

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.11.012

LTE 中一种改进的基于探测参考信号的定时估计算法*

田浩**,杨霖,李少谦

(电子科技大学 通信抗干扰技术国家级重点实验室,成都 611731)

摘要:研究了 LTE 系统中探测参考信号(SRS)的定时同步方法。由于基本的滑动相关算法和传统的后向搜索算法不能有效地消除相关过程中旁瓣峰值的影响,不适用于 SRS 的定时同步。因此,针对 SRS 的时频结构特点,提出一种改进的后向搜索算法。该方法通过将本地序列与接收序列在时域上相关得到定时度量函数,并重新定义门限值,通过结合门限和新的搜索技术来确定第 1 径的位置,从而得到正确的定时采样点。仿真结果表明,所提方法的估计性能优于滑动相关算法和传统的后向搜索算法,有效地消除了旁瓣峰值的影响,提高了 SRS 的正确定时概率。相比传统的后向搜索算法,所提方法的估计性能提高了 6 倍左右。

关键词:无线通信;长期演进;定时同步;探测参考信号

中图分类号:TN929.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2013)11-1465-06

A Novel Timing Estimation Algorithm Based on Sounding Reference Signal in LTE

TIAN Hao, YANG Lin, LI Shao-qian

(National Key Laboratory of Science and Technology on Communications, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: This paper studies the timing synchronization method of Sounding Reference Signal(SRS) in the Long Term Evolution(LTE) system. Because the basic sliding correlation algorithm and the conventional backward search algorithm cannot effectively eliminate the influence of the side lobe peaks in the correlating process, these methods cannot apply to the SRS directly. Therefore, an improved backward search algorithm is proposed according to the time and frequency structure of the SRS. In the method, the timing metric function is obtained by the time domain correlation between local sequence and receiving sequence, and through a combination of new search technology and the redefined threshold the location of the first track and the correct time sampling point can be obtained. Simulation results show that estimation performance of the proposed method is superior to the sliding correlation algorithm and the traditional backward search algorithm, it can effectively eliminate the influence of the side lobe peaks and improve the probability of correct timing of the SRS. Compared with the conventional backward search algorithm, the performance of the proposed method is improved by about 6 times.

Key words: wireless communication; long term evolution (LTE); timing synchronization; sounding reference signal(SRS)

1 引言

LTE(Long Term Evolution)作为新一代移动通

信的发展方向,目前受到了广泛关注。在下行链路, LTE 系统采用正交频分多址(Orthogonal Frequency

* 收稿日期:2013-06-04;修回日期:2013-09-05 Received date:2013-06-04;Revised date:2013-09-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61001088);国家重大科技专项(2010ZX03002-010);中央高校基本科研基金项目(ZYGX2012J141);国家教育部博士点专项基金(20100185120007)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61001088); The National Science and Technology Major Project (2010ZX03002-010); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (ZYGX2012J141); Doctoral Fund of Ministry of Education of China(20100185120007)

** 通讯作者:sunny_th@163.com Corresponding author:sunny_th@163.com

Division Multiple Access, OFDMA) 作为其多址方式; 在上行链路, 采用的则是单载波频分多址 (Single-Carrier Frequency Division Multiple Access, SC-FDMA) 的方式^[1]。

在 LTE 上行方向有一种重要的上行参考信号称为探测参考信号 (Sounding Reference Signal, SRS), 该信号由 Zadoff-Chu (ZC) 序列或 QPSK 序列生成, 与上行数据在一个时隙内时分复用, 不频分复用^[2]。SRS 由于具有恒包络零自相关 (Constant Amplitude Zero Auto Correlation, CAZAC) 性质, 常被用于上行信道的质量探测、功率控制及定时同步等操作。

一个用户设备 (UE) 只有当其上行传输时间同步后, 才能被调度进行传输数据。通常, 首次的同步是用随机接入信道 (Physical Random Access Channel, PRACH) 完成的。在首次取得定时同步后, 系统会不断地测量有用的上行信号 (例如 SRS), 以更新定时提前量, 进行定时校准。

