

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.04.015

引用格式:田增山,庞宗廉,方鑫,等.一种改进的 LTE 系统下行同步算法[J].电讯技术,2014,54(4):457-462. [TIAN Zeng-shan,PANG Zong-lian,FANG Xin,et al. An Improved Synchronization Algorithm for LTE Downlink System[J]. Telecommunication Engineering,2014,54(4):457-462.]

一种改进的 LTE 系统下行同步算法*

田增山,庞宗廉**,方鑫,李永强

(重庆邮电大学 重庆市移动通信技术重点实验室,重庆 400065)

摘要:LTE(Long Term Evolution)系统中,作为小区搜索的第一步,符号定时算法需要具备很强的鲁棒性。为了进一步增强现有符号同步算法的抗频偏性能,提出了一种优化的符号同步算法。该算法一方面保持已有分段相关同步算法的优点,同时考虑结合预频偏处理来进行符号定时与粗频偏的联合估计,再将多个相关运算集做叠加处理。理论分析和仿真实验结果表明,在多径信道下,所提算法在完成符号定时和粗频偏估计的同时,大大提高了系统抗频偏性能。

关键词:LTE 系统;符号定时算法;定时同步;粗频偏估计

中图分类号:TN929.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)04-0457-06

An Improved Synchronization Algorithm for LTE Downlink System

TIAN Zeng-shan, PANG Zong-lian, FANG Xin, LI Yong-qiang

(Chongqing Key Lab of Mobile Communications Technology,Chongqing University of Posts and Telecommunications,Chongqing 400065,China)

Abstract:In 3GPP Long Term Evolution (LTE) system, symbol timing algorithm, as the first step of cell search, is required a very strong robustness. An improved symbol synchronization algorithm is proposed for further enhancing the performance of anti-frequency-offset of the existing symbol synchronization algorithm. The algorithm keeps the advantages of partial correlation synchronization algorithm, and combines with frequency offset pre-processing to perform timing and coarse frequency offset joint estimation effectively, and then accumulates multiple correlation operation sets. Both the theoretical analysis and simulation results show that the proposed algorithm greatly improves the performance of anti-frequency-offset, while completing the timing and coarse frequency offset estimation under the multi-path channel.

Key words:LTE system;symbol timing algorithm; timing synchronization; coarse frequency offset estimation

1 引言

作为第 3 代 3G 移动通信的演进系统,3GPP 长期演进(Long Term Evolution, LTE)采用了正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)和多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)为物理层关键技术,改进并增强了 3G 的空中接入技术。与 3G 等移动通信系统相比, LTE 系统具有更高的传输速率、更低的系统时延、支

* 收稿日期:2013-11-13; 修回日期:2014-02-16 Received date:2013-11-13; Revised date:2014-02-16
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61301126);重庆市基础与前沿研究计划项目(cstc2013jcyjA40041);重庆邮电大学博士启动基金(A2012-33);重庆邮电大学青年科学研究项目(A2012-77);重庆市教育委员会科学与技术项目(KJ130528)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61301126); Fundamental and Frontier Research Project of Chongqing (cstc2013jcyjA40041); Startup Foundation for Doctors of CQUPT(A2012-33); Fundamental and Frontier Research Project of Chongqing (A2012-77); Science and Technology Project of Chongqing Municipal Education Commission (KJ130528)

** 通讯作者:1988pzl@sina.com Corresponding author:1988pzl@sina.com

持高速移动终端等优势^[1-2]。作为小区搜索的第一步,定时同步性能的好坏直接影响着整个系统性能。为了能够正确解调出 OFDM 符号上的数据,必须在解调前实现精确的定时同步。

