑窗进行检测。

检测门限的确定是通过 3GPP 协议规定的虚警概率来设定的[9],可以通过基于噪声估计的方法来计算检测门限。

噪声估计方法的思想是假设噪声的相关模平方值在服从自由度为 2 的卡方分布的情况下,先使基站接收信号与本地 ZC 序列相关,在判决量 $\lambda \geqslant \lambda_{threshold}$,并且虚警概率满足 0.1% 的情况下,计算出对应的门限 $\lambda_{threshold}$。其中,相关后的序列为

$$r_{y,x}(m) = \sum_{n=0}^{L_{RA}-1} y(n)x^*(n+m), m = 0,1,\cdots,L_{RA}-1 \tag{6}$$

则判决量为 $\lambda = \frac{|r_{y,x}(m)|^2}{\sigma^2}$,$\sigma$ 为噪声的标准差。

然而这种门限检测方法在信道的信噪比变化时,无法及时地反映到检测中,从而影响检测质量。因此改进噪声估计门限值算法,通过相关信号的概率分布来设置门限,采用改进的二次阈值门限判决法来进一步提高检测性能。

2.3 基于改进双门限判决法的检测算法

对于超高速移动情境,考虑到频偏和门限对检测性能的影响,本文提出了一种改进算法,在基站侧采用五窗口检测与改进双门限判决法的联合检测算法。

根据 2.1 节的分析,在超高速移动情景下,相关峰的能量泄漏到 $(C_v \pm d_u) \bmod L_{RA}$ 处以及 $(C_v \pm 2d_u) \bmod L_{RA}$ 处,为了提高检测性能,需将这 5 处的能量进行合并,再对其进行检测。

随机接入前导信号检测的覆盖范围取决于接收信号的传输延迟,不能影响到下一个信号。5 个检测窗口的长度可设为 $((C_v \pm d_u) \cdot N_{IFFT}/L_{RA}) \bmod N_{IFFT}$,$C_v \cdot N_{IFFT}/L_{RA}$,$((C_v - 2d_u) \cdot N_{IFFT}/L_{RA}) \bmod N_{IFFT}$。之后再将 5 个窗口的功率进行叠加。

噪声是触发虚警事件的主要因素,因此检测前导的第一步也是重要的一步就是去除噪声,此时就需要知道噪声门限。在本文中,噪声门限是通过去除峰值后的所有搜索窗口中的功率的平均值来计算的,前导信号的峰值必须高于噪声门限。噪声门限如下

$$T_{Noise} = mean\left(\sum_{m=0}^{L_{RA}-1} r_{y,x}(m) - \sum_{i=0}^{4} \max(r_{y,x}(i,m))\right) \tag{7}$$

改进的前导联合检测算法步骤为:

步骤一:对主窗和 4 个副窗分别进行窗内检测,将 5 个窗口的信号进行叠加;

步骤二:添加一个门限 $T1 = Max(|r_{y,x}(m)|^2) * M_1$,如果存在左二副窗 > $T1$,左一副窗 > $T1$,主窗 > $T1$,右二副窗 > $T1$,右一副窗 > $T1$ 或合并窗 > $T1$,如果其中任何一个条件满足,则判决有 UE 接入;

步骤三:再添加一个绝对门限,$T2 = |T_{Noise}|^2 * M_2$,如果合并窗 > $T2$ 且 $Maxvalue > T1$,则认为有用户接入,随机接入检测成功。这样就可调高前导检测的效率。

其中,M_1、M_2 的具体数值会根据频偏发生变化。在本文中,频偏都是大于 1 250 Hz 的,根据多次的仿真实验,M_1 的值可设为 0.7,M_2 的值可设为 11。

3 仿真结果及分析

3.1 算法检测性能分析对比

本节详细介绍了本文算法对于随机接入信号检测过程中的仿真结果。本次仿真中的信道环境为加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN)信道和扩展典型城市(Extended Typical Urban, ETU)模型信道,对超高速移动情景下的随机接入前导进行检测,对比分析算法的检测性能。具体仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数配置

参数	配置
载波频率/GHz	3.5
系统带宽/MHz	100
DFT 点数	1 024
多普勒频偏/Hz	1 960
N_{CS}	38
采样频率/Hz	122 880
L_{RA}	839
逻辑根索引号	22
信道模型	AWGN/ETU 70