目前, OFDM 系统下的定时同步方法主要分为两大类: 一类是基于循环前缀的方法, 如最大似然 (Maximum Likelihood, ML) 算法^[3], 该类方法不需要额外的系统开销就能完成定时和频偏的估计, 频谱利用率较高; 另一类是基于导频符号的估计方法, 例如 Schmidl&Cox^[4]的方法, 通过发送一串已知的导频序列进行定时估计, 可以实现频率粗同步和频率细同步, 但是该方法的定时度量函数存在“峰值平台”, 即在准确定时点附近定时度量值变化不大, 故定时准确度较低; Minn^[5]算法采用了不同的训练符号结构, 避免了峰值平台的出现, 但是该算法在非正确的同步点上会出现一些副峰, 如果信道条件恶劣, 这些错误的定时点可能导致定时误差的增大。Park^[6]算法重新设计了训练符号的结构和定时度量函数, 使得定时度量曲线十分尖锐, 接近于脉冲。但是该算法由于需要特殊的训练符号的结构, 因此不适用于 SRS。

上述方法在 AWGN 信道下可以获得较好的定时和频偏估计性能。但是在多径衰落信道条件下, 性能都会出现明显下降, 且由于 SRS 的结构特点, 使得一些 OFDM 系统下的定时估计方法并不适用。因此, 本文针对 SRS 的结构特点以及多径信道环境, 提出了一种基于 SRS 的改进的定时同步算法, 该方法能有效地提高多径衰落信道下的 LTE 上行链路的定时同步性能。

2 系统模型

2.1 SRS 的时频结构

LTE 上行链路中一个无线帧由 10 个 1 ms 的子帧构成, 每个子帧包含两个 0.5 ms 的时隙。在常规循环前缀 (Cyclic Prefix, CP) 配置下, 每个时隙由 7 个 SC-FDMA 符号组成; 在扩展 CP 下, 每个时隙由 6 个 SC-FDMA 符号组成。当一个子帧由高层配置用于发送 SRS 时, SRS 在该子帧的最后一个 SC-FDMA 符号上传输^[7]。

在频域上, SRS 采用间隔的方式映射到子载波上, 形成“梳状”的频域结构, 如图 1 所示。根据起始位置的不同 (奇数或者偶数), 用户可以频分复用 2 个“梳状”。而通过基序列的循环移位 (8 种), 在相同的“梳状”内, 最多可以码分复用 8 个用户。这意味着在给定的 SRS 带宽内, SRS 的复用容量可以达到 16 个用户^[8]。

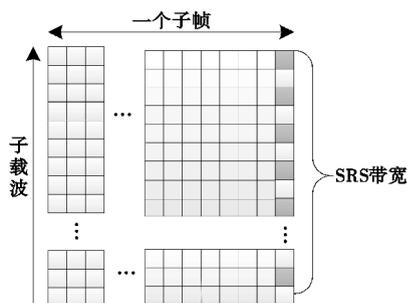


图 1 SRS 频域资源映射

Fig. 1 Frequency-domain resource mapping of SRS

当只有一个用户时, 没有发送 SRS 序列的子载波位置可以用 0 填充。本文主要研究的是单用户下的定时同步情形。

2.2 定时误差分析

假设系统含有 N 个子载波, 上行数据信号可以表示为

$$x[n] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j\frac{2\pi}{N}kn}, n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