目前,针对 LTE 系统小区搜索特别是定时同步,已经研究出了许多算法。文献[3]给出了一种 LTE 系统小区搜索算法,用传统的主同步信号(Pri-mary Synchronous Signal,PSS)捕获算法实现符号同步;文献[4]使用循环前缀进行延迟自相关来确定符号定时;而文献[5]则提出在已经得到小区标识后,利用 SSS 频域序列在进行解扰后进行相关。虽然算法各异,但是这些定时同步算法都容易受到频偏的影响。并且在实际系统中,由于用户终端的射频晶振误差可能较大,再加上高速移动带来的多普勒频移,用户终端接收的信号频偏可能会很大。上述的同步算法在不受频偏影响或者频偏较小的时候,其符号同步性能较好,但是随着频偏的增大,其同步性能越来越差。为了提高传统定时同步算法的鲁棒性,文献[6-7]给出了一种改善抗频偏特性的算法:分段相关同步定时算法。随着 PSS 序列分段数的增加,其抗频偏的范围也越大,但是损失了相同信噪比下的同步性能。

要实现精确的符号同步,关键在于解决频偏对定时同步算法带来的影响。上述提到的定时同步算法都不涉及到频偏的估计与矫正。基于已有各种同步算法的不足,本文在基于 PSS 序列的同步算法基础上,一方面利用预频偏处理来进行粗频偏估计,同时借鉴已有分段相关运算来减小小数频偏估计导致的符号定时模糊问题,且降低算法复杂度。与现有的定时同步算法相比,该算法在进行定时同步的同时实现粗频偏的估计与矫正,达到了比较理想的抗频偏性能。

2 PSS 序列

在 LTE 系统中,一个 10 ms 的无线帧被分为两个 5 ms 的半帧,PSS 序列和 SSS 序列在前后两个半帧中都各出现一次,一个无线帧中前后两个 PSS 序列是完全一样的。

PSS 序列是由 Zadoff-chu(ZC)序列生成的^[8]。ZC 序列具有恒幅特性、理想的周期自相关和周期互相关等特性,其产生表达式为

$$d_q(n)=\begin{cases} e^{-j\pi un(n+1)/63} \\ e^{-j\pi un(n+2)(n+1)/63},n=0,1,\cdots,30 \end{cases} \quad (1)$$

式中, q 为 ZC 序列的根序号,分别为 25、29、34,对应不同的小区组内标识 N_{ID}^2 的值 0、1、2。PSS 序列在频域生成后,将映射到系统带宽中央除去直流子载波以外的 62 个子载波上,与这 62 个子载波上下相邻的各 5 个子载波不映射任何数据。其映射关系如图 1 所示。

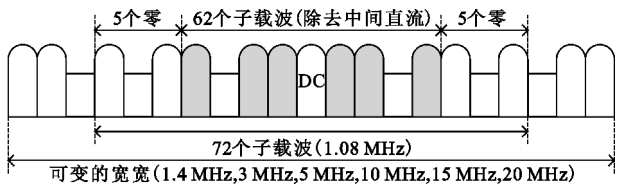


图 1 PSS 序列与子载波的映射关系
Fig.1 Mapping relationship between PSS sequence and subcarrier

由于 PSS 序列在频域和时域上都有很好的相关性,故可以通过时域的相关获取同步位置。

3 算法设计

用户终端接收到的经过信道的信号为

$$r(n)=[x(n)\otimes h(n)+\omega(n)]e^{-j2\pi\Delta f nT_s} \quad (2)$$

其中, $x(n)$ 为原始信号, $\omega(n)$ 为高斯噪声, $h(n)$ 为多径信道, Δf 是载波频偏, T_s 是接收端采样周期。高斯噪声是由信道噪声、量化噪声、器件噪声等组成。载波频偏是由于接收端晶振误差以及多普勒频移造成的,而实际应用中多普勒频移引入的频偏不会超过 500 Hz,故在接收端晶振误差较大的时候,多普勒频移可以忽略不计。本文从提高算法的健壮性出发,考虑频偏较大的情况。假设用户终端晶振误差达到 $\pm 1.4 \times 10^{-5}$,即系统频偏能达到约 ± 36 kHz。

