

LTE-A 系统中主同步信号重叠分段检测算法

李琳潇,程 方,李慧敏

(重庆邮电大学 通信与信息工程学院,重庆 400065)

摘 要: 针对 LTE-A 系统中频域快速相关算法计算复杂度高、检测性能不稳定的问题,提出一种主同步信号重叠分段检测算法。通过序列循环操作延长半帧数据尾部,以保证序列的完整性。在此基础上,利用重叠分段操作降低相关复杂度,并根据门限值操作结果判断同步序列是否检测成功。仿真结果表明,该算法的计算复杂度相比频域快速相关算法减少 53.85%,且对于不同的分段数,当信噪比为 -7 dB 时,正确检测率接近 1.0,检测性能稳定。

关键词: LTE-A 系统; 同步信号; 频域快速相关算法; 序列循环延迟; 重叠分段

中文引用格式: 李琳潇,程方,李慧敏. LTE-A 系统中主同步信号重叠分段检测算法[J]. 计算机工程,2019,45(7): 103-107.

英文引用格式: LI Linxiao, CHENG Fang, LI Huimin. Overlapping segmentation detection algorithm of primary synchronization signal in LTE-A system[J]. Computer Engineering, 2019, 45(7): 103-107.

Overlapping Segmentation Detection Algorithm of Primary Synchronization Signal in LTE-A System

LI Linxiao, CHENG Fang, LI Huimin

(School of Communication and Information Engineering,

Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

[Abstract] Aiming at the problems such as high computational complexity and instability of detection performance of the fast frequency domain correlation algorithm in LTE-A system, an primary synchronization signal overlapping segmentation detection algorithm is proposed. Through the sequence loop method, the tail of the half frame data is extended to ensure sequence integrity. On this basis, the overlapping segmentation is performed to reduce the related complexity and according to the result of threshold operation, whether the synchronization sequence is successfully detected is determined. Simulation results show that, compared with the fast frequency domain correlation algorithm, the computational complexity of the proposed algorithm is reduced by 53.85%, and for different segmentation numbers, the correct detection rate approaches 1.0 when the Signal-to-Noise Ratio (SNR) is -7 dB, which shows a stable detection performance.

[Key words] LTE-A system; synchronization signal; fast frequency domain correlation algorithm; sequence loop delay; overlapping segmentation

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0050861

0 概述

LTE 是第三代合作伙伴计划 (3rd Generation Partnership Project, 3GPP) 中针对未来无线通信系统开发的用于高数据速率传输的标准^[1-2]。LTE 系统增加了小区边缘的比特率,降低了传输时延和成本,并且为移动终端提供了较高的频谱利用率、简化的网络架构、无缝的移动性和合理的功耗^[3-4]。

小区搜索是用户设备 (User Equipment, UE) 上电之后首先进行的步骤,从而获得目标小区 ID 号以

及随机接入过程等,之后才能进行正常通信。小区搜索的成功执行以及初始系统信息获取是 UE 与网络通信之前的先决条件。为实现资源的充分利用,3GPP 组织在最新的 LTE 协议中添加了终端到终端 (Device to Device, D2D) 技术, D2D 对于同步的频繁程度和时效性要求更高,对于同步的高效性和稳定性的研究将更有价值。因此,同步对于整个通信网络具有研究意义。

本文介绍 LTE-A 系统中的主同步信号 (Primary Synchronization Signal, PSS) 和辅同步信号 (Secondary

基金项目: 国家科技重大专项 (2015ZX03001013); 重庆市重点产业共性关键技术创新专项 (cstc2017zdcy-zdxx0030)。

作者简介: 李琳潇 (1993—), 女, 硕士研究生, 主研方向为宽带通信网测试; 程 方, 教授; 李慧敏, 硕士研究生。

收稿日期: 2018-03-20 **修回日期:** 2018-05-18 **E-mail:** 302778461@qq.com

Synchronization Signal, SSS), 研究不同双工模式下同步信号的帧结构位置以及 PSS 信号的生成和性质, 分析滑动相关算法、分段相关算法和频域快速相关算法存在的不足, 在此基础上设计改进的频域重叠分段相关算法。