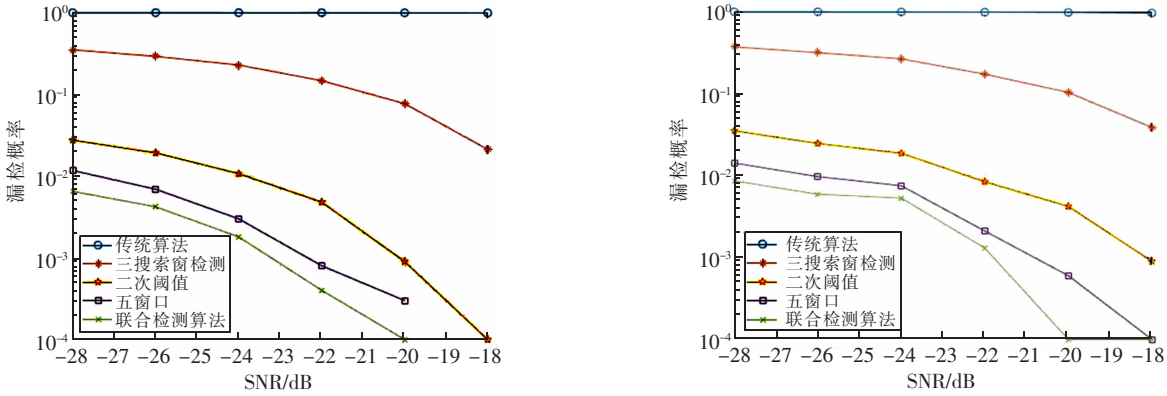
对传统的频域相关检测算法、三窗口检测算法、五窗口检测算法、频域相关检测联合二次阈值检测算法以及本文算法进行仿真对比分析。在仿真中采用的前导格式为 0,CP 类型为普通 CP,用于多径衰落环境中的性能检测的 ETU 多径延迟参数[13]如表 2 所示。

表 2　ETU 参数配置

Excess tap delay/ns	Relative power/dB
0	-1
50	-1
120	-1
200	0
230	0
500	0
1 600	-3
2 300	-5
5 000	-7

此次仿真的场景是超高速移动模式,其最大多普勒频偏为 1 960 Hz。3GPP 协议[14] 规定了 5G 系统实现的随机接入前导码检测性能应满足漏检概率不超过 1%,虚警概率始终小于或等于 0.1%。

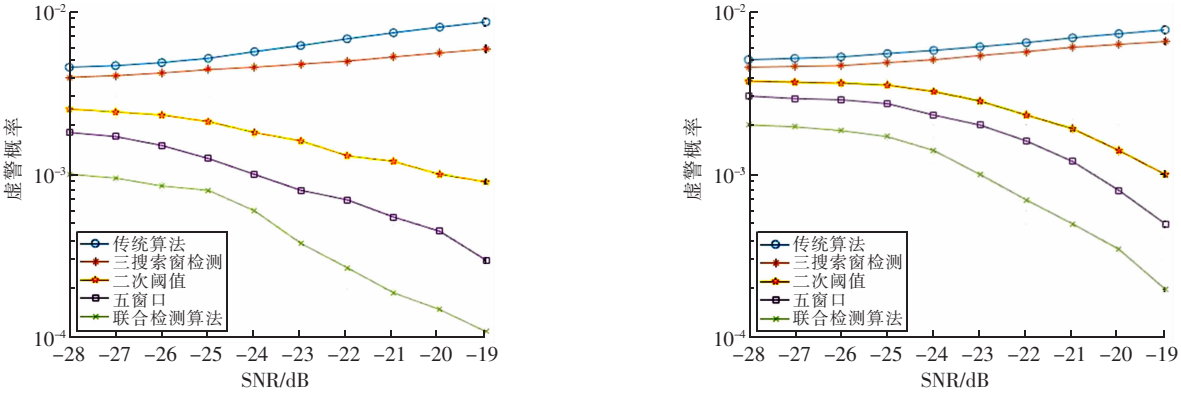
漏检概率是当信号存在时,未检测出前导信号的条件概率。图 5 表示出了在虚警概率满足 3GPP 协议的情况下,即虚警概率为 0.1% 时,AWGN 信道和 ETU 信道模型下频偏为 1 960 Hz 的漏检概率随信噪比的变化。从图 5(a)的仿真图中可以看出,在高斯白噪声信道下,在超高速移动场景下,由于频偏很大,传统的频域相关检测算法的漏检概率为 100%,很显然,本文提出的联合检测算法的性能具有更低的漏检概率,相对于五窗口检测,本文方法检测性能改善了 1 dB。在 ETU 信道下,在超高速移动场景下,显然,本文提出的算法较五窗口检测算法性能提升了 0.7 dB,提高了成功检测率。



(a) AWGN 信道　　(b) ETU 信道

图 5　虚警概率为 0.1%,频偏为 1 960 Hz 时,漏检概率随信噪比的变化情况

仿真采用 ZC 序列,利用其良好的自相关特性和互相关特性,对其进行峰值功率检测。图 6 表示各个算法的虚警概率的仿真结果,从图 6 中可以看出,由于在超高速情景下,接收端会存在多个伪峰,传统的相关检测算法和三搜索窗检测算法明显不符合 3GPP 协议的要求,而本文提出的改进双门限判决方法分别在 AWGN 信道和 ETU 信道的 -28 dB 和 -23 dB 处满足要求。不管是 AWGN 信道还是 ETU 信道,本文提出的联合检测算法都能够有效抵抗大多普勒频偏对前导检测带来的影响。



