

文章编号: 2095-4980(2016)03-0350-05

一种新的同频小区检测方法

方圆驰, 胡 蝶

(复旦大学 通信科学与工程系 上海 200433)

摘 要: 为了提高频谱资源利用率, 3GPP 长期演进(LTE)在组网时通常采用同频组网的方式, 但相邻小区之间因此会产生同频干扰问题。同频干扰加大了小区检测的难度, 特别是当 2 个小区使用相同的主同步信号(PSS)时。在这种情况下, 由于很难直接通过 PSS 估计出辅同步信号(SSS)所在位置的信道频域响应(CFR), 因此极大降低了弱信号小区的检测成功率。为了解决该问题, 本文提出一种同频干扰下的 LTE 小区检测的方法。所提方法首先对小区接收信号进行合理建模, 通过求解方程组的方式估计出强信号小区的 CFR, 然后进行干扰抵消, 之后进行弱信号小区的检测。仿真结果表明, 所提方法能大幅提高弱信号小区的检测成功率, 当信噪比(SNR)等于 10 dB 时, 有 70%的检测成功率; SNR 等于 20 dB 时, 有 90%以上的成功率, 相较普通小区检测法的 50%有显著进步。

关键词: 长期演进; 同频干扰; 小区检测; 正交频分复用; 辅同步信号

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201603.0350

A new cell detection algorithm under co-channel interference environments

FANG Yuanchi, HU Die

(Communication Science and Engineering Department, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: To improve the spectral efficiency, 3rd Generation Partnership Project(3GPP) Long Term Evolution(LTE) usually adopts frequency reuse-1 system, which leads to co-channel interference among neighbor cells. Co-channel interference increases the difficulty of cell detection, especially when two neighbor cells use the same Primary Synchronization Signal(PSS). In such cases, since it is difficult to obtain the channel frequency response(CFR) for the Secondary Synchronization Signal(SSS) by directly using the PSS, the detection rate for the cell with weak signal will significantly degrade. To address the above issue, this paper proposes a cell detection algorithm for the LTE system with co-channel interference. The proposed method first presents a reasonable model for the received signals, and then estimates the CFR of the cell with strong signal by solving the equations. After that, the interference is cancelled and the cell with weak signal is detected. Simulation results show that the proposed algorithm can significantly improve the detection rate of the cell with weak signal. Even when Signal-Noise Ratio(SNR) is 10 dB, the detection rate of the proposed algorithm can achieve 70%. When SNR is 20 dB, the detection rate can be above 90%, which significantly outperforms the typical cell detection algorithm whose detection rate is only 50%.

Key words: Long Term Evolution; co-channel interference; cell detection; Orthogonal Frequency-Division Multiplexing; Secondary Synchronization Signal

在无线移动通信中, 移动终端无论是开机, 还是通信过程中切换小区, 都需进行小区搜索。小区搜索是终端与基站建立通信链路的基础和前提^[1]。长期演进(LTE)是 3GPP 制定的新一代移动通信标准, 在 LTE 系统中, 终端通过利用主同步信号(PSS)和辅同步信号(SSS)完成小区搜索, 即终端首先利用 PSS 检测出小区标识组内编号(即 $N_{ID}^{(2)}$), 并完成符号定时和频偏校正, 然后利用 SSS 检测出小区标识组号(即 $N_{ID}^{(1)}$), 并进行 10 ms 帧定时。

收稿日期: 2015-11-11; 修回日期: 2016-01-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61540026)

由于频谱资源有限,为提高频谱效率,LTE 通常采用同频方式进行组网,由此会带来小区之间的同频干扰,进而影响小区检测的成功率。对于 2 个小区的场景(即一个强信号小区和一个弱信号小区),已有的普通的同频小区检测方法主要是通过 PSS 首先估计出强信号小区的信道频响(CFR),该 CFR 也是 SSS 所在位置的 CFR^[2],然后通过干扰抵消减少强信号小区的影响,接着再通过相关操作来检测弱信号小区^[3]。

