

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.10.018

引用格式:张德民,谭博,黄菲,等. LTE 系统中一种串行的整数倍频偏和扇区检测算法[J]. 电讯技术, 2016, 56(10):1165-1169. [ZHANG Demin, TAN Bo, HUANG Fei, et al. A serial integer carrier frequency offset and sector detection algorithm in LTE systems[J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(10):1165-1169.]

LTE 系统中一种串行的整数倍频偏和扇区检测算法*

张德民**, 谭 博, 黄 菲, 杨 程, 王 丹

(重庆邮电大学 通信与信息工程学院, 重庆 400065)

摘 要:在 LTE 系统中,用户终端(UE)在开机后首先会进行小区搜索。针对传统的小区搜索方案中整数倍载波频偏(ICFO)和扇区 ID 是通过利用主同步信号(PSS)进行联合检测这一问题,提出了一种串行的整数倍频偏和扇区 ID 估计算法。该算法利用 PSS 的对称性,将 ICFO 和扇区 ID 进行分开检测,通过对接收的频域 PSS 进行归一化差分相关,消除了信道的影响,从而增强了检测性能。将联合估计算法和提出的串行估计算法进行仿真对比,结果表明提出的算法相较于传统方法可以取得更好的检测精度,并且运算复杂度仅为传统方法的 1/3。

关键词:LTE 系统;小区搜索;串行检测;整数倍载波频偏;扇区 ID;差分相关

中图分类号:TN929.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2016)10-1165-05

A Serial Integer Carrier Frequency Offset and
Sector Detection Algorithm in LTE Systems

ZHANG Demin, TAN Bo, HUANG Fei, YANG Cheng, WANG Dan

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

Abstract: In LTE systems, user equipment, when it is booted, will perform a cell search firstly. For the conventional cell search scheme, the integer carrier frequency offset(ICFO) and sector identity(ID) are jointly detected by utilizing the primary synchronization signal(PSS). For this problem, this paper proposes a serial integer carrier frequency offset and sector ID algorithm. This algorithm makes use of the symmetry of the primary synchronization signal(PSS) and detects the ICFO and sector ID separately. Through normalized differential correlation of the received frequency domain PSS, the effect of channel is eliminated, thereby enhancing detection performance. Simulation comparison between the joint estimation algorithm and the proposed serial algorithm shows that the proposed algorithm can achieve better detection accuracy and the computational complexity is only 1/3 of that of conventional method.

Key words: LTE system; cell search; serial detection; integer carrier frequency offset; sector ID; differential correlation

1 引 言

3GPP 长期演进(Long Term Evolution, LTE) 能够提供较大的吞吐量和可靠的服务质量(Quality of Service, QoS), 即使在移动情况下也是如此。和其

他蜂窝系统一样, LTE 终端用户(User Equipment, UE) 的初始接入过程也包含小区搜索操作, 小区搜索主要用来与就近的基站建立连接。而且, 在小区搜索的过程中, UE 可以完成相关的同步工作, 比如

* 收稿日期:2016-01-11;修回日期:2016-06-30 Received date:2016-01-11;Revised date:2016-06-30

** 通信作者: zhangdm@cqupt.edu.cn Corresponding author: zhangdm@cqupt.edu.cn

• 1165 •

定时偏差和载波频率偏差的同步。因此,对于一个蜂窝通信系统来说,具有较好鲁棒性的小区搜索方案是必不可少的。

小区搜索方案一般分为 3 步^[1-2]:首先,接收端利用循环前缀(Cyclic Prefix,CP)来进行小数倍载波频偏(Fractional Carrier Frequency Offset,FCFO)和粗定时同步的估计;然后,通过主同步信号(Primary Synchronization Signal,PSS)进行整数倍载波频偏(Integer Carrier Frequency Offset,ICFO)和扇区 ID 的联合检测;最后,进行精同步和小区组 ID 的估计。在第 2 步中,扇区 ID 只能在 ICFO 补偿之后进行检测,而传统的 ICFO 估计算法又需要先知道扇区 ID,因此,现有的算法都是将 ICFO 和扇区 ID 进行联合检测^[2-3]。现有的关于 LTE 小区搜索的研究大部分都集中在主同步信号和辅同步信号(Secondary Synchronization Signal,SSS)的检测上,通过对它们的检测可以完成小区搜索及下行同步的整个过程。