1 同步序列

LTE 定义了 2 个下行同步信号: PSS 和 SSS。PSS 信号是由长度为 63 点的 Zadoff-Chu (ZC) 序列生成的, SSS 检测只有在成功识别 PSS 后才能执行, 因此, 整个下行链路 (Down Link, DL) 的同步性能在很大程度上依赖于 PSS 检测过程^[5-7]。

在 LTE 系统中, 数据在 10 ms 无线帧中传输, 每个无线帧有 10 个 1 ms 的子帧, 每个子帧包含 2 个时隙, 每个时隙 0.5 ms。LTE 共有 504 个物理小区识别, 被分为 168 组, 小区 ID 号 $N_{id}^{(2)} = 3N_{id}^{(1)} + N_{id}^{(2)}$, 其中, $N_{id}^{(1)} = \{0, 1, \dots, 167\}$ 是小区 ID 组号, $N_{id}^{(2)} = \{0, 1, 2\}$ 是每个 ID 组内的小区 ID 号。

PSS 检测和 SSS 检测是小区搜索的第一步, PSS 和 SSS 都对称地位于中心 72 个子载波上, 每 5 ms 由基站发送一次, 以便终端接收信息。无线帧结构内的同步序列的位置取决于采用的双工模式和循环前缀^[8]。如图 1 所示: 在频分双工模式 (Frequency Division Duplexing, FDD) 中, PSS 和 SSS 分别位于第 1 个和第 11 个时隙的最后一个 OFDM 符号和倒数第 2 个 OFDM 符号上; 在时分双工模式 (Time Division Duplexing, TDD) 中, PSS 位于第 2 个和第 12 个时隙的第 3 个 OFDM 符号上, SSS 位于第 1 个和第 10 个时隙的 OFDM 符号上。

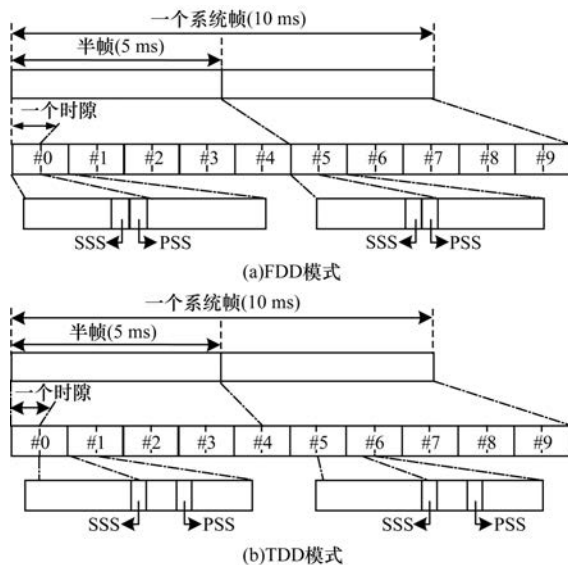


图 1 FDD 和 TDD 模式下的 PSS、SSS 位置

PSS 信号由 Zadoff-Chu 序列生成, 如式 (1) 所示, 其中 u 的取值与 $N_{id}^{(2)}$ 对应的关系如表 1 所示。

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

表 1 根序号 u 与 $N_{id}^{(2)}$ 的对应关系

$N_{id}^{(2)}$	u
0	25
1	29
2	34

2 主同步信号同步算法

2.1 滑动相关算法

将接收信号 PSS 序列直接与本地 3 组信号 PSS 序列进行滑动相关^[9], 度量函数为:

$$S_u(n) = \frac{|\alpha_u(n)|}{\beta_u(n)} = \frac{|\sum_{k=1}^N r^*(k+n)d_u(k)|}{(\sum_{k=1}^N |r(n+k)|^2 + \sum_{k=1}^N |d_u(k)|^2)/2} \quad (2)$$