然而,当相邻小区的 PSS 序列相同时,上述方法将会失效。因为利用 PSS 做出的信道估计将会受到相邻小区信道的干扰,从而导致重构强信号小区 SSS 的失败,并最终导致弱信号小区检测的失败。事实上,根据 3GPP-LTE 协议,主同步信号有且仅有 3 个正交序列,因此在实际系统中,相邻小区使用相同 PSS 的情况十分常见。

文献[4]首先提到了使用相同 PSS 的问题,但文中提出的方法需要在基站端对信号进行预编码处理,并且事先需要对正交相位旋转矢量(Orthogonal Phase Rotation Vectors, OPRV)进行完整规划,不具有普遍性。文献[3]提出一种基于 SSS 的正交性来进行小区检测的方法。在实际中,SSS 的正交性并不好,因此会导致小区检测的失败。文献[5]提出一种有效的同频小区检测方法,但该方法需要事先知道信道的统计特性才能对信道进行有效估计。

针对 2 个小区使用相同 PSS 的小区检测问题,本文提出一种基于求解方程组的同频小区检测方法,通过合理建模和干扰抵消来完成小区检测。所提算法不需要信道的先验信息,具有较好的普适性。仿真结果显示,所提算法可以极大提高弱信号小区的检测成功率。

1 系统模型

根据 3GPP-LTE 协议的规定,在下行无线数据帧结构中,1 个 10 ms 的帧被分为 10 个子帧,每个子帧包括 2 个时隙,每个时隙 0.5 ms。一般而言,每个时隙包含 7 个正交频分复用(OFDM)符号。在一帧内,PSS 和 SSS 会分别传输 2 次,每次传输的 PSS 相同而 SSS 不同。频分双工(Frequency Division Duplexing, FDD)和时分双工 TDD(Time Division Duplexing, TDD)模式下的 PSS 和 SSS 的时域结构并不相同^[6],如图 1 和图 2 所示。在 FDD 模式下,PSS 位于第 0 个和第 10 个时隙的最后一个 OFDM 符号中,SSS 则总是位于 PSS 前的一个 OFDM 符号中;而 TDD 模式中,PSS 位于第 2 个时隙和第 12 个时隙的第 2 个 OFDM 符号中,SSS 则总是位于 PSS 之前的 3 个 OFDM 符号中^[7]。

PSS 序列由 Zadoff-Chu(ZC)序列构成,而 SSS 序列则由 2 个长为 31 的 m 序列加扰后映射得到,具体生成方式在协议^[8]中有详细描述。

假设 1 个双小区 LTE 系统完全同步,2 个小区使用相同 PSS 序列和不同的 SSS 序列。考虑连续的 2 帧,每帧的子帧 0 中子载波 k 上的接收信号可表示为:

$$Y_{\text{PSS}}^{(i)}(k) = H_{a,\text{PSS}}^{(i)}(k)P(k) + H_{b,\text{PSS}}^{(i)}(k)P(k) + w_1^{(i)}(k) \quad (1)$$

$$Y_{\text{SSS}}^{(i)}(k) = H_{a,\text{SSS}}^{(i)}(k)S_a(k) + H_{b,\text{SSS}}^{(i)}(k)S_b(k) + w_2^{(i)}(k) \quad (2)$$

式中: $i=1,2$, 分别表示第 1 帧和第 2 帧; $k=0,1,\dots,61$, 表示发送的 PSS 信号的第 k 个值, $S_a(k)$ 为强信号小区发送的 SSS 信号的第 k 个值; $S_b(k)$ 为弱信号小区发送的 SSS 信号的第 k 个值; $H_{a,\text{PSS}}(k)$ 和 $H_{b,\text{PSS}}(k)$ 分别表示 $P(k)$ 所对应的子载波上强信号小区和弱信号小区的 CFR; $H_{a,\text{SSS}}(k)$ 和 $H_{b,\text{SSS}}(k)$ 分别表示 $S_a(k)$ 和 $S_b(k)$ 所对应的子载波上强信号小区和弱信号小区的 CFR; w_1 和 w_2 是加性高斯白噪声,服从均值为 0, 方差为 N_0 的复高斯分布。