文献[4]运用 PSS 的相关性,提出了关于整数倍频偏的联合检测算法,由于其搜索空间较大,因此复杂度较高。文献[5]提出了一种基于 PSS 的整数倍频偏最大似然估计的算法,结合了矩阵运算和噪声方差等特性来进行估计,增加了运算复杂度,硬件难以实现。文献[6]提出了一种基于变换域的简化 LTE 小区搜索算法,通过时域和变换域的联合估计,但只有在较低信噪比时该算法的性能才有一定提高。另外,在小区搜索的过程中并没有进行信道估计,更别说信道补偿。为此,本文提出了一种串行的 ICFO 和扇区 ID 检测算法,通过利用 PSS 的对称性^[7],ICFO 可以在不知道扇区 ID 的条件下进行估计。并且,本文提出的算法将联合检测的大小为 21 的搜索空间分离为大小为 7 和 3 的搜索空间,通过对接收的 PSS 进行归一化并差分相关,可以有效地消除由信道衰落引入的幅度和相位影响。

2 PSS 信号与传输模型

LTE 下行链路中,系统带宽的变化范围为 1.4~20 MHz,采样率为 1.92~30.72 Msample/s。虽然有 6 种不同的 FFT 大小,但所有的子载波间隔为 15 kHz。LTE 系统中,PSS 采用频域 Zadoff-Chu(ZC)序列生成,ZC 序列具有良好的自相关特性。LTE 系统中有 3 组可用的 PSS,通过根序列指示 u 进行区分。PSS 的生成方式如下:

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

ZC 序列的根序列指示 u 与 $N_{ID}^{(2)}$ 一一对应,关系如表 1 所示。

表 1 根序列指示 u
Tab.1 Root sequence index u

$N_{ID}^{(2)}$	根序列指示 u
0	25
1	29
2	34

在本文中,除了 ZC 序列的恒幅零自相关(Constant Amplitude Zero Auto Correlation,CAZAC)特性,还发现了 PSS 的对称性。通过利用 PSS 的对称性,可用增强小区搜索的性能。PSS 的频域传输模型如图 1 所示。

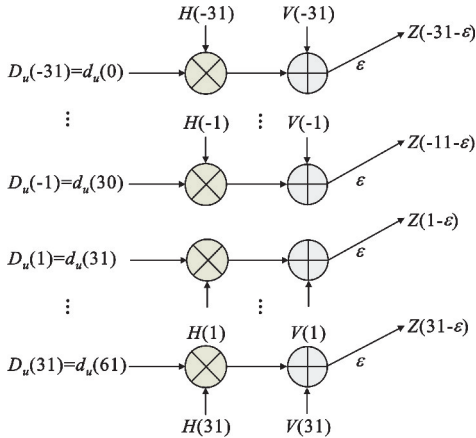


图 1 频域 PSS 传输模型

Fig.1 The PSS transmission model in frequency domain

ZC 序列索引值 m 和子载波索引值 n 之间的关系为

$$m=\begin{cases} n+31, n=-31,-30,\cdots,-1 \\ n+30, n=1,2,\cdots,31 \end{cases} \quad (2)$$

其中跳过了直流子载波。将 n 代替 m 代入式(1)中,可以得到第 n 个子载波上发送的 PSS 为

$$D_u(n)=e^{-j\frac{\pi u(n^2+31\cdot 32)}{63}-j\pi un} \quad , n=\pm 1,\pm 2,\cdots,\pm 31 \quad (3)$$

从式(3)中可以看出,正负子载波上传送的 PSS 数据是对称的,即对于 $n=1,2,\cdots,31$,存在任意的 u 值,使得 $D_u(n)=D_u(-n)$ 。