3.1 传统的同步算法

传统的同步算法首先将接收到的采样信号经过带通滤波和 16 倍或者 32 倍下采样,然后将该数据与本地存储的 3 组 PSS 时域序列进行滑动相关来确定符号同步和小区组内标识 N_{ID}^2 。相关值^[3]可以表示为

$$R_i(n)=\left|\sum_{k=0}^{N-1}r(n+k)s_i^*(k)\right|^2,i=0,1,2 \quad (3)$$

式中, N 为下采样后主同步序列的长度。在这 3 个相关集中找出最大值对应的位置,就完成了同步过程,并且得到主同步序列的根序号。

3.2 分段相关同步算法

传统的同步算法将接收信号与本地 PSS 序列直接相关,其抗频偏性能完全依赖于 PSS 序列本身的

抗频偏特性。虽然 PSS 序列对频偏不敏感,但是频偏过大时,特别是在多径信道下,其同步性能会严重恶化。因此,文献[6-7]给出了一种分段相关同步算法改善抗频偏能力。

将经过下采样和滤波后的接收数据 $r(n)$ 与 PSS 序列 $s_i(n)$ 均分成 L 段进行相关运算,可以表示为

$$R_i(n) = \sum_{l=0}^{L-1} \left| \sum_{k=0}^{N/L-1} r(n+k+N \cdot l/L) \cdot s_i^*(k+N \cdot l/L) \right|^2, i=0,1,2 \tag{4}$$

式中, L 为分段数, l 为第几段。对比得到的 3 个相关集,找出最大值即可得到同步位置与 PSS 序列根序号。该算法通过分段的方式来减小频偏的累积效果,使得分段数 L 越大,算法对频偏影响的抵抗力越强。但是随着 L 的取值变大,其峰值点附近的相关度下降不够快,对时偏影响较敏感。折衷选取分段数为 2 或者 4 比较合适。

3.3 改进的符号同步算法

为了使算法有很强的鲁棒性,本文在分段相关同步算法基础上加以改进,提出了一种改进的符号同步算法。

算法实现频偏和定时的联合估计,先对主同步序列 $s_i(n)$ 做预频偏补偿处理,形成一组中心频率为 $u\Delta F$ 的 PSS 序列:

$$s_{i,u}(n) = s_i(n) \exp(j2\pi u \Delta F n T_s), u=0, \pm 1, \pm 2 \dots \tag{5}$$

式中, ΔF 为频偏间隔。这样就得到了 $3 \times U$ 个带频偏的 PSS 序列。将经过 16 倍下采样和窄带滤波后的接收数据 $r(n)$ 与上述的 PSS 序列组做时域相关运算,即将接收数据经过 $3 \times U$ 路匹配相关器。当实际频偏值与本地 PSS 序列的频偏 $u\Delta F$ 相等或者最接近时,就可以得到最大增益输出,从而估计出整数倍频偏 $u\Delta F$ 以及符号同步位置。为了增强 $\pm \Delta F$ 频偏内的抗频偏的能力,减小小数频偏带来符号定时模糊,匹配相关器用分段相关来实现,分段数为 L 。

PSS 序列根指数有 3 个,因此匹配相关器需要有 $3 \times U$ 路,这样的运算量和资源消耗还是比较大的。由于

$$A \otimes (B+C) = A \otimes B + A \otimes C \tag{6}$$

而且 PSS 序列具有良好的自相关性和互相关性,因此可以将本地的 3 组根序号不一样的 PSS 序列值加到一起后与接收信号做互相关运算,此时互相关的峰值依然可以有效的被检测出来。这样改进的算法

只需 U 路匹配相关器即可,大大减小了算法运算量和资源消耗。相加后的 PSS 序列组如式(7)所示:

$$s_u(n) = (s_0(n) + s_1(n) + s_2(n)) \cdot \exp(j2\pi u \Delta F n T_s), u=0, \pm 1, \pm 2 \dots \tag{7}$$

同时,为了提高算法的性能,可以将匹配相关后的值按 5 ms 半帧的长度进行叠加,叠加次数为 M 。由于 LTE 协议规定 PSS 与辅同步信号 (Secondary Synchronous Signal, SSS) 的检测需要在 80 ms 内完成,所以本文设定符号定时不能超过 30 ms,故叠加次数 M 不能超过 6 次。