若 PSS 已经正确检测,则小区检测的目标就是检测出 $S_a(k)$ 和 $S_b(k)$, 从而获得强信号和弱信号小区的小区

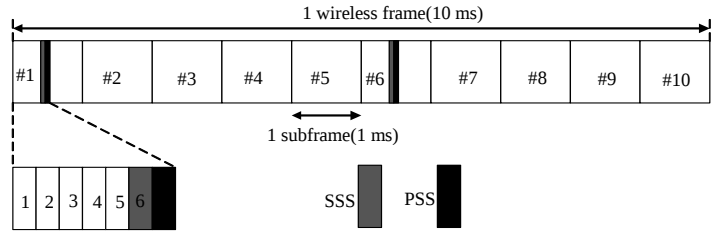


Fig.1 PSS and SSS time domain structure in FDD mode

图 1 FDD 模式下 PSS 和 SSS 时域结构

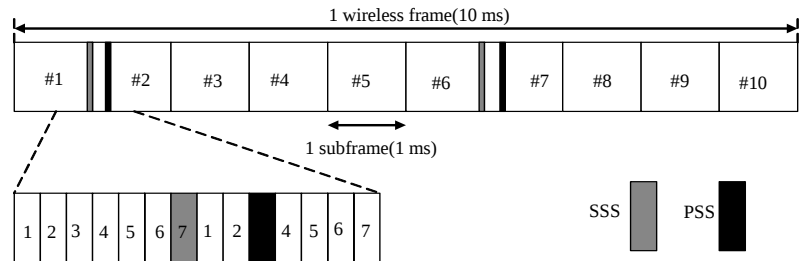


Fig.2 PSS and SSS time domain structure in TDD mode

图 2 TDD 模式下 PSS 和 SSS 时域结构

标识组号 $N_{\text{ID}}^{(1)}$ 。

2 已有的小区检测算法

已有的普通的小区检测法首先通过 PSS 来估计强信号小区 CFR, 然后通过干扰抵消减少强信号小区对弱信号小区的影响, 最后通过相关来检测出弱信号小区。具体步骤如下:

- 1) 通过相关检测法检测出 $S_a(k)$, 从而获得强信号小区标识组号 $N_{\text{ID}}^{(1)}$;
- 2) 利用 PSS 估计出强信号小区的 CFR, 即 CFR 的估计为 $P(k)$;
- 3) 进行干扰抵消, 消除强信号小区对弱信号小区的干扰;
- 4) 利用相关检测法检测出弱信号小区标识组号。

当 2 个小区采用不同 PSS 时, 上述检测方法能比较有效地检测出弱信号小区, 但当 2 个小区采用相同 PSS 时, 第 2)步对强信号小区的信道估计将会包括弱信号小区的信道信息, 即:

$$\hat{H}_{a,\text{PSS}} = H_{a,\text{PSS}} + H_{b,\text{PSS}} + w \quad (3)$$

然后已有小区检测算法将 $H_{a,\text{PSS}}(k)$ 作为强信号小区 SSS 序列所在位置的信道估计, 对强信号小区进行干扰抵消, 即:

$$Y_{b,\text{SSS}}^{(i)}(k) = Y_{\text{SSS}}^{(i)}(k) - \hat{H}_{a,\text{PSS}}^{(i)}(k)S_a(k) \quad (4)$$

对式(4)所得的 $H_{b,\text{SSS}}(k)$ 进行相关检测即得到弱信号小区的小区标识组号。由于此时的信道估计并不准确, 干扰消除的效果并不理想, 尤其是当 2 个小区之间功率相差不大的时候, 将很可能导致弱信号小区检测的失败。

3 所提的同频小区检测算法

从第 2 节可以看到, 由于信道估计的不准确, 将导致干扰抵消的效果急剧下降, 最终使得弱信号小区检测失败。所以同频小区检测的关键是要获得准确的信道估计。本文提出一种基于解方程的方法, 可以在无需信道统计信息的条件下获得较为准确的信道估计。本文假定 PSS 已经正确检测, 且对于强信号小区的 SSS, 可以通过相关检测法获得其估计值 $\tilde{S}_a(k)$ 。