在接收端,由于发送端和接收端的晶振不匹配以及多普勒频移,系统中会引入载波频偏^[8]。

接收端接收的 PSS 数据不仅受到信道衰落的影响,还受到载波频偏的影响。例如:对于中心频率为 2.5 GHz 的蜂窝系统,如果晶振的不匹配达到

$\pm 1.5 \times 10^{-5}$, 则引入载波频偏为 ± 2.5 个子载波间隔。如图 1 所示, 经过 FCFO 补偿和定时粗同步后, 接收的频域 PSS 序列表示为

$$Z(n) = H(n)D_u(n-\varepsilon) + V(n), \quad n = -31, \dots, -1, 1, \dots, 31. \quad (4)$$

式中: $H(n)$ 和 $V(n)$ 分别表示第 n 个子载波上的信道频率响应和加性高斯白噪声; $D_u(n-\varepsilon)$ 表示根指示为 u 、ICFO 为 ε 的频域 PSS 信号。从式(4)中可以看到, ε 和 u 共同影响 $Z(n)$, 因此, 传统的小区搜索方法中多采用联合检测算法。在下一节中, 将引入本文提出的算法, 对这两个参数分别进行检测。

3 串行的 ICFO 与扇区 ID 检测

本文提出的算法主要包含 3 步: 首先, 对相邻子载波上的归一化的频域 PSS 数据进行差分相关, 从而消除信道衰落的影响; 然后, 利用式(3)中的对称特性, 在不知道扇区 ID 的情况下进行 ICFO 估计; 最后, 对接收信号进行 ICFO 补偿, 将发送端不同 u 值的 PSS 序列与接收的 PSS 序列进行相关, 可以很容易检测出扇区 ID。

由于 PSS 是基于 ZC 序列生成, 因此也具有 CAZAC 特性, 则归一化近似地消除了信道频率响应的幅度的影响。通过利用式(4), 归一化的接收 PSS 可以表示为

$$\begin{aligned} \tilde{Z}(n) &= \frac{Z(n)}{|Z(n)|} = \frac{H(n)D_u(n-\varepsilon)}{|H(n)D_u(n-\varepsilon) + V(n)|} + \frac{V(n)}{|H(n)D_u(n-\varepsilon) + V(n)|} \approx \\ &= e^{j\theta_H(n)} D_u(n-\varepsilon). \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $\theta_H(n)$ 是信道频率响应 $H(n)$ 的相位。为了消除信道相位影响, 本文假设相干带宽足够大, 因此, 相邻子载波上的信道频率响应是相似的。如后面所证明的, 这个假设对于 LTE 信道模型来说是正确的^[8]。在这个假设之下, 相邻子载波上接收的归一化 PSS 的差分相关表示为

$$\begin{aligned} G(n) &= \tilde{Z}(n)\tilde{Z}^*(n+1) \approx e^{j(\theta_H(n)-\theta_H(n+1))} D_u(n-\varepsilon)D_u^*(n+1-\varepsilon) \approx \\ &= D_u(n-\varepsilon)D_u^*(n+1-\varepsilon). \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $(\cdot)^*$ 表示复共轭操作。

定义 ICFO 检测的目标函数 $f_{\varepsilon,u}(\hat{\varepsilon})$ 为

$$\begin{aligned} f_{\varepsilon,u}(\hat{\varepsilon}) &\triangleq \frac{1}{30} \sum_{n=-31}^{-2} (G(n+\hat{\varepsilon})G(-n-1+\hat{\varepsilon})) \approx \\ &= \frac{1}{30} \sum_{n=-31}^{-2} (D_u(n+\hat{\varepsilon}-\varepsilon)D_u^*(-n-1+\hat{\varepsilon}-\varepsilon)). \end{aligned}$$

$$(D_u(-n-1+\hat{\varepsilon}-\varepsilon)D_u^*(n+1+\hat{\varepsilon}-\varepsilon)). \quad (7)$$

从式(7)中可以看出, 信道频率响应近似地被消除了。当 $\hat{\varepsilon} = \varepsilon$ 时, 式(7)变为

$$\begin{aligned} f_{\varepsilon,u}(\varepsilon) &\approx \frac{1}{30} \sum_{n=-31}^{-2} (D_u(n)D_u^*(-n)) \cdot \\ &= \frac{1}{30} \sum_{n=-31}^{-2} |D_u(n)|^2 |D_u(n+1)|^2 = 1. \end{aligned} \quad (8)$$