其中, $\alpha(n)$ 表示接收信号与根序号为 u 的本地信号互相关值, $\beta(n)$ 表示接收信号与本地信号的能量均值。

2.2 分段相关算法

将接收信号 PSS 序列和本地信号 PSS 序列均分为 M 段, 每段长度为 L 。采用滑动相关的方法将接收信号与本地 3 组信号分别做相关^[10-11], 其度量函数为:

$$S_u(n) = \sum_{m=0}^{M-1} |\sum_{k=1}^L r^*(n+k+mL)d_u(k+mL)| \quad (3)$$

其中, $L = N/M$, N 表示一个 OFDM 的长度。

2.3 频域快速相关算法

对接收信号进行滤波和 16 倍降采样, 对本地信号进行翻转和傅里叶变换, 进而在频域求得相关性^[12]。将互相关的过程通过反转和补零的方式转换为线性卷积, 利用 FFT 的循环移位特性^[13], 转换为圆周卷积。度量函数为:

$$S_u(n) = \text{IDFT}[S_u(K)] = \text{IDFT}[R(K)D_u(K)] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{L-1} R(K)D_u(K)W_L^{-Kn}, n=0, 1, \dots, L-1 \quad (4)$$

其中, $W_L^{-Kn} = e^{j2\pi Kn/L}$, 为傅里叶变换的计算因子。

当定时度量函数取得最大值时, 即可得到定时同步点位置 \hat{n} 和小区组内 ID 号 $N_{id}^{(2)}$ 。

$$\{\hat{n}, \hat{u}\} = \arg \max_{n, u} \{S_u(n)\} \quad (5)$$

2.4 重叠分段检测算法

LTE 系统最大支持 20 MHz 带宽, 半帧码片长度达到 153 600 chips。在满足循环卷积条件和最优条件的情况下, 循环卷积长度达到 2^{18} , 即使在 16 倍降采样条件下, 半帧采样为 9 600 点, 循环卷积长度也达到 2^{14} , 若采用 128 点的滑动相关算法, 需要 9 600 次复数乘法, 运算量太大, 造成大量资源的消耗^[14-15]。针对上述问题, 本文提出分段重叠检测算

法,对半帧采样序列进行循环后移以保证同步序列的完整性,然后以固定长度进行重叠分段,重叠序列的长度和阶数根据需要进行调整,对得到的每一段序列和3组本地序列进行循环卷积得到分段相关结果,将分段数据按照次序进行拼接,以还原线性相关的结果,最终根据求得的功率值进行峰值门限值判断以确定小区组内ID号。分段重叠检测算法整体流程如图2所示。

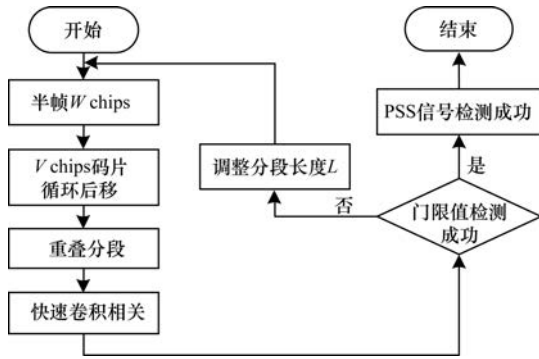


图2 分段重叠检测算法流程

2.4.1 序列循环操作

在半帧无线帧长度的序列上进行滑动相关和分段相关时,会造成尾端 V 位数据的浪费,影响同步序列的完整性,导致同步失真。因此,本文提出序列循环的解决方法:主辅同步序列在无线帧的前半帧和后半帧的位置相同,且前后半帧对称,可以认为前后半帧码片近似一样,即将序列看作循环序列,因此,将半帧无线帧头部长度 V 的码片复制到尾部,以确保同步序列的完整性,具体操作如图3所示。