观察式(1)和式(2), 由于 $k = 0, 1, \dots, 61$, $i = 1, 2$, 因此可得到此时式(1)和式(2)中未知元素(即 $H_{a,\text{PSS}}(k)$, $H_{b,\text{PSS}}(k)$, $H_{a,\text{SSS}}(k)$, $H_{b,\text{SSS}}(k) | S_b(k)$)的个数为 $62 \times 2 \times 4 + 62 = 558$ 个, 但由于方程个数仅有 $(62+62) \times 2 = 248$ 个, 远小于未知数个数, 因此无法获得该方程组的唯一解。为了获得信道估计, 需要减少未知数的个数。

根据 3GPP-LTE 协议, PSS 和 SSS 是在相邻的 2 个时隙发送, 因此当信道相干时间大于等于一个 OFDM 符号时间长度(FDD 系统)或者 3 个 OFDM 符号时间长度(TDD 系统)^[9], 可认为信道在这 2 个时隙内基本不变, 即有: $H_{a,\text{PSS}}^{(i)}(k) \approx H_{a,\text{SSS}}^{(i)}(k) \triangleq H_a^{(i)}(k)$, $H_{b,\text{PSS}}^{(i)}(k) \approx H_{b,\text{SSS}}^{(i)}(k) \triangleq H_b^{(i)}(k)$, 由此, 式(1)和式(2)可改写为如下方程组:

$$Y_{\text{PSS}}^{(i)}(k) = H_a^{(i)}(k)P(k) + H_b^{(i)}(k)P(k) \quad (5)$$

$$Y_{\text{SSS}}^{(i)}(k) = H_a^{(i)}(k)S_a(k) + H_b^{(i)}(k)S_b(k) \quad (6)$$

另外, 根据协议, PSS 和 SSS 是被分配在连续的 62 个子载波上, 因此可以利用相邻子载波上信道响应的相似性进一步降低未知数个数, 即可以认为, $k = 0, 2, 4, \dots, 60$ 。但与此同时, 由于 $Y_{\text{PSS}}^{(i)}(k) = H_a^{(i)}(k)P(k) + H_b^{(i)}(k)P(k)$ 和 $Y_{\text{PSS}}^{(i)}(k+1) = H_a^{(i)}(k)P(k+1) + H_b^{(i)}(k)P(k+1)$ 线性相关, 因此最终建立的方程组为:

$$Y_{\text{PSS}}^{(i)}(k) = H_a^{(i)}(k)P(k) + H_b^{(i)}(k)P(k) \quad (7)$$

$$Y_{\text{SSS}}^{(i)}(k) = H_a^{(i)}(k)S_a(k) + H_b^{(i)}(k)S_b(k) \quad (8)$$

$$Y_{\text{SSS}}^{(i)}(k) = H_a^{(i)}(k)S_a(k+1) + H_b^{(i)}(k)S_b(k+1) \quad (9)$$

式中 $k = 0, 2, 4, \dots, 60$ 。此时, 方程个数为 $(31+62) \times 2 = 186$, 而未知数(即 $H_a^{(i)}(k)$, $H_b^{(i)}(k)$)个数为 $31 \times 2 \times 2 + 62 = 186$, 因此方程有唯一解。可以通过牛顿迭代或其他数值方法求解该方程组, 从而得到强信号小区信道 CFR 的估计值 $\hat{H}_a^{(i)}(k)$ 。

在获得 $\hat{H}_a^{(i)}(k)$ 后, 就可以进行干扰抵消, 将强信号小区对弱信号小区的同频干扰去除, 即利用强信号小区的信道估计值 $\hat{H}_a^{(i)}(k)$ 和强信号小区的 SSS 重构强信号小区在 2 个子帧 0 中的 SSS 接收信号, 并分别从原始接收信号中减去重构信号, 即:

$$Y_{b,SSS}^{(i)}(k) = Y_{SSS}^{(i)}(k) - \hat{H}_{a,PSS}^{(i)}(k)S_a(k) \quad (10)$$

之后再对 $Y_{b,SSS}^{(i)}(k)$ 进行相关检测, 可以得到弱信号小区的小区标识组号的可能值。

综上所述, 本文所提的 LTE 同频小区检测算法主要包含以下步骤:

- 1) 通过相关检测法检测强信号小区的 SSS, 获得强信号小区的小区标识组号;
- 2) 求解方程组式(7)~式(9), 得到强信号小区信道频响的估计值;
- 3) 进行干扰抵消, 即式(10), 去除强信号小区对弱信号小区的同频干扰;
- 4) 利用相关检测法检测出弱信号小区的 SSS, 获得弱信号小区的小区标识组号。

需要指出的是, 由于这里利用了 2 帧接收信号, 且每一帧的子帧 0 及子帧 5 传输不同 SSS, 因此一共可以获得 4 个小区标识组号的可能值, 此时可以选择其中频次最高的可能值作为最终的弱信号小区的小区标识组号。

4 仿真结果与分析

为了验证所提算法的性能, 将所提算法与已有的普通的小区检测法进行了仿真比较, 测试小区检测的成功率。仿真采用 2 个同频小区, 强信号小区和弱信号小区之间存在信号功率差。仿真中的信道采用 20 径的复高斯信道, 且总功率归一化为 1。仿真结果为 1 000 次平均的结果。

图 3 给出不同小区功率比的情况下, 2 个同频小区检测的成功概率, 采用的信噪比为 20 dB。从图中可以看出, 采用普通小区检测方法的情况下, 弱信号小区的检测成功率只有 50% 左右, 而所提算法在强弱信号小区功率比为 10 dB 以下, 均能获得 90% 以上的检测成功率。

图 4 给出的是在不同信噪比情况下, 2 个同频小区检测的成功概率, 此时弱信号小区与强信号小区功率比为 10 dB。从图中可以看到, 所提算法的检测成功率远高于普通的小区检测法, 特别是在中高信噪比的情况下, 比普通小区检测法有明显的提高。并且在 SNR 为 10 dB 时, 也有 70% 的检测成功率。

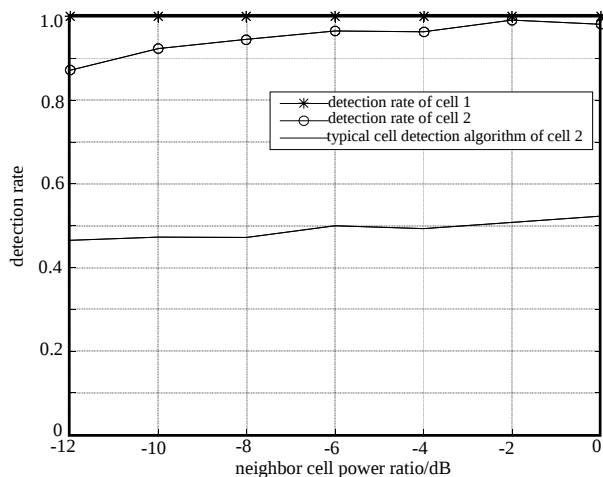


Fig.3 Performance comparison between the proposed and the conventional algorithms under different power ratios

图 3 不同小区间信号功率比下所提算法与传统算法的性能比较

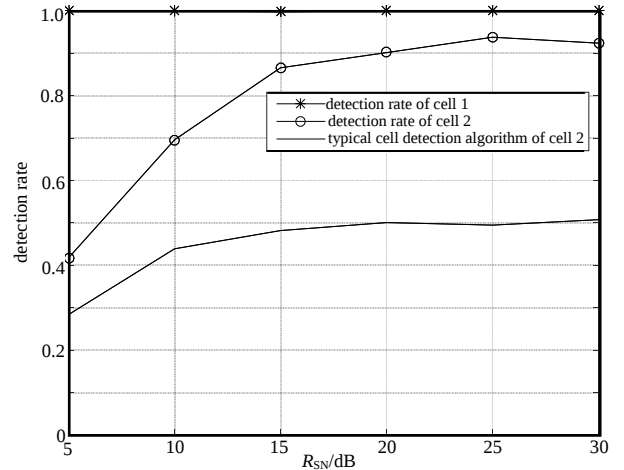


Fig.4 Performance comparison between the proposed and the conventional algorithms under different SNRs

