

文章编号:1007-5321(2017)01-0117-07

DOI:10.13190/j.jbupt.2017.01.021

一种基于 TD-LTE 帧同步的电网时间同步方法

张国翊¹, 朱海龙¹, 文 安², 金 鑫², 黄维芳²

(1. 中国南方电网电力调度控制中心, 广州 510623; 2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广州 510080)

摘要: 基于分时期演进(TD-LTE)4G 无线通信技术,研究了 TD-LTE 帧同步工作机制,将绝对时间与 TD-LTE 系统同步帧结构映射,提出了一种基于 TD-LTE 帧同步的电网时间同步方法,设计了时延补偿机制,以修正无线传播多路径造成的时延偏差,提高授时精度. 通过搭建试验平台实测分析,验证了该方法的可行性,无线授时系统的时间同步精度可达亚微秒量级,可满足配电网各类业务需求.

关 键 词: 分时期演进; 帧同步; 时间同步; 时延补偿; 授时系统

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

Power Grid Time Synchronization Method Based on TD-LTE Frame Synchronization

ZHANG Guo-yi¹, ZHU Hai-long¹, WEN An², JIN Xin², HUANG Wei-fang²

(1. Power Control Center of China Southern Power Grid, Guangzhou 510623, China;

2. China Southern Power Grid Science Research Institute Company Limited, Guangzhou 510080, China)

Abstract: The operation and maintenance, state monitoring and failure location of all kinds of power grid distribution network service and equipment terminal depend on the precise time synchronization. In view of time division long term evolution (TD-LTE) 4G wireless network communication technology, a TD-LTE frame synchronization mechanism was studied, which uses map absolute time and TD-LTE system synchronization frame structure, and proposes a power grid time synchronization method based on TD-LTE frame synchronization. Meanwhile, a time delay compensation mechanism was designed to revise delay caused by radio propagation multi-path for improving the accuracy of timing system. Finally, the feasibility of the method proposed was verified by simulation and analysis. It is shown that the time synchronization precision of wireless time service system can reach to sub-microsecond level, which can satisfy all kinds of distribution network service demands.

Key words: time division long term evolution; frame synchronization; time synchronization; time delay compensation; time service system

电力系统中配电网各类业务和设备终端的运行维护、状态监测、故障定位等工作都依赖于精确的时间同步,整个系统都必须在统一的时间基准下工作. 长期以来,我国电力系统定时信息的方式主要依赖

美国的全球定位系统(GPS, global positioning system),随着智能电网技术的发展,达到亚微秒级同步精度的授时协议 IEEE1588 已成为智能电网授时国际标准 IEC61850 的基础^[1-2]. Chang 等^[3]提出了一

收稿日期: 2016-08-04

基金项目: 中国南方电网公司重大科技专项项目(ZDKJ00000010)

作者简介: 张国翊(1982—), 男, 博士, E-mail: zhanggy@csg.cn.

种基于 GPS 获取定时信息并进行信息分发的方案; Zhang 等^[4]分析了不同条件下同步的最优配置方式; Li 等^[5]则提出了一种电网中高效率的混合同步算法. 上述导航定位卫星和有线通信虽能为电力系统提供精准授时,但其自身都存在局限性,在许多场景下,室内无法保证卫星信号的可靠接收,而有线授时方式所带来的光缆敷设和维护成本一直居高不下.

笔者基于 4G 国际标准,提出了一种基于分时长期演进 (TD-LTE, time division long term evolution) 帧同步的电网时间同步方法,并设计了时延补偿机制,以修正无线传播多路径造成的时延偏差,提高授时精度. 实测验证了该方法的可行性,无线授时精度可达亚微秒量级. 空口无线授时技术为配电网业务终端授时提供了一条全新途径,其较之卫星通信

更易于快速灵活部署,也能大幅减少配网敷设大量光缆所带来的巨额开销,可作为现有配电网业务终端授时方式的有效补充和备份.