其中, $X[k]$ 为第 k 个子载波上的基带数据。多径信道的时域冲激响应可表示为

$$h[n] = \sum_{l=0}^{L-1} a_l \delta[n - \tau_l] \quad (2)$$

其中, L 为多径数, a_l 和 τ_l 分别代表第 l 条径的信道复增益和时延。

如果不考虑时延和频偏的影响, 理想同步状态下接收到的信号应为

$$y[n] = \sum_{l=0}^{L-1} a_l x[n - \tau_l] + w[n] \quad (3)$$

其中, $w[n]$ 为加性高斯白噪声。

但由于实际系统中时延和频偏的影响是不可避免的,因此实际中接收到的信号为

$$r[n] = y[n - \theta] e^{j(2\pi \varepsilon n/N)} + w[n] \quad (4)$$

其中, θ 和 ε 代表时延样点数和频率偏移, $w[n]$ 为高斯白噪声。

上行符号同步的目的就是要找到每个 SC-FDMA 符号的起止时刻,确定 FFT 窗口的位置。当接收端和发送端的 FFT 窗口不一致时,便会导致符号定时偏差。如图 2 所示,其中 N_{cp} 为循环前缀, N 为有效数据。在 CP 长度内, A 代表受到符号间干扰 (Inter-Symbol Interference, ISI) 的区域,长度为信道冲激响应的长度, B 为无 ISI 污染的区域^[9]。

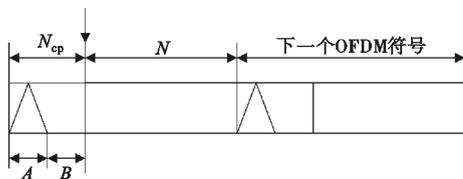


图 2 OFDM 符号定时误差示意图
Fig. 2 Symbol timing error of SRS

如果定时偏移 θ 与信道最大时延扩展之和不超过 CP 的长度,即定时点落在区域 B ,此时子载波间的正交性仍然成立,没有引入符号间干扰和子载波干扰 (Inter-Carrier Interference, ICI),对数据符号的影响只是一个相位旋转。但是如果定时的偏移量与最大时延扩展之和大于循环前缀的长度,即定时点落在区域 A ,此时一部分数据信息丢失了,子载波间的正交性会遭到破坏,并由此带来 ISI 和 ICI。

因此,定时估计的任务就是对时延偏移 θ 进行补偿,使得定时点落在正确的定时区域。

3 定时同步算法

3.1 基本算法

在基于导频的定时方法中通常使用的是滑动相关法。该方法通过在每个无线帧的起始位置插入一前导符号,该符号与 OFDM 数据符号具有相同的长度,假设为 N ,表示为 $c(d), d=0,1,2,\dots,N-1$ 。算法的原理如下。

假设经过信道后,接收到的信号可以表示为 $r(d), d=0,1,2,\dots,N-1$,在接收端生成本地前导

符号序列 $c(d), d=0,1,2,\dots,N-1$,将其与接收信号 $r(d)$ 按式(5)在时域上做滑动相关:

$$P(d) = \sum_{k=0}^{N-1} r(d+k) \cdot c^*(k) \quad (5)$$

其中, $c^*(k)$ 表示对本地序列取共轭。用本地序列的能量对 $P(d)$ 进行归一化,得到定时度量函数

$$M(d) = \frac{|P(d)|^2}{R^2(d)} \quad (6)$$

其中, $R(d) = \sum_{k=0}^{N-1} |c(k)|^2$ 表示本地序列的能量值。则定时度量函数取最大值时对应的采样点即为正确的定时点 \hat{d} :

$$\hat{d} = \max\{M(d)\} \quad (7)$$

该算法在 AWGN 信道环境下性能较好,且复杂度较低,但是当应用于多径衰落信道环境中时,其性能出现了明显恶化。这主要是由于多径的影响,导致具有最强瞬时功率的径不一定等于第 1 径的情况,从而应用式(7)无法正确判断出第 1 径的位置。

3.2 后向搜索法

针对多径的影响,文献[10]提出了一种应用于多径信道的定时同步算法,本文称之为后向搜索法。为了克服由于第 1 径为非功率最强径所带来的问题,文献[10]引入搜索窗和门限值,如图 3 所示。图 3 是没有噪声情况下,度量函数 $M(d)$ 在 ITU-A 信道下的示意图。ITU-A 信道下各径的归一化延迟分别为 0、4、11、17、27、40 个采样点,功率分别为 0 dB、-1.0 dB、-9.0 dB、-10.0 dB、-15.0 dB、-20.0 dB。