综上所述,本文改进的符号定时算法公式为

$$\begin{cases} s_u(n) = (s_0(n) + s_1(n) + s_2(n)) \cdot \exp(j2\pi u \Delta F n T_s) \\ R_u(n) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{L-1} \left| \sum_{k=0}^{N/L-1} r(n+k+N \cdot l/L) \cdot s_u^*(k+N \cdot l/L) \right|^2 \\ 0 \leq n \leq N_f/2 - 1 \\ u = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \end{cases} \tag{8}$$

式中, N_f 为下采样后一个无线帧的长度, N 为下采样后相关窗的长度, ΔF 为匹配相关器频偏间隔, L 为分段数, M 为叠加次数, u 为匹配相关器序号。在这 U 个相关集中找出最大值对应的位置,就得到了符号同步位置,以及粗频偏估计。

定义每一点的相关功率和平均值的比值 $CPAR$ 为

$$\begin{cases} CPAR_u(n) = R_u(n) / R_u^{AVG} \\ R_u^{AVG} = \frac{2}{N_f} \sum_{n=0}^{N_f/2-1} R_u(n) \end{cases} \tag{9}$$

粗频偏估计为

$$\begin{cases} \Delta f_{sync} = u_{sync} \cdot \Delta F \\ u_{sync} = \arg \max_u \{ CPAR_u(n), 0 \leq n \leq N_f/2-1 \} \end{cases} \tag{10}$$

符号定时位置为

$$n_{sync} = \arg \max_n \{ CPAR_u(n), u=0, \pm 1, \pm 2 \dots \} \tag{11}$$

OFDM 符号定时只需要满足

$$d_0 - T_{CP} + \tau_{DS} \leq n_{sync} \leq d_0 \tag{12}$$

式中, d_0 为一个 OFDM 符号去掉 CP 后的起始位置, T_{CP} 为 CP 长度, τ_{DS} 为多径时延扩展。符号定时如果不在 CP 范围内,就会引起严重解调干扰和相位偏移,但是如果能使符号定时落在 CP 以内,就能通过信道均衡来消除这种相位偏移的影响,以达到很好

的解调效果^[9-10]。

实际中,根据式(9)得到的同步位置会落在一定的区间上 $[d_0-d,d_0+d]$,只要 d 的取值远远小于CP长度,可将同步位置往前取 d 个点就能满足式(12)。

4 仿真和性能分析

匹配相关器的运算量与匹配相关器频偏间隔 ΔF 成反比,与叠加次数 M 、分段数 L 、匹配相关器个数 U 成正比,而匹配相关器的同步性能则与 M 和 L 有关,其中匹配相关器的同步性能和 M 成直接的正比关系。 L 的取值过大,则会带来相同信噪比下的同步性能的损失,取值过小,则可能不能减小小数频偏带来的符号定时模糊。考虑到现有的小数倍频偏估计算法^[11]估计范围为子载波频偏间隔,即 $\pm 7.5\text{ kHz}$,故 ΔF 可取最大值 7.5 kHz 。为了达到 $\pm 36\text{ kHz}$ 以上的抗频偏范围,匹配相关器个数 U 为5组,序号 u 取 $0,\pm 1,\pm 2$ 。从降低运算量和提高同步性能折衷考虑,分段数 L 取2即可满足要求,叠加次数 M 为4可以得到较好的性能。

此外,对于LTE系统仿真模型,3GPP标准给出了扩展步行A(Extended Pedestrian A model, EPA)、扩展车载A(Extended Vehicular A model, EVA)和扩展典型城市(Extended Typical Urban model, ETU)3种多径信道场景模型。本文选取在EVA信道下,使用真实系统的载波频率、信道带宽、采样频率等参数,对上面提到的传统同步算法、分段相关同步算法、改进的符号同步算法在不同信噪比以及不同频偏条件下进行了性能仿真。表1为系统仿真使用的基本参数。