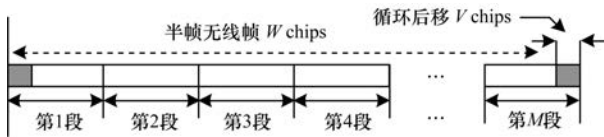


图3 序列尾部延长操作示意图

循环后移后的码片序列为:

$$x(m) = \{x(1), x(2), \dots, x(W), x(1), x(2), \dots, x(V)\} \quad (6)$$

其中, $m = 1, 2, \dots, Z, Z = W + V$ 为循环后移后的码片总长度。

2.4.2 重叠分段操作

重叠分段是以固定长度的码片对循环复制后的 $(W + V)$ chips码片进行分段,若每段码片长度为 L ,则第 i 段分段序列如式(7)所示。

$$x_i(n) = \begin{cases} x(iL - (i-1)H_j - n), & i=1, 2, \dots, M-1; \\ x(Z - n), & i=M; j=J \end{cases} \quad (7)$$

其中, $n = 0, 1, \dots, L-1, J = \lfloor Z/L \rfloor$ 为重叠阶数, $M = J+1$ 为分段数, $H_j = \begin{cases} h_1, & j=1, 2, \dots, J-1 \\ h_2, & j=J \end{cases}$ 为重叠长度,

$$h_1 = \lfloor \frac{L - \text{mod}(Z, L)}{J} \rfloor + 1, h_2 = LJ - (J-1)h_1 - (Z-L).$$

具体的重叠分段操作过程如图4所示。

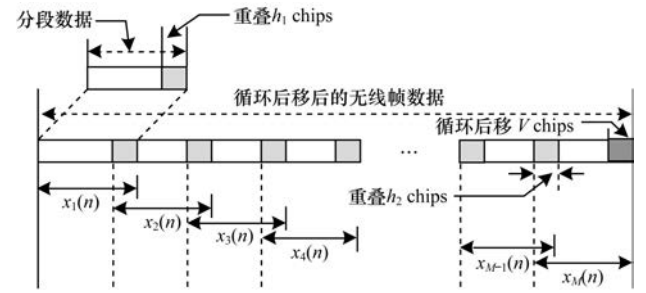


图4 重叠分段操作示意图

将重叠分段后的每一段码片和本地序列进行相关得到的分段相关结果,如式(8)所示。将最后的数据按照 i 的次序进行拼接,以还原线性相关的结果,得到最终的相关结果。

$$S_{i,u}(n) = \sum_{k=0}^{L-1} d_u(k) x_i^*(n+k) = \sum_{k=0}^{L-1} d_u(k) x_i^*((n-k))_L R_L(n) \quad (8)$$

相关运算中的DFT和IDFT都采用FFT快速算法,并将线性卷积转化为循环卷积,从而提高循环卷积相关算法的计算速度。

3 仿真结果与分析

3.1 分段数分析

对于不同的分段长度,分别对比定时同步点位置和检测概率的不同,进而分析算法的检测性能。

图5~图7显示了 $L=1024$ 、 $L=2048$ 、 $L=4096$ 时接收信号与本地PSS序列相关性结果。可以看出,接收信号与本地PSS0序列有非常高的峰值,而与其他2个PSS序列没有明显的峰值,因此,可以得到接收信号与PSS0序列相关程度最大,即 $N_{id}^{(2)}=0$ 。其中PSS0、PSS1、PSS2序列分别对应的根序号 $u=25, 29, 34$ 。