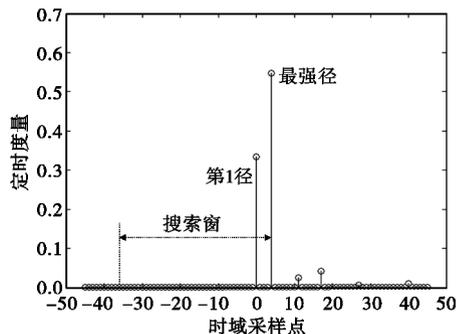


图 3 后向搜索法示意图
Fig. 3 Backward search method

由图 3 可知,此时的瞬时功率最强径为第 2 径,即采样点为 4 的位置,但实际上正确的定时点应该为第 1 径的位置,即图 3 中的 0 采样点。因此文献[10]提出采用后向搜索的方法,从最强径的位置向左设置搜索窗,然后找出搜索窗内大于某门限的峰

值作为第 1 径,其对应的采样点即为正确的定时点。具体算法如下:

(1) 利用式(7)找到最高峰值 p_0 和其对应的采样点 d_0 ;

(2) 从 d_0 向后搜索 $N_{cp}/2$ 个采样点,其中 N_{cp} 表示循环前缀的长度,然后在搜索窗中找出度量函数 $M(d)$ 大于门限值 βp_0 ($0 \leq \beta \leq 1$) 的最左边的采样点 \hat{d}_0 , \hat{d}_0 代表第 1 径的位置,即为正确的定时点。

文献[10]对 β 的取值进行了进一步研究,这里不再赘述,本文中取 $\beta = 0.4$ 。

4 改进的定时同步算法

由图 3 可知,后向搜索法的应用前提是:在没有噪声的条件下,定时判决函数 $M(d)$ 只在多径对应点处出现峰值,如图 3 中的 0、4、11、17、27、40 采样点位置。如果其他位置也存在峰值(尤其是搜索窗内),则会导致在应用 3.2 节的后向搜索法时,寻找第 1 径的过程可能出现错误。

然而,由 2.1 节对 SRS 的分析可知,由于 SRS 的频域间隔结构,使得本身 SRS 就存在大量的零频点。另外,在上行传输的过程中,在 IFFT 变换时 SRS 还需要进行补零操作。这些零频点将导致在计算时域相关的过程中,度量函数 $M(d)$ 除了在多径采样点处出现峰值外,在每个多径点的左右两边也存在一个小的峰值,我们称之为“旁瓣”,如图 4 所示。

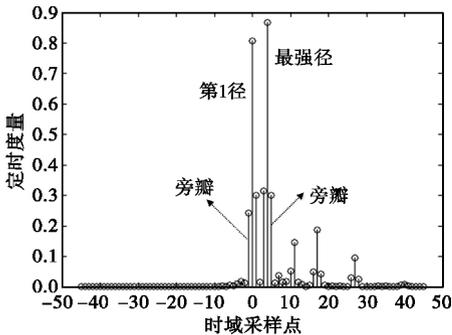


图 4 定时度量函数峰值中的旁瓣现象

Fig. 4 Sidelobe phenomenon of timing metric function

旁瓣现象使得在应用 3.2 节的后向搜索法时,有可能将原本应判决到第 1 径的定时点判决到了其左右的旁瓣上,从而给整个算法引入了误差。因此,如何消除旁瓣的影响是本文的研究重点。本节针对这一现象提出了一种改进的后向搜索法,以消除旁瓣的影响。

观察图 4 可看出,通常多径点处的峰值是高于旁瓣的峰值的,但是也有可能某次的瞬时功率旁瓣

的值反而高于多径点处的峰值,尤其是当发生在第 1 径的时候,会给整个判决系统带来很大的影响。因此,本文提出通过在搜索窗内寻找度量函数 $M(d)$ 大于某一门限的 3 个连续峰值,并取中间一个峰值所对应的采样点作为定时点的方法来消除旁瓣的影响。具体的算法如下:

(1) 利用式(5)和式(6)计算本地 SRS 序列与接收到的 SRS 信号的时域相关,得到定时度量函数 $M(d)$,并找到 $M(d)$ 的最高峰值(即最强径)所对应的的采样点,记为 d_0 ;

(2) 从点 d_0 回溯 $N_{cp}/2$ 个采样点作为搜索窗,其中 N_{cp} 表示循环前缀的长度;