表 1 仿真系统参数	
Table 1 System parameters of simulation	
参数	参数值
载波频率/GHz	2.6
信道带宽/MHz	20
采样频率/MHz	30.72
FFT 点数	2 048
CP 类型	常规 CP
信道模型	EVA 信道
多普勒频移/Hz	70

图2为信噪比在8 dB、0 dB和-16 dB条件下,对本文提出的符号同步算法粗频偏估计的正确率的仿

真图。可以看到,在8 dB的信噪比时,该算法在 $\pm 37\text{ kHz}$ 频偏范围内的频偏估计正确率接近1。随着信噪比的降低,频偏估计性能逐步下降。当信噪比降低到-16 dB时,频偏估计正确率只有0.6~0.9。

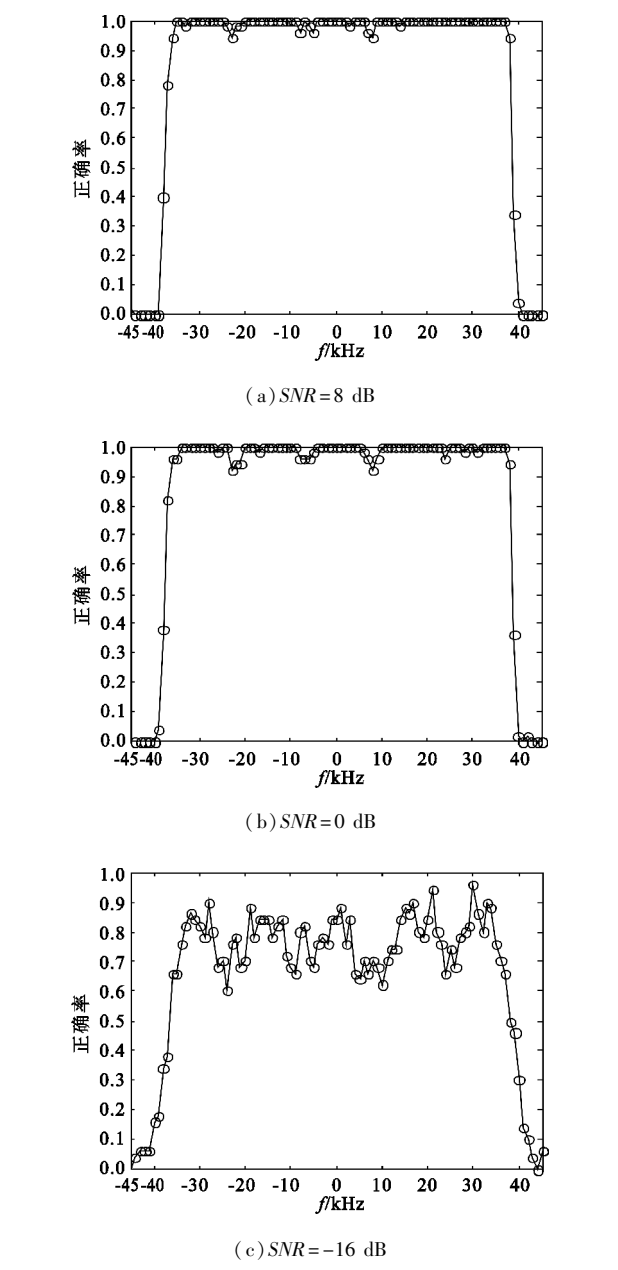
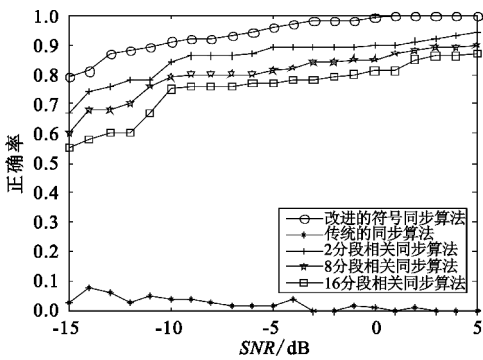


