

文章编号: 1001 - 893X(2010)08 - 0081 - 05

基于变换域的简化 LTE 小区搜索算法*

刘娜娜, 赵新建

(浙江工业大学 信息工程学院, 杭州 310023)

摘要:针对目前 LTE 小区搜索算法比较复杂的问题,根据信号的时频对称特性,提出了时域和变换域联合估计的简化方法。没有增加额外的测度函数,分三步实现 LTE 小区准确搜索,即时域实现半帧定时和分数倍频偏估计,频域获取整数倍频偏估计和半帧细定时,混合检测实现帧定时,同时根据同步码的检测获取小区 ID。与以往算法相比,所提算法降低了 LTE 小区搜索的复杂度。仿真结果证明,信噪比在 $-10 \sim 2$ dB 之间时该算法的性能有一定提高,对于实现终端快速准确的小区搜索有一定的应用价值。

关键词:宽带接入;LTE 小区搜索;变换域;联合估计;混合检测

中图分类号:TN929.5 文献标识码:A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2010.08.017

A Simplified LTE Cell Search Algorithm Based on Transform - Domain

LIU Na - na , ZHAO Xin - jian

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract:To solve the problem of complexity for LTE cell search, a low complexity co - algorithm is proposed in both time and frequency domain, based on the symmetry properties of the signal. Instead of extra metric function, it is realized only by three steps to search the LTE cell accurately. In step1 the half frame is timed and the fractional frequency offset is estimated in time domain. In step2 the integer frequency offset and the fine - half frame timing is estimated in frequency domain. In step3 the frame is timed by the method of hybrid detection. Cell ID is also indentified by the synchronization code in the process. The algorithm can reduce the complexity of LTE cell search. The simulation results confirm that the performance of the algorithm is improved with the $-10\text{dB} < \text{SNR} < 2\text{dB}$. So the proposed algorithm is of some practical value for achieving cell search fast and accurately.

Key words:wideband access; LTE cell search; transform - domain; joint estimation; hybrid detection

1 引言

随着移动通信和宽带无线接入技术的不断发展和融合,无线通信系统呈现出移动化、宽带化和 IP 化的趋势。为了应对来自 WiMAX、Wi - Fi 等宽带接入技术的挑战,3GPP 开启了 3G 长期演进(3G LTE) 技术的研究,并视为准“4G”技术。它不仅支持高速

移动场景下的数据传输,而且要灵活配置 1.25 ~ 20 MHz 多种带宽。在 3G LTE 技术中,初始小区搜索作为移动终端接入无线通信网的第一步,时频同步的准确性、小区 ID 识别的快慢直接影响了 UE 的接入效率,因而小区搜索具有重要的研究价值。

文献[1]中讨论了 LTE 小区搜索的一般过程,即在时域通过匹配滤波进行粗细符号定时、FFO(小

* 收稿日期:2010 - 04 - 08;修回日期:2010 - 05 - 19

数倍频偏)估计和小区 ID 识别,在频域进行 IFO(整数倍频偏)估计和小区 ID 组识别。经典的小区搜索算法是在同步信道和小区特殊导频的基础上进行的,如文献[2]在时域通过相关算法实现。这种方法在每个时隙的最后一个符号都插入同步码,开销比较大,而且需要时域重复的结构,导致频域资源的浪费。文献[3]对算法进行了改进,但是在小区识别中没有分组,需要通过整个识别序列的相关算法进行全局搜索,计算量很大。对于定时细同步的实现,文献[4]提出了利用符号函数实现精同步的算法,仍是在时域实现,增加了算法的复杂度。文献[5]提出了一种 CP 盲检测的方法,但是没有明确提出 IFO 的影响,当信道环境恶劣或是 UE 运行速度过高产生多普勒频移较大时可能会影响同步效果。本文综合考虑载波利用率、计算的复杂度,以及算法的鲁棒性等因素,在 LTE 下行帧结构的基础上,提出了利用变换域的方法,对粗细定时和频偏进行联合估计,实现小区快速准确地搜索,最后通过仿真证明了本算法的可行性。