1 问题模型

1.1 系统基本模型

TD-LTE 空口无线授时的基本模型如图 1 所示,它主要由接入网、回程网和骨干网等部分组成^[6]. 接入网的主要设备是基站,回程网和骨干网的传输网络可在电力系统现有光纤通信网络的基础上构建,骨干网主要由 TD-LTE 的核心网设备和路由器/交换机等组成. 基于 TD-LTE 的授时信号从基站的空口发出,由此在基站无线信号覆盖范围内的机房设备和各类终端都可得 LTE 的授时信号.

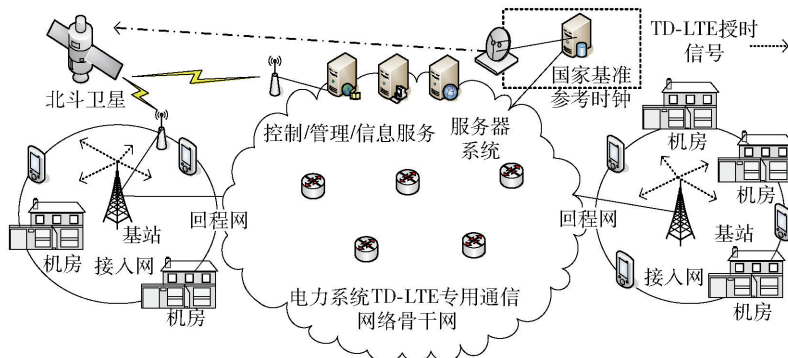


图1 基于 TD-LTE 的电力系统授时模型

1.2 电力系统对时间同步的基本要求

电力系统的不同设备装置对时钟同步精度的要求各异,其精度等级大致可分为 4 类:1) 电力系统中的线路行波故障测距装置、雷电定位设备和电子式互感器的合并单元等,对时钟同步的精度要求达到 μs 级; 2) 系统中的故障录波器、事件顺序记录仪 (SOE, sequence of events) 和各类电气测控单元等远程终端 (RTU, remote terminal unit) 设备,对时钟同步的精度要求在 ms 级; 3) 系统中各种配电设备、安全保护设备和变压器终端设备等类型的自动化装置,对时钟同步的精度要求在 10 ms 级; 4) 各种用电监测终端仪表、电能量和负荷采集装置、调度中心的各种仪表等对时钟要求不太高的设备,对时钟同步的精度要求可在 s 级. 由上面的分析可见,要使 TD-LTE 授时系统满足电力系统的各种同步时钟等级要求,其精度应达到 μs 级. 如果同步精度达到 ms 级,则也可满足大多数应用需求.

2 TD-LTE 空口授时与精度估计

2.1 TD-LTE 空口授时方案

TD-LTE 空口授时的基本思想是,利用 TD-LTE 网络本身的时间同步机制,通过空口以定时发送时间报文数据业务,同时通过修改物理广播信道 (PBCH, physical broadcast channel) 主信息块 (MIB, master information block) 信息空闲位做秒脉冲标志位的方式,实现 TD-LTE 网络为电力系统不同设备装置提供无线授时.

如图 2 所示,基站的秒脉冲信号 (1 秒脉冲) (PPS, pulse per second) 是通过卫星或精密时钟同步协议 (PTP, precision time synchronization protocol) 进行网络同步得到的信号,精度很高 (GPS/北斗同步精度达到 200 ns , PTP 同步精度达到 $1.5\text{ }\mu\text{s}$). 目前基站的物理广播信道有 14 bit 的信息,还有 10 位空闲 bit. 利用其中 1 bit 作为秒脉冲标志位,定义为

PpsF. 1 PPS 上升沿后的 4 个无线帧的 PpsF 设置为“1”,其余无线帧的 PpsF 设置为“0”,终端(UE, user equipment)通过 PpsF 标志位可识别出第 1 个无线帧边界,作为 1 PPS 的上升沿。