显而易见, $f_{\varepsilon,u}(\varepsilon)$ 的值独立于根指示 u , 这就意味着 ICFO 可以在不知道根指示 u 的情况下被直接检测。因此, ICFO 检测的判决准则定义为

$$\hat{\varepsilon}^* = \underset{\hat{\varepsilon} \in \{0, \pm 1, \pm 2, \pm 3\}}{\operatorname{argmin}} |f(\hat{\varepsilon}) - 1|. \quad (9)$$

式中: $|\cdot|$ 表示求绝对值操作; $\hat{\varepsilon}^*$ 为 ICFO 的判决结果。我们按照文献[1]将 ICFO 检测的搜索空间设置为 $\hat{\varepsilon} \in \{0, \pm 1, \pm 2, \pm 3\}$, 但是本文提出的算法可以工作在任意大小的搜索空间。

通过 ICFO 检测后, 我们利用经过 ICFO 补偿和归一化差分相关运算的 $G(n+\hat{\varepsilon}^*)$ 来检测扇区 ID。发送 PSS 的差分相关为 $D_u^*(n)D_u(n+1)$, 其中 $\hat{u} \in \{25, 29, 34\}$ 。我们定义扇区 ID 检测的目标函数 $g_{\hat{\varepsilon}^*,u}(\hat{u})$ 为

$$\begin{aligned} g_{\hat{\varepsilon}^*,u}(\hat{u}) &\triangleq \sum_{n=-31}^{-2} (G(n+\hat{\varepsilon}^*) + G^*(-n-1+\hat{\varepsilon}^*)) \times \\ &= (D_u^*(n)D_u(n+1)) \approx \\ &= \sum_{n=-31}^{-2} (D_u(n)D_u^*(n)D_u^*(n+1)D_u(n+1) + \\ &= D_u(-n)D_u^*(n)D_u^*(-n-1)D_u(n+1)). \end{aligned} \quad (10)$$

其中, 我们已经通过 ICFO 检测得到正确的 $\hat{\varepsilon}^* = \varepsilon$ 。因此, 当 $\hat{u} = u$ 时, $g_{\hat{\varepsilon}^*,u}(\hat{u})$ 的值将最大。因此, 扇区 ID 检测的判决准则定义为

$$\hat{u}^* = \underset{\hat{u} \in \{25, 29, 34\}}{\operatorname{argmax}} g_{\hat{\varepsilon}^*,u}(\hat{u}). \quad (11)$$

由于本文提出的算法将 ICFO 检测和扇区 ID 检测分离开来, 因此原来大小为 21 的搜索空间被减小为两个更小的搜索空间, 其大小分别为 7 和 3。式(10)中也利用了 PSS 的对称特性, 从而减少了运算复杂度。而且, 本文还发现根指示为 29 和根指示为 34 的发送 PSS 是共轭的, 即

$$D_{29}(n) = D_{34}^*(n), n = \pm 1, \dots, \pm 31. \quad (12)$$

则扇区 ID 检测的运算复杂度可以进一步地减少。

特别地, 一个复数乘法可以表示为

$$(a+bj)(c+dj) = ((c+d)(a-b) + (bc-ad)) + (bc+ad)j. \quad (13)$$

这需要 3 个实数乘法和 5 个实数加法。在计算

$$(a+bj)(c+dj)^* = ((c-d)(a-b) + (bc+ad)) + (bc-ad)j \quad (14)$$

时,可以在式 (13) 结果的基础上,只需要额外的一个实数乘法和两个实数加法。因此,我们可以先计算 $g_{\hat{\varepsilon}^*,u}$ (29),然后利用共轭特性来计算 $g_{\hat{\varepsilon}^*,u}$ (34),从而减少运算复杂度。