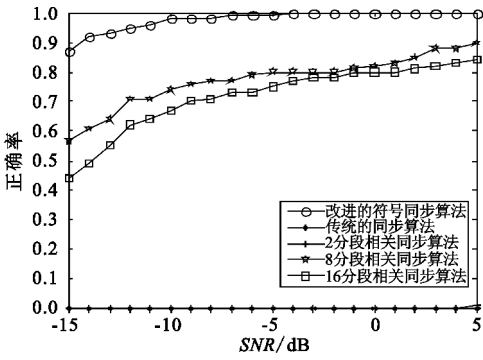
图2 不同信噪比下粗频偏估计的正确率
Fig. 2 Correct rate of coarse frequency offset estimation under different SNR conditions

图3给出了在10 kHz、20 kHz和36 kHz的载波频偏条件下,噪声对3种同步算法的符号同步正确率的影响的仿真图。仿真结果分析中,传统的同步算法和分段相关同步算法的定时位置只要落在16倍下采样后理想位置前后1个样值以内,则判定为检测正确;而改进的符号同步算法同时要求定时位

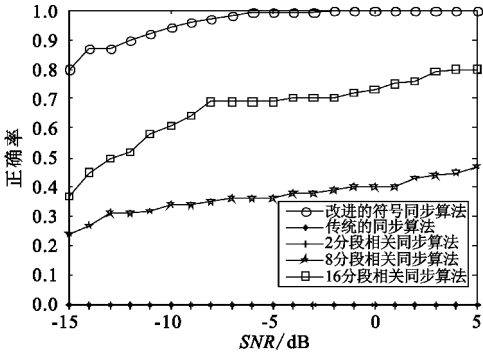
置和粗频偏估计都正确才能判定检测正确。



(a) $\Delta f=10\text{ kHz}$



(b) $\Delta f=20\text{ kHz}$



(c) $\Delta f=36\text{ kHz}$

图 3 不同载波频偏下不同算法符号同步的正确率
Fig. 3 Correct rate of Symbol synchronization for different algorithms under different Δf

通过图 3(a) 可以看到, 在频偏为 10 kHz 时, 传统的同步算法性能已经极差, 而通过分段进行相关的算法能提高算法的抗频偏性能, 但是随着分段数的增加, 相同信噪比下性能有所下降。本文提出的符号同步算法在 -15 ~ 5 dB 信噪比下, 其同步正确率都高于其他算法。信噪比大于 0 dB 时, 该算法的同步正确率约等于 1, 随着信噪比的降低, 同步正确率缓慢下降, 即使在 -15 dB 的信噪比时, 也能达到 0.8 的正确率。

观察图 3(b)、(c) 的曲线可以看到, 在频偏为 20 kHz、36 kHz 条件下, 传统的同步算法已经无法同步上 PSS 序列, 而分段数不一样的分段相关算法的同步性能随着频偏的增加出现了不同程度的下降, 其中 2 分段相关算法同步正确率已经为 0。本文提出的同步算法在 10 kHz、20 kHz、36 kHz 频偏下都保持符号同步正确率的曲线基本不变, 有很强的抗频偏性能。

表 2 给出了传统同步算法、分段相关同步算法、改进的符号同步算法的计算复杂度。由表 2 可知, 叠加次数 M 和匹配相关器个数 U 的取值不能过大, 否则将导致改进的算法计算复杂度过高。当 M 与 U 的乘积大于 3 时, 改进的符号同步算法计算复杂度要大于其他两种同步算法, 但是带来的是更强的抗频偏性能。由于改进的同步算法包含 U 个并行的匹配相关器, 该算法比较适合在 FPGA、CPLD 这类具有并行运算能力的器件上运行。

表 2 不同算法复杂度
Table 2 Complexity for different algorithms

算法	复数相乘次数
传统的同步算法	1 228 800×3
分段相关同步算法	约 1 228 800×3
改进的符号同步算法	约 1 228 800× $M\times U$