图 4 不同 SNR 下所提算法与传统算法的性能比较

5 结论

LTE 系统中的小区搜索是进行通信前极其关键的步骤。但当系统采用同频组网, 相邻小区之间又采用相同的 PSS 时, 同频干扰会对小区检测造成巨大的影响。本文提出了一种同频小区检测方法, 通过对 PSS 和 SSS 的接收信号进行合理建模, 即利用相邻时隙、相邻子载波上信道响应的相似性来获得具有唯一解的方程组, 然后通过求解方程组得到强信号小区 CFR 估计, 并基于此进行干扰消除, 最终得到弱信号小区的小区标识组号。仿真部

分对所提算法进行了仿真,显示了所提算法要极大优于普通算法。

参考文献:

- [1] 胡宏林,徐景. 3GPP LTE 无线链路关键技术[M]. 北京:电子工业出版社,2008. (HU Honglin,XU Jing. The Key Technologies of Wireless Link in 3GPP LTE[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2008.)
- [2] 鲁立. TDD-LTE 系统的小区搜索算法的研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2010. (LU Li. Study on cell detection technologies in TDD-LTE system[D]. Wuhan:Wuhan University of Technology, 2010.)
- [3] PARK H G,KIM I K,KIM Y S. Efficient coherent neighbor cell search for synchronous 3GPP LTE system[J]. Electronics Letters, 2008,44(21):1267-1268.
- [4] PARK H G,KIM Y H,BANG S C,et al. Phase rotation-based synchronisation channel structure for synchronous OFDM cellular system[J]. Electronics Letters, 2008,44(6):430-431.
- [5] 徐文虎,蒋政波,田玲,等. LTE 同频小区检测及在扫频测试仪中的应用[J]. 仪器仪表学报,2012(1):207-212. (XU Wenhui, JIANG Zhengbo,TIAN Ling,et al. Multi-cell detection of frequency reuse-1 LTE system and its application in scanning receiver[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012(1):207-212.)
- [6] 漆飞,周游,胡捍英,等. 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. (QI Fei,ZHOU You,HU Hanyin,et al. A low-complexity PSS time synchronization algorithm in LTE system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(4):578-582.)
- [7] 吴晋成. LTE 小区搜索算法研究[D]. 重庆:重庆大学,2013. (WU Jincheng. Study on cell search algorithm of LTE system[D]. Chongqing:Chongqing University, 2013.)
- [8] 3GPP TS 36.211 V10.13.0. Physical channels and modulation[S]. Release 10, 2015.
- [9] 邹锴. LTE 小区搜索算法与实现架构研究[D]. 成都:电子科技大学,2012. (ZOU Kai. Study on LTE cell search algorithm and application architecture[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2012.)

作者简介:



方圆驰(1991-),男,上海市人,在读硕士研究生,主要研究方向为无线通信技术.email: 13210720097@fudan.edu.cn.

胡蝶(1979-),女,上海市人,副教授,主要研究方向为通信信号处理、OFDM、大规模 MIMO、5G 等。

(上接第 339 页)

- [5] LU J,ZHOU X,TAN Y P,et al. Cost-sensitive semi-supervised discriminant analysis for face recognition[J]. IEEE Trans. Inf. Forensics Sec., 2012,7(3):944-953.
- [6] DONOHO D L. Compressed sensing[J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 2006,52(4):1289-1306.
- [7] BENGIO Y,COURVILLE A,VINCENT P. Representation learning: a review and new perspectives[J]. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., 2013,35(8):1798-1828.
- [8] BISHOP C M. Neural Networks for Pattern Recognition[M]. Oxford:Oxford University Press, 1995.
- [9] BENABDESLEM K,HINDAWI M. Constrained Laplacian score for semi-supervised feature selection[C]// Proc. European Conf. Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases. Athens,Greece:[s.n.], 2011,1:204-218.

作者简介:



王剑桥(1987-),男,江苏省连云港市人,在读博士研究生,主要研究方向为雷达目标识别、高速雷达信号处理.email:cambwang@126.com.

李跃华(1959-),男,南京市人,教授,博士生导师,总装备部专家组专家,主要研究方向为毫米波亚毫米波近程探测系统设计,精确探测、成像与目标识别。

陈建飞(1987-),男,江苏省连云港市人,在读博士研究生,主要研究方向为雷达信号处理。