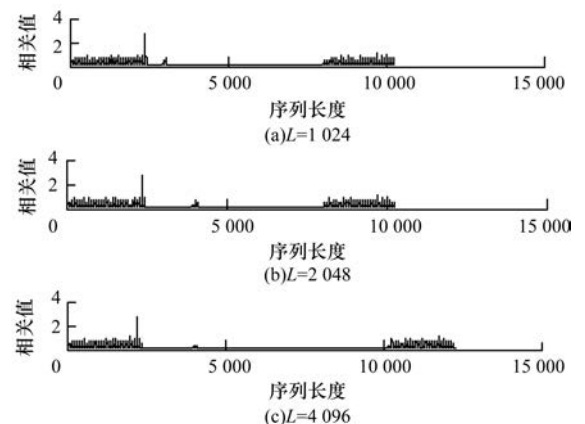


图5 不同分段长度接收信号与PSS0序列的相关性

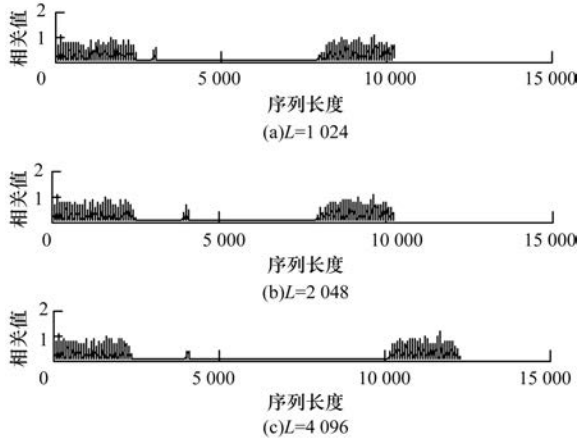


图 6 不同分段长度接收信号与 PSS1 序列的相关性

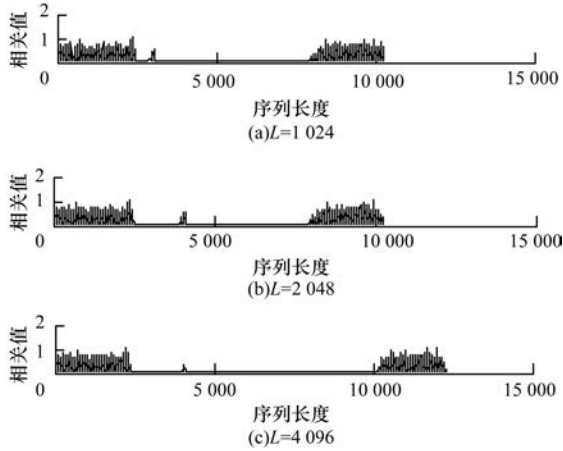


图 7 不同分段长度接收信号与 PSS2 序列的相关性

由于分段长度的不同,图 5 中所对应峰值的位置也不同,此峰值位置并不是最终的定时点位置,通过计算可以得到不同分段数的定时位置。定时位置为:

$$\hat{n} = \lfloor \frac{n-1}{L} \rfloor L + \text{mod}((n-1), L) + 1 \quad (9)$$

当 L 分别取 4 096、2 048 和 1 024 时,得到的定时位置均为 2 261,由此可知,该改进的方法的检测性能并不受分段长度的影响,鲁棒性强。

图 8 显示了 AWGN 信道 0 kHz 频偏条件下,不同算法的主同步信号检测正确率,可以看出,相对于其他算法,本文算法的主同步信号正确检测率有了很大的提高,虽然对于不同的分段长度,正确检测率变化不大,但在信噪比为 -7 dB 时,正确检测率接近 1.0,且信噪比每增加 1 dB,正确检测率增加 40%。

图 9 显示了 AWGN 信道 10 kHz 频偏条件下不同算法的主同步信号正确检测率。可以看出,相较于图 8,其他算法的概率曲线有所下降,但整体趋势不变,抗频偏性能较弱;而本文算法曲线变化不大,且随着分段长度 L 的增大,抗频偏性能增强,但是由