2 基于变换域的简化 LTE 小区搜索过程设计

2.1 LTE 下行帧结构

LTE 分为 TDD 和 FDD 两种双工方式,对应 FS1 和 FS2 两种帧结构^[1]。本文以 FS1 帧结构为例进行研究,如图 1 所示。

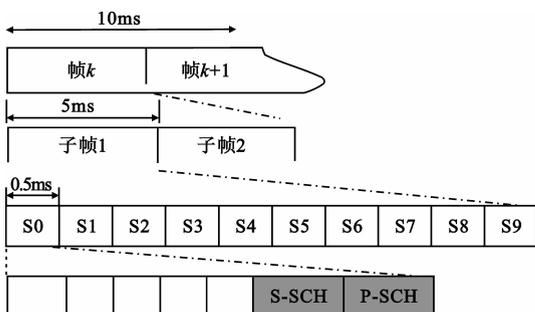


图 1 LTE-FDD 下行帧结构

Fig. 1 Downlink frame structure of LTE-FDD

一个无线帧的时长为 10 ms,可分为两个半帧,每个半帧分为 10 个时隙,每个时隙由 7 个 OFDM 符号组成。为了灵活配置 CP,可以将主同步信号(PSCH)和辅同步信号(SSCH)分别放在时隙的最后和倒数第二个 OFDM 符号位置^[1]。两个半帧中的 PSCH 是对称的,以实现 5 ms 时钟定时。为了提高相

关计算的速度,SSC 由两个短码构成,且两个半帧中的 SSC 不同,用来实现 10 ms 帧定时。

2.2 同步码的选取

PSC 用于符号同步和小区 ID 的识别,文献[1, 6]中研究了 ZC 序列的性质,本文采用长为 62 的 ZC 序列作为 PSC:

$$d_u(k) = \begin{cases} e^{-j\frac{\pi u(k+1)k}{63}}, & k = 0, 1, 2, \dots, 30 \\ e^{-j\frac{\pi u(k+1)(k+2)}{63}}, & k = 31, 32, \dots, 61 \end{cases} \quad (1)$$

恰当地选择根序号 u 就可以在较低 SNR 下减轻时频同步误差带来的影响。LTE 支持 504 个小区 ID,可分为 168 组,每组包含 3 个小区 ID,对应的 ZC 序列的根序号为 25、29、34。考虑到编解码的复杂度^[1],SSC 码采用结构比较简单的 M 序列产生,长度为 62。

2.3 基于变换域的小区搜索过程

基于变换域的小区搜索如图 2 所示。



图 2 基于变换域的 LTE 小区搜索

Fig. 2 LTE cell search based on transform-domain

2.3.1 信号建模

设 OFDM 符号经过 IFFT 变换后归一化的基带信号模型为^[7]

$$x(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j2\pi kn/N} \quad (2)$$

式中, N 是 OFDM 子载波个数,也是 IFFT 的点数。

2.3.2 5 ms 时钟的检测、小区 ID 的识别和 CFO 的联合算法

(1) 时域半帧粗定时、FFO 估计和小区 ID 检测

UE 开机后,接收到信号 $r(n)$,与本地的 3 个同步序列 $C_i(n)$ 进行互相关运算,本步骤可以由匹配滤波在时域实现,假设相邻符号周期内信道特性不变,则可以采用差分调制的方式,以提高算法的准确性。

$$y_i(d) = \sum_{l=0}^{L-1} r' * (n - d - l) c'(l) \quad (3)$$

式中, L 为相关窗长度, $r'(n)$ 、 $c'_i(n)$ 为接收和发送的差分调制序列, $i = 0, 1, 2$ 。

由于精选的 3 个 ZC 序列鲁棒性比较好,通过 3

个本地序列与接收信号的时域相关值比较,检测出小区 ID 编号及 PSC 起始位置,从而实现了 5 ms 时钟粗定时。

检测出峰值后可以得到频偏估计^[4]值为

$$\hat{\epsilon}_f = \frac{\text{angle}(Y(d))}{2\pi} \quad (4)$$

此归一化频偏在 $(-0.5, 0.5)$ 范围内,为小数频偏,通过将接收信号乘上 $e^{-j2\pi\epsilon}$ 来纠正。

(2) 频域半帧细定时和 IFO 联合估计

由于整数倍频偏只是对频域数据进行了循环移位,所以在频域用滑动相关的方法可以估计出 IFO。同时结合符号定时的偏差引起频域相位旋转,将半帧细定时变换到频域与 IFO 联合估计,从而简化算法。

设定粗同步并对 FFO 补偿后仍存在定时偏差 Δd 和整数倍频偏 ϵ_f ,则此时信号可以表示为

$$r(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} e^{j\frac{-2\pi(n+\Delta d)\epsilon_f}{N}} \sum_{k=0}^{N-1} H(k) C(k) \cdot e^{j\frac{2\pi(n+\Delta d)k}{N}} + w(n) \quad (5)$$