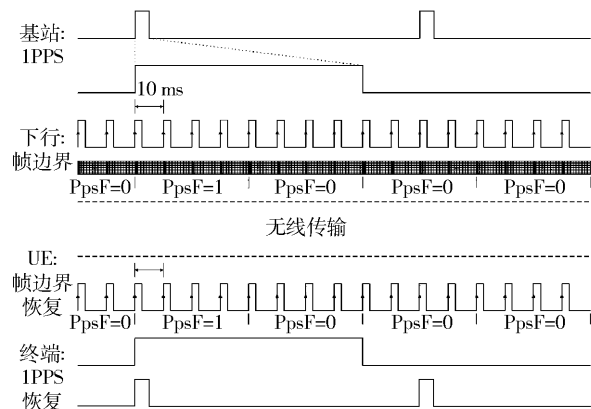


图 2 基站侧 1 PPS 信号的产生与终端的时钟恢复

UE 在和基站同步过程中,首先完成帧边界的同步,然后解调物理广播信道的信息,找出第 1 个无线帧,恢复出 1 PPS 信号,并从基站得到发射提前量参数,利用该参数补偿信道传输的时延。

TD-LTE 采用 3 个主同步信号序列(PSS, primary synchronization signal)表示组内的小区 ID 识别,168 个辅同步信号序列(SSS, secondary synchronization signal)用来表示组识别。这也是 TD-LTE 系统为小区搜索特别设计的 2 个物理信号。图 3 所示为时分双工(TDD, time division duplexing)方式下 PSS 和 SSS 的时域结构。

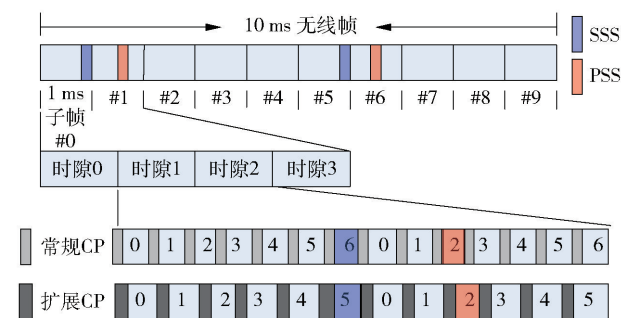


图 3 PSS 和 SSS 在无线帧的位置

图 3 显示了同步信号周期性传输的特点,每个 10 ms 无线帧传输 2 次。PSS 位于每个无线帧时隙 2 和时隙 12 上的第 3 个符号上,而 SSS 总是比 PSS 早 3 个符号,位于 PSS 之前的 1 个时隙的最后 1 个符号。而在频分双工(FDD, frequency division duplexing)小区内,PSS 总是位于每个无线帧第 1 和

第 11 个时隙的最后 1 个正交频分复用(OFDM, orthogonal frequency division multiplexing)符号上。SSS 位于 PSS 之前。SSS 的确切位置取决于小区所选择的循环前缀(CP, cyclic prefix)类型的长度,采用常规的 CP 时,每时隙包含 7 个 OFDM 符号。SSS 位于时隙 1 和时隙 11 的第 7 个符号,采用扩展的 CP 时,每时隙包含 6 个 OFDM 符号。SSS 位于时隙 1 和时隙 11 的第 6 个符号。

在 TD-LTE 系统中小区其他信道的配置和操作信息同样由 PBCH 携带。PBCH 传送的系统广播信息包括:下行系统带宽、系统帧号(SFN, system frame number)子帧号、物理混合自动重传指示信道(PHICH, physical hybrid automatic repeat request indicator channel)指示信息、天线配置信息等。其中天线信息映射在循环冗余校验(CRC, cyclic redundancy check)的掩码中。MIB 的大小只有 14 bit,每隔 40 ms 重复 1 次。终端可以通过 4 次中的任一次接收解调出 PBCH。

在随机接入过程中,基站通过测量接收到的前导码来确定终端补偿的时间提前量(TA, timing advanced)值,并通过随机接入响应(RAR, random access response)的 timing advance command 字段(11 位的定时调整命令 TA 发送给 UE,范围为 $T_A = 0, 1, 2, \dots, 1282$)。上行同步的粒度用 N_{TA} 指示, $N_{TA} = 16T_A = 0.52 \mu s$ 。在随机接入状态中,虽然 UE 与基站取得了上行同步,但上行信号到达基站的时间可能随时变化。因此 UE 需要不断地更新上行定时提前量,以保持上行同步。TD-LTE 系统中,基站基于测量对应 UE 的上行传输来确定每个 UE 的 TA 值。因此,只要 UE 有上行传输,基站就可用来估计 TA 值。