4 仿真结果与复杂度分析

在这一节中,我们通过蒙特卡洛仿真证明本文提出算法的性能。仿真条件设置为:系统带宽 10 MHz,FFT 大小 2 048, $N_{\text{ID}}^{(2)}$ 为 1, ICFO 为 -1, 仿真次数为 1 000 次。为了证明本文提出的算法在实际情况下的性能,在仿真中采用 LTE 标准中的信道模型。这 3 种信道模型分别为扩展步行模型 A (EPA)、扩展车行模型 A (EVA)、扩展典型城市模型 (ETU),具体参数如表 2 所示。

表 2 3 种信道模型及其主要参数

Tab. 2 The main parameters of three channel models

信道模型	信道抽头	时延扩展/ns	最大抽头延时/ns	最大多普勒频移/Hz
EPA	7	5	410	5
EVA	9	357	2 510	70
ETU	9	991	5 000	300

图 2 和图 3 分别为本文算法与文献 [1] 和文献 [3] 中的算法在 ICFO 和扇区 ID 的估计性能对比。图 2 是不同信道环境下的整数倍频偏估计性能对比,从图中可以看到,随着信噪比的增加,3 种算法的整数倍频偏估计的错误检测概率都呈现下降的趋势。当信噪比为 2 dB 时,两种算法的错误检测概率均达到了 10^{-2} 量级。在相同的信道环境下,串行估计的性能较联合估计的要好很多。

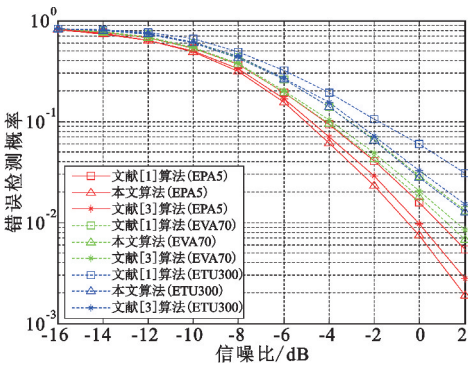


图 2 3 种信道下的 ICFO 检测性能

Fig. 2 Detection performance of the ICFO in three channel models

图 3 所示为不同信道环境下扇区 ID 估计性能,从图中可以看到,随着信噪比的增加,3 种算法的扇

区 ID 的错误检测概率都呈现下降的趋势,性能相差不大。当信噪比为 -5 dB 时,3 种算法在各种信道环境下的错误检测概率都达到了 10^{-2} 量级,串行估计算法在 3 种信道中都要比联合估计的要好。

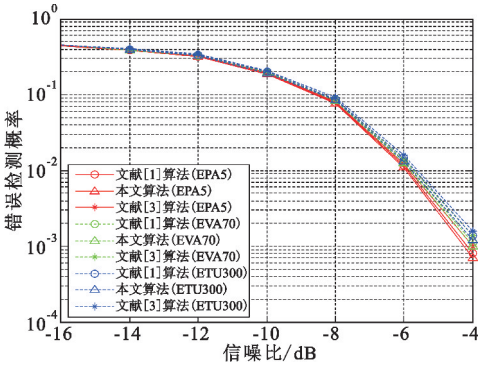


图 3 3 种信道下的扇区 ID 检测性能

Fig. 3 Detection performance of the sector ID in three channel models

为了对比这两种检测算法的运算复杂度,我们将所有的复数乘法和加法转换为实数乘法和加法。具体的运算复杂度对比在表 3 中列出。由于前面提到的对称特性和共轭特性,与文献 [1] 中的算法相比,本文提出的算法的实数乘法和实数加法分别减少了 66.6% 和 69.4%。

表 3 两种算法的复杂度对比

Tab. 3 The complexity comparison between two algorithms

算法	实数乘法	实数加法
文献 [1] 算法	4 017	9 201
文献 [3] 算法	4 017	9 159
本文提出算法	1 341	2 811

5 结束语

本文对 LTE 系统小区搜索过程中整数倍载波频偏 ICFO 和扇区 ID 的检测进行了研究,提出了一种串行的 ICFO 和扇区 ID 检测方法。该算法将传统的联合检测算法的搜索空间分离为两个更小的搜索空间,从而降低了运算复杂度并且提高了检测精度。由于本文是针对整数倍频偏来研究的,因此在未来的研究中,我们将频偏扩大为非整数倍频偏进行研究。另外,本文是对小区搜索过程中的小部分模块进行仿真验证,在接下来的工作中,我们将对小区搜索进行系统研究。