式中, $H(k)$ 为信道单位冲激响应, $w(n)$ 为加性高斯白噪声(AWGN)。忽略加性噪声的影响,去除 CP 后,对 $r(n)$ 进行 FFT 变换:

$$R(k) = \sum_{n=1}^N r(n) e^{j\frac{2\pi n k}{N}} = H_{(k+\epsilon_f)_N} C_{(k+\epsilon_f)_N} e^{j\frac{2\pi \Delta d k}{N}} \quad (6)$$

为了降低信道对相关检测的影响,且近似认为相邻载波上的信道条件不变,对 $R(k)$ 采用差分形式表示:

$$\begin{aligned} R'(k) &= R^*(k)R(k-1) = \\ & (H^*(k-\epsilon_f)C^*(k-\epsilon_f)e^{-j\frac{2\pi \Delta d k}{N}}) \cdot \\ & (H^*(k-1-\epsilon_f)C^*(k-1-\epsilon_f)e^{j\frac{2\pi \Delta d (k-1)}{N}}) \approx \\ & e^{-j\frac{2\pi \Delta d}{N}} C^*(k-\epsilon_f)C^*(k-1-\epsilon_f) = \\ & e^{-j\frac{2\pi \Delta d}{N}} C(k-\epsilon_f)C^*(k-1-\epsilon_f) \end{aligned} \quad (7)$$

本地同步信号的差分序列为

$$C'(k) = C(k)C^*(k-1) \quad (8)$$

比较式(7)和式(8)可见, $R'(n)$ 与 $C'(n)$ 相比,除了存在一个相位因子外仅存在 ϵ_f 个移位,可以定义如下度量函数对 IFO 进行估计:

$$Y(\hat{\epsilon}_f) = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} R'^*(k-\hat{\epsilon}_f)C'(k)}{\sum_{k=0}^{N-1} |C(k)|^2 |C(k-1)|^2} \quad (9)$$

通过 $Y(\hat{\epsilon}_f)$ 的峰值检测,即可得到整数倍频偏估计值 $\hat{\epsilon}_f$ 。由式(7)可知定时偏差引起相位旋转,所以在度量函数的峰值处,取其相位进而对定时偏差进行细估计:

$$\Delta \hat{d} = \frac{-\text{angle}(Y(\hat{\epsilon}_f))}{2\pi} N \quad (10)$$

然后对定时偏差和 IFO 进行补偿。

2.3.3 10 ms 时钟的检测和小区 ID 组的识别

获取小区 ID 和半帧同步及 FFO 纠正以后,通过 SSC 实现帧定时和小区 ID 组的识别。SSC 码的个数为 168 个,每个序列由两个长度为 31 的 M 序列交织级联分别放在两个半帧中相同的位置^[1]。由于本地同步序列个数较多,若用 168 个本地 SSC 对接收信号全局检测必然计算量过大,所以采用了混合检测的方法,即先通过自相关的方法得到帧的开始位置从而实现帧的定时。根据帧结构设计中 SSCH 位于 PSCH 的 OFDM 符号之前,利用 PSCH 为参考信号实现 SSCH 信号的相干检测,然后通过自相关运算(同公式(3)),检测 $y(k)$ 的峰值可得到帧定时。最后用得到的 SSCH 码与 168 个小区 ID 分别进行互相关运算,检测相关峰值确定小区 ID 组。

3 复杂度分析

在复杂度方面,本文提出的算法,省去了时域细定时过程,而是通过式(10)在频域得到,算法大大简化。以 N 个子载波的符号细定时为例,如果通过 CP 长(设为 L)的相关窗来实现,那么需要 $L \times L$ 次乘法运算和 $L \times (L-1)$ 次加法运算;而本文只需要在频域 IFO 估计的基础上,运用式(10)进行一次取相位角运算,因此算法大大简化。

4 仿真结果与分析

仿真中采用 OFDM 的子载波数为 2048,子载波间隔为 15 kHz,CP 长度为 160,系统带宽为 20 MHz,中心频率为 2 GHz。采用 AWGN 信道,移动速度为 150 km/h。时域检测前,先对 PCH 信道进行窄带滤波。采用蒙特卡罗仿算法,仿真运行 500 次。