协议中规定基站根据物理上行链路控制信道(PUCCH, physical uplink control channel)、物理上行共享信道(PUSCH, physical uplink shared channel)、信道探测参考信号(SRS, sounding reference signal)进行 TA 测量。终端会接收到 6 bit 的 TA 命令,它的取值范围为 0 ~ 63。时间提前量可表示为 $N_{TA, new} = N_{TA, old} + 16(T_A - 31)$ 。其中 $N_{TA, old}$ 为最近 1 次的时间提前量, $N_{TA, new}$ 为新的定时提前量, $16(T_A - 31)$ 为定时调整量。

2.2 定时误差对 OFDM 系统性能的影响

在接收端,为了正确地解调数据,要找到 OFDM 符号的 N 个样点进行快速傅里叶变换(FFT, fast

Fourier transformation). 定时估计通过 OFDM 符号的起始位置,使 FFT 窗口起始点对准 OFDM 符号的起始点,从而使 FFT 窗口包含当前 OFDM 符号的 N 个样点,实现正确的解调. 如果定时估计不准确,FFT 窗口的起始位置不在当前 OFDM 符号的第 1 个样点上,那么 FFT 窗口就会包含相邻 2 个 OFDM 符号的样点,如图 4 所示.

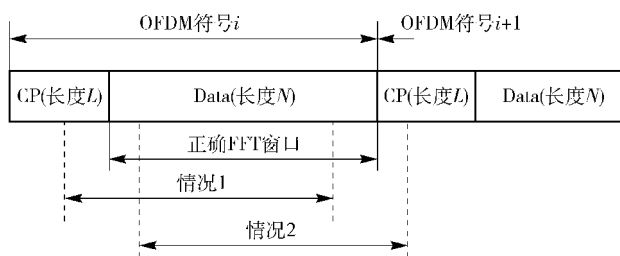


图 4 定时同步与循环前缀关系

如图 4 所示,正确的 FFT 窗口起始点应为 OFDM 符号循环前缀后的第 1 个样值.

1) 情况 1 为 FFT 窗口起始位置落在循环前缀内. 可以看出,截取的信号并不含其他 OFDM 符号的信息,因而不会产生符号间干扰. 错误判入循环前缀的信息和被错误截去的有用数据信息是相同的,因此 FFT 窗口仍然包括当前 OFDM 符号的 N 个样点,只是相对于正确的信号作了 1 个循环移位. 根据傅里叶变换的性质,FFT 输出的结果仅相当于使各个子载波产生 1 个相位偏转,而不会破坏子载波之间的正交性. 位于循环前缀内的定时误差使接收端有用信号在子载波上的相位旋转了 $-2\pi\theta k/N$,且相位旋转与定时偏差 θ 和子载波的位置有关. 此时并没有引入符号间干扰 (ISI, inter symbol interference),这体现了循环前缀对 OFDM 符号的保护作用.

2) 情况 2 为 FFT 窗口起始位置落在数据区内,则 FFT 窗口中就会包含相邻 2 个符号的内容,引起 ISI. 滞后的定时误差不仅使得有用信号在子载波上相位旋转了 $2\pi\theta k/N$,还产生了 ISI 干扰项,使接收端解调性能下降.

2.3 误差补偿与同步精度分析

TD-LTE 系统同步精度主要包括终端侦听同步阶段估计误差和基站测量对终端补偿误差的 TA. 各同步阶段的延时偏差如图 5 所示.

第 1 阶段 UE 初始阶段,通过小区搜索,侦听基站的起始位置,在这个过程中,假设下行侦听所带来的时间偏差为 Δt_1 .

第 2 阶段 基站通过测量接收到的前导码来确定 N_{TA} 值,假设这部分带来的时间偏差为 Δt_2 .