(a) AWGN 信道　　(b) ETU 信道

图 6　频偏为 1 960 Hz 时,虚警概率随信噪比的变化情况

3.2　计算复杂度分析

前导序列的检测的复杂度主要体现在降采样、傅里叶变换和反变换以及峰值检测三个方面。在本文所比较的几个算法中,降采样、傅里叶变换和反变

换的计算量都是相同的,复杂度的不同主要体现在接收端峰值检测方面。在接收端,接收到的前导信号需要与本地 64 个 ZC 序列相关。在相关检测时,本文采用五窗口检测与改进双门限判决法的联合检测算法,相比其他算法,算法的复杂度有所增加,但相对于整个接收系统而言,增加的计算量可以忽略不计。各个算法的计算复杂度比较结果如表 3 所示。

表 3 算法运算量对比

算法	峰值检测	总的运算量
传统算法	64×839 次加法	607 471 040 次加法
	64×839 次乘法	3 448 258 次乘法
三搜索窗检测	64×839×3 次加法	607 578 432 次加法
	64×839×3 次乘法	3 555 650 次乘法
二次阈值	64×839×2 次加法	607 524 736 次加法
	64×839×2 次乘法	3 501 954 次乘法
五搜索窗检测	64×839×5 次加法	607 685 824 次加法
	64×839×5 次乘法	3 663 042 次乘法
本文算法	64×839×5×2 次加法	607 954 304 次加法
	64×839×5×2 次乘法	3 931 522 次乘法

4 结束语

在超高速移动场景下,随机接入的信号会因为多普勒频偏的影响使得接收信号的峰值发生变化,产生能量泄漏和伪峰,接收到的前导序列会产生副峰,会影响信号的检测。本文从实用以及算法复杂度的角度综合考虑提出了一种在基站侧采用五窗口检测与改进双门限判决法的联合检测算法。仿真结果表明,本文的检测算法对多普勒频偏超过随机接入信道单位子载波时较已有算法复杂度会略有增加,但虚警概率和漏检概率都有所降低,性能有所提高。本文算法在满足 3GPP 协议的规定下,能够更好地检测出随机接入前导。

参考文献:

[1] THOTA J, AIJAZ A. On performance evaluation of random access enhancements for 5G uRLLC[C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference. 2019:1-7.

[2] KIM T, JANG H S, SUNG D K. A novel root-index based prioritized random access scheme for 5G cellular networks[J]. ICT Express, 2015, 1(3):97-101.

[3] TAO J, YANG L, HAN X. Enhanced carrier frequency offset estimation based on Zadoff-Chu sequences[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(10):1862-1865.

[4] WU G, YUAN H, GUO W, et al. On design of physical random access channel in high-speed railway LTE systems[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(35):5042-5050.

[5] 高琦. 高速铁路环境下 LTE 随机接入算法研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2018:21-22.
GAO Qi. Research on random access algorithm in LTE system under high-speed railway environment[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2018:21-22. (in Chinese)

[6] 袁周阳. 国内 5G 频谱分配进展及建议[J]. 通信世界, 2018(22):37-38.

[7] 闵铁锐,温文坤,徐子龙. LTE 系统高速移动接收机算法[J]. 移动通信, 2018, 42(6):73-79, 85.
MIN Tierui, WEN Wenkun, XU Zilong. High-speed mobile receiver algorithm in LTE systems[J]. Mobile Communications, 2018, 42(6):73-79, 85. (in Chinese)

[8] 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.
HUANG Cungang, MA Wenping, LUO Lianfei. Detection of random access preamble sequences in ultra high speed mobile environment[J]. Systems Engineering and Electronics, 2018, 40(9):2100-2105. (in Chinese)

[9] LIN Z, XIAO P, VUCETIC B, et al. Analysis of receiver algorithms for LTE SC-FDMA based uplink MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(1):60-65.

[10] 3GPP. Technical specification group radio access network physical channels and modulation: TS38. 211[S/OL]. [2019-09-28]. http://www.3gpp.org.

[11] ZHEN L, QIN H, SONG B, et al. Random access preamble design and detection for mobile satellite communication systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(2):280-291.

[12] LEE Y, SOU S. Enhanced frequency-domain signal detection for single-carrier spatial modulation systems[C]//3rd International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS). 2018:263-267.

[13] LIANG B, HE Z, NIU K, et al. The research on random access signal detection algorithm in LTE systems[C]//Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications (MAPE). 2013:115-118.

[14] 3GPP. Technical specification group radio access network base station (BS) radio transmission and reception: TS38. 104[S/OL]. [2019-10-04]. http://www.3gpp.org.