根据式(3),图 3 仿真了时域 PSC 信号检测的结果,同时确定出小区 ID。仿真结果显示 PSC 的定位仍存在偏差,可在细定时和 IFO 联合估计中进一步得出,如图 4 所示,检测出峰值,则可通过式(10)对定时偏差进行估计。

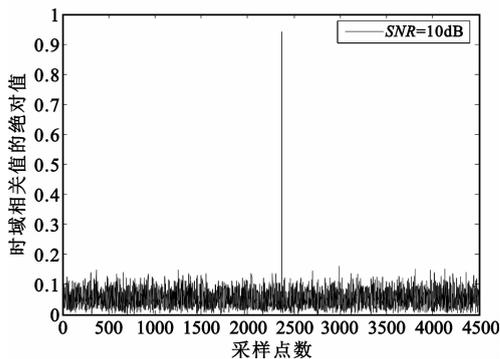


图3 通过时域相关检测进行半帧定时

Fig.3 Correlation detection for half frame timing in time - domain

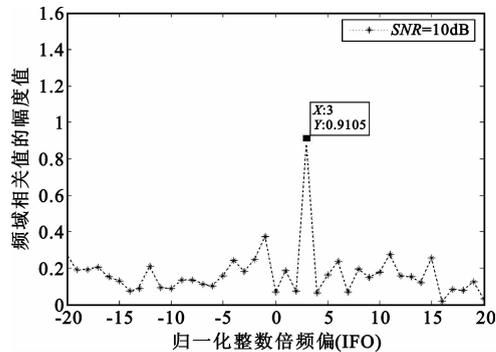


图4 频域相关检测进行细定时和 IFO 联合估计

Fig.4 Joint estimation for fine timing and IFO by correlation detection in frequency - domain

对图3的峰值处通过式(8)可以估计出FFO,图5仿真了FFO估计的性能,比较了接收信号自相关和接收信号与本地同步信号互相关检测的优劣。在 $SNR < 0$ 时,达到 $RMSE = 0.1$,两者相差6 dB,这是由于信道噪声对两个半帧中同步信号产生了一定干扰,使得互相关比自相关检测性能稍好。

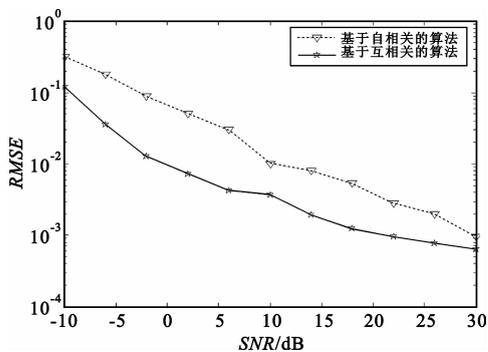


图5 FFO估计性能比较

Fig.5 Comparison of FFO estimation

提高,在 $SNR = -10$ dB环境下,差错概率控制在0.6左右;在 $SNR > -4$ dB时,差错概率趋于零,可见本算法可以达到规范的要求。

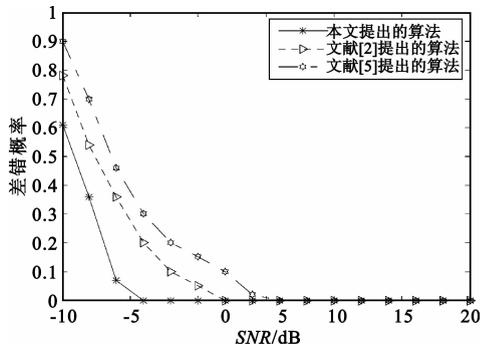


图6 AWGN信道环境下符号定时的误差

Fig.6 Symbol timing error with AWGN

由于小区ID分组检测中小区ID检测只需要识别出3个PSC码,出错概率忽略不计,所以只仿真了小区ID组检测的错误概率。如图7所示,本文SSC由两个长度为31的M序列交织级联而成,检测出的SSC受干扰的影响比较小,与本地168个小区ID组同步码进行相关时要优于其它算法,在 $SNR < 0$ 时尤为明显。