图 10 所示的时间性能分析结果可以看出,时间性能却随之降低,即抗频偏性能是以牺牲时间性能为代价的。

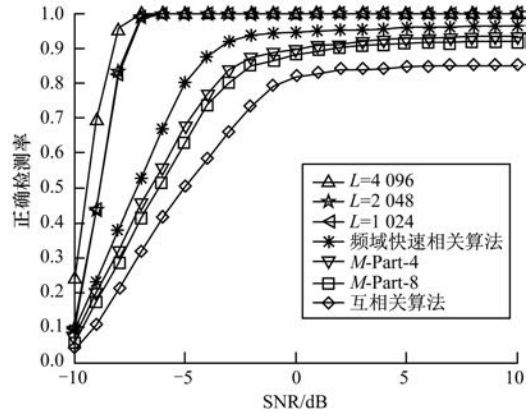


图 8 AWGN 信道 0 kHz 频偏主同步信号正确检测率

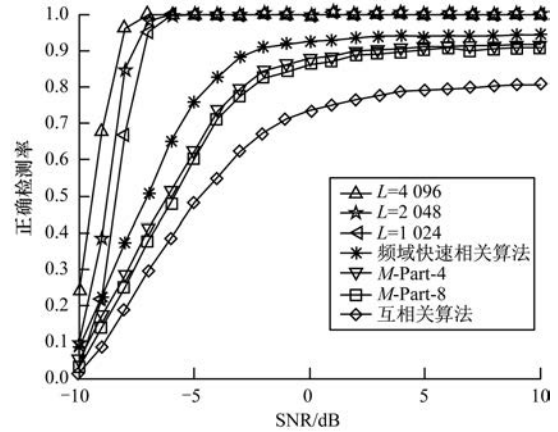


图 9 AWGN 信道 10 kHz 频偏主同步信号正确检测率

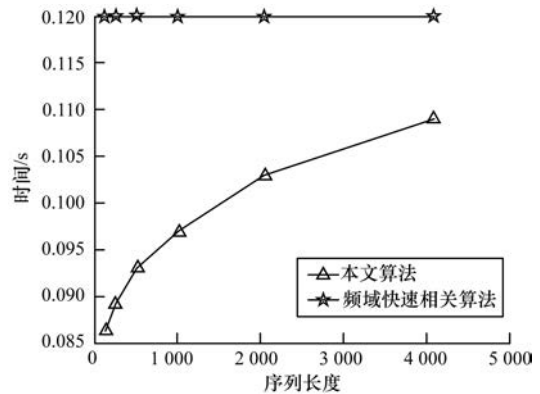


图 10 时间性能比较

3.2 精同步定时位置确定

经过上述步骤得到了粗定时同步点的位置为 2 216,还原到未降采样之前的位置为 36 161,在此位置截取 L 点长度,再次与本地信号做相关,得到精确的同步定时点位置。针对不同的分段数,精同步位置点是一样的,在此仅描绘出 $L=1 024$ 时的精同步位置点,如图 11 所示。可以看到,精确同步定时图

有明显的峰值,且位置为 287,得到精确同步定时位置为: $36\ 161 - (1\ 024/2 - 287) = 35\ 936$ 。

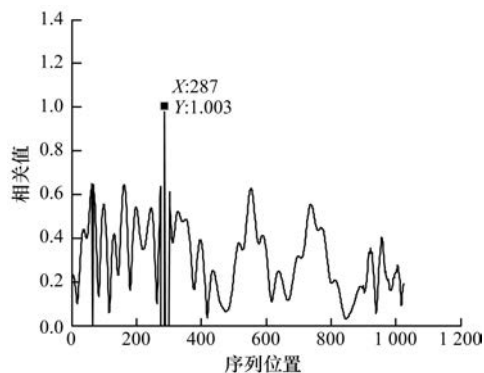


图 11 $L = 1\ 024$ 时的精同步定时位置

3.3 复杂度分析

PSS 序列每 5 ms 发送一次,半帧共有 153 600 字节长度,16 倍降采样之后减小到 9 600 点长度,滑动相关算法复数乘法和复数加法次数分别为 $9\ 600 \times 128 \times 3 = 3\ 686\ 400$ 和 $9\ 600 \times 127 \times 3 = 3\ 657\ 600$;分段相关算法复数乘法和复数加法次数分别为 $M \times L \times 9\ 600 \times 3$ 和 $(M - 1) \times (L - 1) \times 9\ 600 \times 3$;频域快速相关算法复数乘法和复数加法次数分别为 499 200 和 998 400;本文算法复数乘法和复数加法次数分别为 $(4n + 3) \times L/2 \times \lg L + 3nL$ 和 $(4n + 3) \times L \times \lg L$,具体计算复杂度数据如表 2 所示。从频域快速相关算法的复乘和复加计算公式中可以看出,计算量随着 L 的增大而增加。当 $L = 1\ 024$ 时,得到所需要的复数乘法和复数加法次数分别为 250 880 和 440 320,可以看到计算量减小了 53.85%。综上所述,本文算法具有稳定的定时性和较强的鲁棒性,且计算复杂度低。