(3) 重新定义门限值,设门限为 $\lambda \times \text{mean}(M(d))$,其中 $\text{mean}(M(d))$ 表示对 $M(d)$ 取均值, λ 为调整系数。 λ 的设计满足以下原则:一是不能设得太小,以防止在判决过程中噪声对有用信号的干扰,造成虚同步的现象发生;另一方面也不能设得太大,否则在搜索窗内无法搜索到正确的径。为了同时满足上述要求,通常将门限值定义为均值的两倍左右,本文中取 $\lambda = 2.5$;

(4) 在搜索窗中找出度量函数 $M(d)$ 大于门限值的最左边的 3 个连续采样点,取中间的一个采样点 d_0^* 判决为第 1 径的位置, d_0^* 即为正确的定时点。

5 仿真结果

为了验证所提算法在多径衰落信道下的有效性,本文采用典型的的城市信道模型 ITU-A 作为仿真环境,通过计算机仿真对基本算法、后向搜索算法和改进的搜索算法的性能进行对比。ITU-A 信道模型各径的归一化延迟分别为 0、4、11、17、27、40 个采样点,抽头功率分别为 0 dB、-1.0 dB、-9.0 dB、-10.0 dB、-15.0 dB、-20.0 dB,其余的仿真参数如表 1 所示。

表 1 SRS 仿真参数

Table 1 Simulation parameters of SRS

仿真参数	参数值
系统带宽/MHz	10
FFT 大小	1 024
子载波总数	600
SRS 带宽/RB	48
最大多普勒频移/MHz	70
仿真次数/次	10 000

图 5 和图 6 分别为 SRS 的正确定时概率曲线和均方误差 (Mean Squared Error, MSE) 曲线。

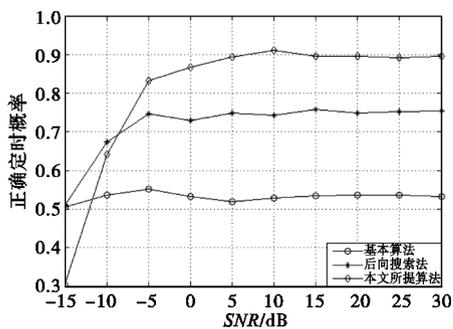


图 5 SRS 正确定时概率

Fig. 5 The probability of correctly timing

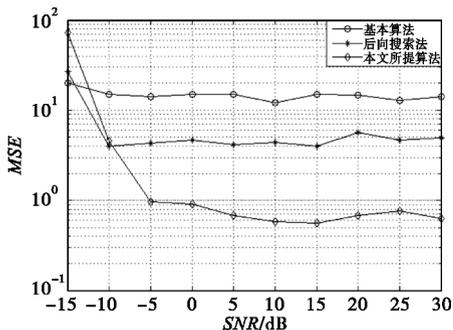


图 6 SRS 定时估计的均方误差

Fig. 6 MSE of timing estimation

从图 5 可以看出,基本算法的正确定时概率只有 50% 左右,即有一半的概率不能找到正确的 FFT 窗口,错误概率较大。后向搜索法随着信噪比的升高,性能有了一定改善,但正确定时概率最好也只能达到 75% 左右,不能满足系统的要求。而本文提出的改进方法虽然在信噪比非常低时(如 -15 dB)性能较差,但是随着信噪比的升高,优势渐渐明显。当信噪比在 -5 dB 时,正确定时概率已经可以达到 80% 以上,而当 SNR 大于 5 dB 时,正确定时概率基本维持在 90% 上下,且基本不受 SNR 变化的影响。

从图 6 可以看出,当 SNR 小于 -10 dB 时,由于噪声的干扰较大,导致无法通过门限分离出正确的径,因此所有算法的性能都较差。但随着 SNR 的继续升高,本文所提算法的性能改善十分明显。例如当 SNR 大于 -5 dB 时,所提算法的性能已经明显优于其余算法,MSE 值保持在 10^0 以下,相对于传统的后向搜索算法,估计性能提升了 6 倍左右,说明本文所提算法是有效的,能有效抵抗多径及旁瓣的影响。