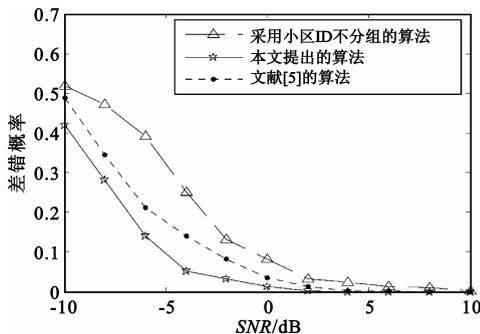


图7 小区ID识别的的差错概率

Fig.7 Error probability of cell ID detection

5 结束语

本文研究了基于变换域的联合估计算法,并仿真了该算法的性能。该算法没有增加额外的代价函数,仅通过时域和变换域的联合估计,实现了粗细定时和频偏估计,简化了算法,提高了性能。在SSCH检测和小区ID组识别中采用混合检测方法,降低了算法的复杂度。仿真结果表明,该算法在较低SNR下具有较好的鲁棒性,可以实现UE接入时快速准确的LTE

由图6可知,符号定时的鲁棒性得到了一定的

小区搜索。但本文仿真环境为 AWGN 信道,对于多径信道、瑞利衰落信道等还需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 沈嘉,索士强,全海洋,等.3GPP 长期演进(LTE)技术原理与系统设计[M].北京:人民邮电出版社,2008:280-296.
SHEN Jia, SUO Shi-qiang, QUAN Hai-yang, et al. 3GPP Long Term Evolution: Principle and System Design[M]. Beijing: People's Posts & Telecom Press, 2008: 280-296. (in Chinese)
- [2] SU Huan, ZHANG Jian-hua. Cell Search Algorithms for the 3G Long-term Evolution[J]. Journal of China University of Posts and Telecommunications, 2007, 14 (2): 33-37.
- [3] SU Huan, ZHANG Jian-hua, LI Ke. Cell Search Scheme for Long-term Evolution of TD-SCDMA System[J]. Journal of China University of Posts and Telecommunications, 2008, 15 (3): 24-29.
- [4] 孙海信,杨雪梅,吕艳华,等.OFDM 系统符号定时精同步研究[J].声学技术,2007,26(4):747-751.
SUN Hai-xin, YANG Xue-mei, LV Yan-hua, et al. Fine estimation of timing offset for OFDM[J]. Technical Acoustics, 2007, 26(4): 747-751. (in Chinese)
- [5] 盛渊,罗新民. LTE 系统中小区搜索算法研究[J].通信技术,2009,42(3):90-92.
SHENG Yuan, LUO Xin-min. Algorithm Study on Cell

Search in LTE [J]. Communication Technology, 2009, 42(3): 90-92. (in Chinese)

- [6] 谢伟,李小文.基于 ZC 序列的 TDD-LTE 同步信号频率校正研究[J].电子测试,2009(3):13-17.
XIE Wei, LI Xiao-wen. Study on frequency offset correction of TDD-LTE synchronization signal based on ZC sequence [J]. Electronic Test, 2009(3): 13-17. (in Chinese)
- [7] 佟学俭,罗涛.OFDM 移动通信技术原理与应用[M].北京:人民邮电出版社,2003.
DONG Xue-jian, LUO Tao. Principles and Applications of OFDM mobile communication[M]. Beijing: People's Posts & Telecom Press, 2003. (in Chinese)

作者简介:

刘娜娜(1984-),女,山东德州人,硕士研究生,主要研究方向为 3G 长期演进系统;

LIU Na-na was born in Dezhou, Shandong Province, in 1984. She is now a graduate student. Her research direction is 3G long term evolution(LTE).

Email: lnnzj@163.com

赵新建(1955-),男,浙江杭州人,教授,主要研究领域为无线网络和通信系统、信息与网络安全。

ZHAO Xin-jian was born in Hangzhou, Zhejiang Province, in 1955. He is now a professor. His research interests include wireless network and communication system, information and network security.

本刊加入“万方数据-数字化期刊群” 等数据库的声明

为了适应我国信息化建设的需要,扩大作者学术交流渠道,实现科技期刊编辑、出版发行工作的电子化,推进科技信息交流的网络化进程,本刊现已加入“万方数据-数字化期刊群”、“中国学术期刊(光盘版)”、“中国期刊全文数据库”、“中国学术期刊网”、“中文科技期刊数据库”、“中国期刊网”等本刊目次页上著录的数据库,本刊录用发表的论文,将由编辑部统一纳入上述数据库,进入因特网或光盘提供信息服务。本刊所付稿酬已包含著作权使用费和刊物内容上网服务报酬,不再另付。凡有不同意见者,请事先声明,本刊将作适当处理。

《电讯技术》编辑部