第 3 阶段 当 UE 进入无线资源控制_连接 (RRC_CONNECTED, radio resource control_connected) 态,基站根据 PUCCH / PUSCH / SRS 进行 TA 测量,调整 N_{TA} . 假设这部分带来的时间偏差为 Δt_3 ,上行接入时间如图 5 所示.

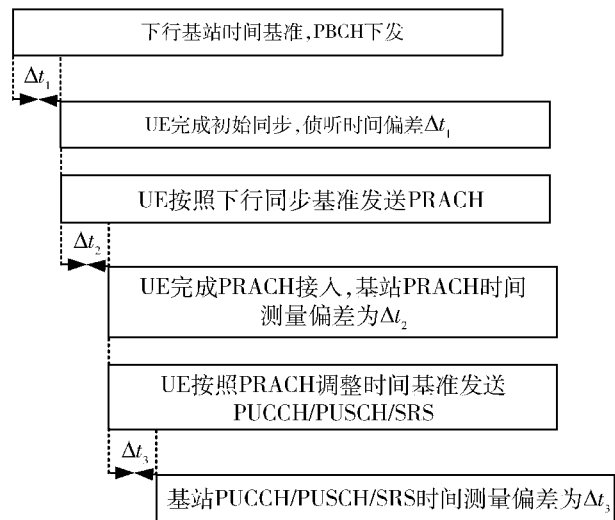


图 5 各同步阶段延时偏差

通过这 3 阶段的同步过程,总的时间偏差可表示为 $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3$.

信噪比 (SNR, signal noise ratio) 记为 S , 按照 $S = 0$ 结果来看, Δt 形成的同方向平均延时为 $\Delta t = 1.32 + 3.14 + 1.23 = 5.96 \text{ TS} = 0.194 \mu\text{s}$. TS 为 LTE 中最小的时间单元,为一个符号采样间隔,约为 32.55 ns .

由此可知,只要定时起始位置不超过 CP 长度,就不会产生码间干扰, LTE 系统要求基站和终端之间的帧边界时间同步精度要小于 CP 长度, 144 TS (按照普通 CP 算) $= 4.6875 \times 10^{-6} = 4.69 \mu\text{s}$, 通过分析,系统能满足该要求.

终端从空口恢复出秒脉冲后,会经过时钟单元驯服后再输出. 时钟单元包含高稳定恒温晶体钟和驯服控制电路. 驯服控制会对输入信号进行滤波,做长期统计,优化时钟信号,输出稳定的 10 MHz 时钟和 1 PPS 秒脉冲信号. 驯服单元对输入的 1 PPS 精度会有很大的改善,精度能优化 1 倍以上. 当输入源丢失或不稳定时,还能进入守时状态,守时性能达到 $55 \mu\text{s/h}$.

如上所述,TD-LTE 无线授时系统的同步抗精度主要包括基站同步精度和空口同步精度. 经过分

析,在保证通信正常的条件下,同步精度优于 $1.5+5=6.5\text{ }\mu\text{s}$. 同步信号经过终端的时钟单元驯服后,还可进一步改善同步精度. 分析可知,无线授时系统的时间同步精度可满足配电网的要求.

2.4 同步精度仿真

笔者对侦听同步 TA 估计、物理随机接入信道 (PRACH,physical random access channel) TA 估计、SRS TA 估计进行了仿真,仿真条件如表 1 所示.