6 结论

由于基本算法和后向搜索算法不能有效消除多径的影响,以及由于 SRS 本身具有大量零频点以及 IFFT 补零所带来的旁瓣现象,使得原有算法不再适

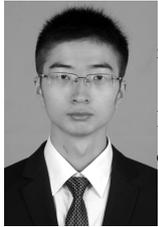
用于 SRS 的定时同步。因此,本文提出了一种改进的搜索算法。该方法通过重新定义门限值,并通过取大于门限值的 3 个峰值中的中间一个所对应的采样点作为正确定时点,以消除旁瓣的影响。仿真结果表明该方法能有效抵抗多径效应,消除旁瓣现象带来的影响,提高了 SRS 的定时估计性能,正确定时概率可以达到 90% 左右。

参考文献:

- [1] 3GPP TS 36.211 V10.5.0 – 2012, Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation (Release 10) [S].
- [2] Sesia S, Toufik I, Baker M. LTE-UMTS 长期演进理论与实践[M]. 马霓,夏斌,译. 北京:人民邮电出版社, 2009: 273-285.
Sesia S, Toufik I, Baker, M. LTE – The UMTS Long Term Evolution From Theory to Practice [M]. Translated by MA Ni, XIA Bin. Beijing: People's Posts and Telecom Press, 2009: 273-285. (in Chinese)
- [3] Beek J J, Sandell M, Borjesson P O. ML estimation of time and frequency offset in OFDM systems [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1997, 45(7): 1800-1805.
- [4] Schmid T M, Cox D C. Robust frequency and timing synchronization for OFDM [J]. IEEE Transactions on Communications, 1997, 45(12): 1613-1621.
- [5] Minn H, Zeng M, Bhargava V K. On Timing Offset Estimation for OFDM Systems [J]. IEEE Communications Letters, 2000, 4(7): 242-244.
- [6] Byungjoon P, Hyunsoo C, Changeon K, et al. A Novel Timing Estimation Method for OFDM Systems [J]. IEEE Communications Letters, 2003, 7(5): 239-241.
- [7] 邵道炯. TD-LTE 上行链路中参考信号技术的研究与 DSP 实现 [D]. 成都:电子科技大学, 2011.
SHAO Dao-jiong. The research and DSP realization of reference signal technology in TD-LTE uplink [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011. (in Chinese)
- [8] Bertrand P. Channel Gain Estimation from Sounding Reference Signal in LTE [C] // Proceedings of 2011 IEEE Vehicular Technology Conference. Yokohama: IEEE, 2011: 1-5.
- [9] 孟祥娟. LTE 下行同步技术设计与实现 [D]. 成都:西南交通大学, 2011.
MENG Xiang-juan. On The Design and Implementation Of the LTE Downlink Synchronization Technique [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- [10] 张洁, 蔡鹏, 张平. 一种适用于多径衰落信道的 OFDM 定时同步算法 [J]. 北京邮电大学学报, 2005, 28(2): 105-108.

ZHANG Jie, CAI Peng, ZHANG Ping. A Novel OFDM Timing Synchronization Algorithm in Multipath Fading Channel[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2005, 28 (2): 105 - 108. (in Chinese)

作者简介:



田浩(1989—),男,重庆人,硕士研究生,主要研究方向为 LTE 中的探测参考信号;

TIAN Hao was born Chongqing, in 1989. He is now a graduate student. His research concerns sounding reference signal in LTE.

Email:sunny_th@163.com

杨霖(1977—),男,博士,副教授,主要研究方向为无线与移动通信、现代通信中的信号处理;

YANG Lin was born in 1977. He is now an associate professor with the Ph. D. degree. His research concerns wireless communication and signal processing in modern communications.

Email:eelyang@uestc.edu.cn

李少谦(1957—),男,教授、博士生导师,长期从事扩频通信、移动通信方面的教学和研究。

LI Shao-qian was born in 1957. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research concerns spread spectrum communications and mobile communications.

Email:lsq@uestc.edu.cn