表 2 计算复杂度比较

算法	复乘	复加	总和
滑动相关算法	3 686 400	3 657 600	7 344 000
分段相关算法 ($M = 8$)	3 686 400	3 024 000	6 710 400
分段相关算法 ($M = 4$)	3 686 400	2 678 400	6 364 800
频域快速相关算法	499 200	998 400	1 497 600
本文算法 ($L = 4\ 096$)	405 504	737 280	1 142 784
本文算法 ($L = 2\ 048$)	289 792	518 144	807 936
本文算法 ($L = 1\ 024$)	250 880	440 320	691 200

4 结束语

随着基站部署密度和用户活动范围的增大,小区重选和切换的频率随之增大,因此,减少主同步时间和降低资源消耗极其重要。针对频域快速相关算法资源消耗过大的问题,本文提出重叠分段算法,以实现信号快速相关求解,减少资源利用,提高检测性

能。仿真结果表明,该算法的正确检测率较高,能够满足 LTE 系统同步算法的要求。后续将研究高速和超高速模式下针对边缘用户同步问题的检测算法,以进一步提高同步效率。

参考文献

- [1] 陈禹. LTE TDD 物理层过程关键技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2010.
- [2] BASSEM I. Design and implementation of synchronisation and cell search algorithms for LTE receiver[C]//Proceedings of the 32nd National Radio Science Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2015: 313-322.
- [3] ZHANG Zhongshan. Improved cell search and initial synchronization [C]//Proceedings of the 75th IEEE Vehicular Technology Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2012: 1-5.
- [4] SRIHARSHA M. A complete cell search and synchronization in LTE [J]. Journal on Wireless Communications and Networking, 2017(1): 101-106.
- [5] SHOBA B. Low complex primary and secondary synchronization signal structure design for LTE systems [C]//Proceedings of International Conference on Microwave. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2015: 467-470.
- [6] LIN J C, SUN Yuting. Initial synchronization exploiting inherent diversity for the LTE-A sector search process [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(2): 1114-1128.
- [7] 李先驰, 朱宇. 一种鲁棒的 3GPP-LTE-A 下行链路初始主同步算法 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016, 14(2): 212-218.
- [8] 郭伟. TD-LTE 系统中同步技术的研究与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [9] 漆飞. LTE 系统中一种低复杂度的 PSS 定时同步算法 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(4): 578-582.
- [10] ZHANG Zhongshan. Low-complexity cell search with fast PSS identification in LTE [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(4): 1719-1728.
- [11] MORELLI M. A robust maximum likelihood scheme for PSS detection and integer frequency offset recovery in LTE-A Systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(2): 1353-1362.
- [12] 李路. TD-LTE 系统中主同步信号频域快速同步算法 [J]. 科学技术与工程, 2016, 16(10): 174-177.
- [13] 施隆照, 郭冀闽. MIMO-OFDM 系统中低功耗 FFT/IFFT 处理器设计 [J]. 计算机工程, 2016, 42(7): 16-21.
- [14] 蒋青, 卢伟. 多通道并行 TD-LTE 小区搜索架构设计与 FPGA 实现 [J]. 重庆邮电大学学报, 2017, 29(4): 433-440.
- [15] SILVA C E M, DOLECEK G J. Cell search in long term evolution systems; primary and secondary synchronization [C]//Proceedings of the 3rd Latin American Symposium on Circuits and Systems. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2017: 1-3.

编辑 金胡考