参考文献:

[1] TSAI P Y, CHANG H W. A new cell search scheme in

- 3GPP long term evolution downlink OFDMA systems [C]//Proceedings of 2009 International Conference on Wireless Communications & Signal Processing Conference (WCSP 2009). Nanjing: IEEE, 2009: 1-5.
- [2] LIN J C, SUN Y T. Initial synchronization assisted from inherent diversity on LTE sector search process [C] // Proceedings of 2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). New Orleans, LA: IEEE, 2015: 1-5.
- [3] SU S L, LIN Y C, FAN Y J. Joint sector identity and integer part of carrier frequency offset detection by phase-difference in long term evolution cell search process [J]. IET Communications, 2013, 7(10): 950-959.
- [4] HUANG S, SU Y, HE Y, et al. Joint time and frequency offset estimation in LTE downlink [C]//Proceedings of 2012 7th International ICST Conference on Communications and Networking in China (CHINACOM). Kunming: IEEE, 2012: 394-398.
- [5] MORETTI M, MORELLI M. A robust maximum likelihood scheme for PSS detection and integer frequency offset recovery in LTE systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(2): 1353-1363.
- [6] 刘娜娜, 赵新建. 基于变换域的简化 LTE 小区搜索算法 [J]. 电讯技术, 2010, 50(8): 81-85.
- LIU Nana, ZHAO Xinjian. A simplified LTE cell search algorithm based on transform-domain [J]. Telecommunication Engineering, 2010, 50(8): 81-85. (in Chinese)
- [7] WANG D, SHI W, LI X. Low-complexity carrier frequency offset estimation algorithm in TD-LTE [J]. Journal of Networks, 2013, 8(10): 2220-2226.
- [8] WU J Y, LIU J, CHEN J, et al. Cooperative interference mitigation for indoor dense femtocell networks [C]//Proceedings of 2012 7th International ICST Conference on Communications and Networking in China (CHINACOM). Kunming: IEEE, 2012: 93-98.

作者简介:



张德民(1955—),男,广东梅州人,1988年毕业于北京邮电大学获硕士学位,现为重庆邮电大学教授、硕士生导师,主要研究方向为通信与信息系统;

ZHANG Demin was born in Meizhou, Guangdong Province, in 1955. He received the M. S. degree from Beijing University of Posts and Telecommunications in 1988. He is now a professor and also the instructor of graduate students His research concerns communication and information system.

Email: zhangdm@cqupt.edu.cn

谭博(1990—),男,河南商丘人,硕士研究生,主要研究方向为 TD-LTE 物理层算法及 DSP 开发;

TAN Bo was born in Shangqiu, Henan Province, in 1990. He is now a graduate student. His research concerns TD-LTE physical layer algorithm and DSP development.

Email: 772807236@qq.com

黄菲(1991—),男,重庆人,硕士研究生,主要研究方向为 TD-LTE 物理层算法及 DSP 开发;

HUANG Fei was born in Chongqing, in 1991. He is now a graduate student. His research concerns TD-LTE physical layer algorithm and DSP development.

Email: 1712423608@qq.com

杨程(1990—),男,湖北孝感人,硕士研究生,主要研究方向为 TD-LTE 物理层算法及 DSP 开发;

YANG Cheng was born in Xiaogan, Hubei Province, in 1990. He is now a graduate student. His research concerns TD-LTE physical layer algorithm and DSP development.

Email: 385806120@qq.com

王丹(1981—),女,重庆人,高级工程师,主要研究方向为 TD-LTE 物理层算法及 DSP 开发。

WANG Dan was born in Chongqing, in 1981. She is now a senior engineer. Her research concerns TD-LTE physical layer algorithm and DSP development.

Email: wangd@cqupt.edu.cn