5 结束语

定时同步在 LTE 系统中有着重要的作用。作为小区搜索的第一步, 定时同步性能的好坏直接影响着整个系统性能, 对其进行详细研究并进行改进具有很大的现实价值。

针对传统的符号同步算法抗频偏性能较差的特点, 本文提出了一种改进的符号同步算法。与现有的定时同步算法不同的是, 该算法在进行定时同步的同时实现粗频偏的估计与矫正, 通过粗频偏的矫正来提高定时同步的抗频偏性能。为了降低算法复杂度, 该算法将 3 组本地 PSS 序列相加成一组使用, 同时在做相关运算时将多个相关集做叠加处理, 以提高算法同步性能。理论分析和仿真实验结果表明, 所提出的算法具有很强的抗频偏性能, 在多径信道下同步性能优越, 能满足系统频偏较大的情况下 LTE 系统对同步的性能要求。

参考文献:

[1] Omri A, Bouallegue R. New transmission scheme for MI-

- MO-OFDM system [J]. International Journal of Next-Generation Networks, 2011, 3(1):11-19.
- [2] Lin Zihuai, Xiao Pei, 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.
- [3] 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]. Communications Technology, 2009, 42(3):90-92. (in Chinese)
- [4] Xu Wen. Robust synchronization for 3GPP LTE system [C]//Proceedings of 2010 IEEE Global Telecommunications Conference. Miami:IEEE, 2010:1-5.
- [5] Bartis M, Mocanu V, Enescu A A, et al. Achieving secondary synchronization for downlink in the long term evolution standard [C]//Proceedings of 2010 International Symposium on Electronics and Telecommunications. Timisoara:IEEE, 2010: 129-132.
- [6] Tsai Yingming, Zhang Guodong. Time and frequency synchronization for 3GPP long term evolution systems [C]//Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference. Baltimore:IEEE, 2007:1727-1731.
- [7] Kim I G, Han Y, Kim Y H, et al. Sequence hopping cell search scheme for OFDM cellular systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(5): 1483-1489.
- [8] 陈发堂, 吴增顺. TD-LTE 系统中 Zadoff-Chu 序列的研究与 DSP 实现[J]. 电子技术应用, 2012, 38(3):41-43.
- CHEN Fa-tang, WU Zeng-shun. Research and DSP realization of Zadoff-Chu sequence in TD-LTE system [J]. Application of Electronic Technique, 2012, 38(3):41-43. (in Chinese)
- [9] Speth M, Fechtel S A, Fock G, et al. Optimum receiver design for wireless broadband systems using OFDM-Part I [J]. IEEE Transactions on Communications, 1999, 47(11):1168-1677.

- [10] Morelli M, Kuo C C J, Pun M O. Synchronization techniques for orthogonal frequency division multiple access (OFDMA): A tutorial review [J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(7):1394-1427.
- [11] Speth M, Fechtel S, Fock G, et al. Optimum receiver design for OFDM-based broadband transmission. II. A case study [J]. IEEE Transactions on Communications, 2001, 49(4):571-578.

作者简介:



田增山(1968—),男,河南人,1999 年于电子科技大学获博士学位,现为教授,主要研究方向为个人通信、卫星导航、无线定位、信号检测与估计;

TIAN Zeng-shan was born in Henan Province, in 1968. He received the Ph. D. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2002. His research interests include personal communications, satellite navigation, wireless localization and signal detection and estimation.

庞宗廉(1988—),男,广西人,硕士研究生,主要研究方向为个人通信与信号检测;

PANG Zong-lian was born in Guangxi Zhuang Autonomous Region, in 1988. He is now a graduate student. His research concerns personal communications and signal detection.

Email:1988pzl@sina.com

方鑫(1990—),男,重庆人,硕士研究生,主要研究方向为个人通信与无线定位;

FANG Xin was born in Chongqing, in 1990. He is now a graduate student. His research concerns personal communications and wireless localization.

李永强(1985—),男,河南人,硕士研究生,主要研究方向为信号检测与估计。

LI Yong-qiang was born in Henan Province, in 1985. He is now a graduate student. His research concerns signal detection and estimation.