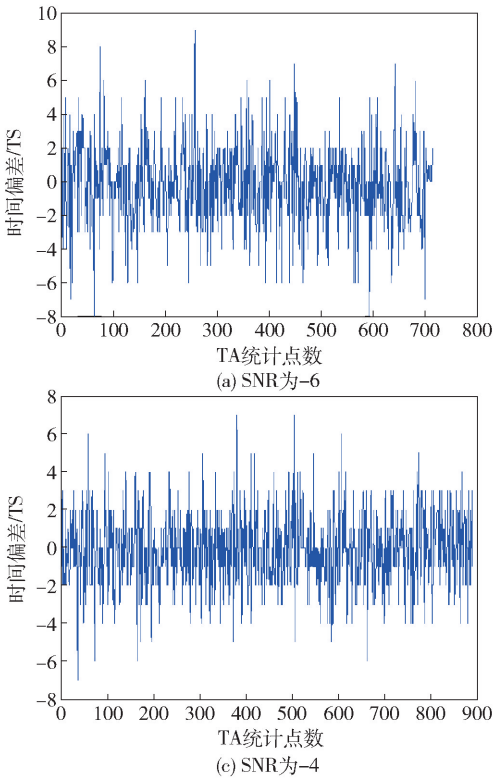


图 6 侦听同步 TA 估计误差仿真结果

表 2 侦听同步 TA 估计误差

SNR	最大绝对偏差/TS	平均偏差/TS
-6	9	1.89
-5	8	1.74
-4	7	1.49
-3	6	1.32

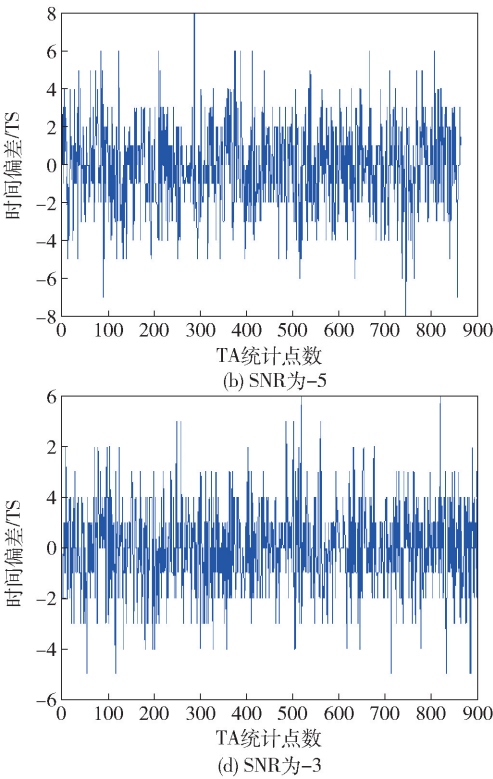
在不同 SNR 下,对应的 TA 估计值有所不同,当 PBCH 误码率为 1% 时,SNR 为 -4,TA 的平均偏差为 1.49 TS,最大偏差为 7 TS. PRACH 估计仿真结

表 1 仿真条件

仿真项	SNR
侦听同步	-9; -2
PRACH	-20; 0
SRS	-10; 10

图 6 给出了通过侦听同步 TA 估计误差的仿真结果.

从上述仿真可得表 2 所示的结果.



果如表 3 所示.

表 3 PRACH 同步 TA 估计误差

SNR	最大绝对偏差/TS	平均偏差/TS
-20	29.53	8.54
-14	24.86	5.51
-8	22.09	3.89
-2	10.78	3.43

SRS TA 估计仿真结果如图 7 所示.

从上述仿真可得表 4 所示的结果.

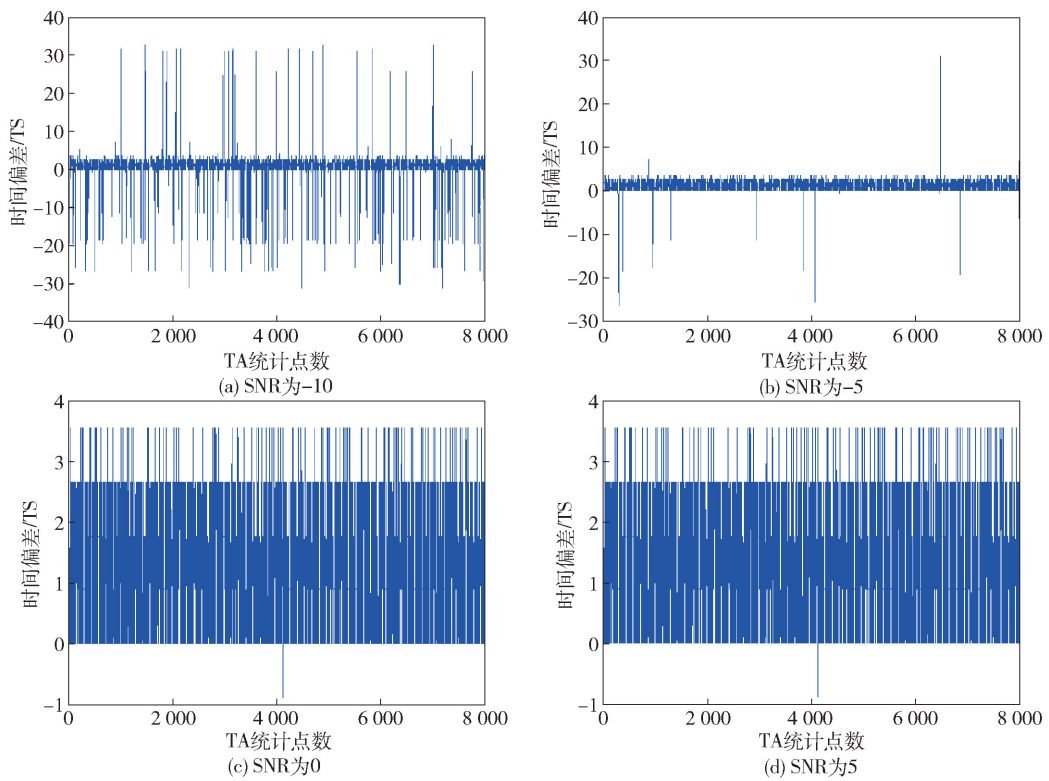


图 7 SRS 测量 TA 估计误差结果

表 4 SRS 测量 TA 估计误差

SNR	最大绝对偏差/TS	平均偏差/TS
-10	32.88	1.66
-5	31.11	1.23
0	3.55	1.21
5	3.55	1.22

2.5 终端的同步稳定措施

终端从空口恢复出秒脉冲后,会经过时钟单元驯服后再输出。时钟单元包含高稳定恒温晶体钟和驯服控制电路。驯服控制会对输入信号进行滤波,做长期统计,优化时钟信号,输出稳定的 10 MHz 时钟和 1 PPS 秒脉冲信号。驯服单元对输入的 1 PPS 精度会有很大的改善。当输入源丢失或不稳定时,还能进入守时状态,守时性能达到 55 μs/h。

如上所述,TD-LTE 无线授时系统的同步精度主要包括基站同步精度和空口同步精度。经过分析,在保证通信正常条件下,同步精度优于 $1.5+5=6.5\text{ }\mu\text{s}$ 。同步信号经过终端的时钟单元驯服后,还可进一步改善同步精度。从分析结果看出,无线授时系统的时间同步精度可满足配电网的要求。

3 实验与结果分析

通过对 TD-LTE 基站设备和终端设备进行设计更改,对搭建的试验平台进行了技术验证。试验平台包括完整的 TD-LTE 系统,时间服务器通过网络时间协议(NTP,network time protocol)给终端广播时间信息,基站和终端利用帧信号的同步和标识完成高精度同步。终端输出同步信号后,接入时间测试仪进行精度测试。如图 8 所示。

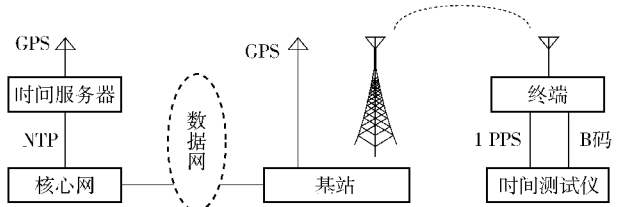


图 8 TD-LTE 无线授时技术验证测试平台

基于上述试验平台,使用时间测试仪对输出的 1 PPS 秒脉冲进行精度测试,测试时间持续 5 h,测试样本 19 804 个,以验证平台输出时间同步精度小于 1 μs,标准方差为 87.52 ns。图 9 给出了测试仪表上时间同步精度测试结果截屏图。图 10 给出了精度验证试验平台的实物图。

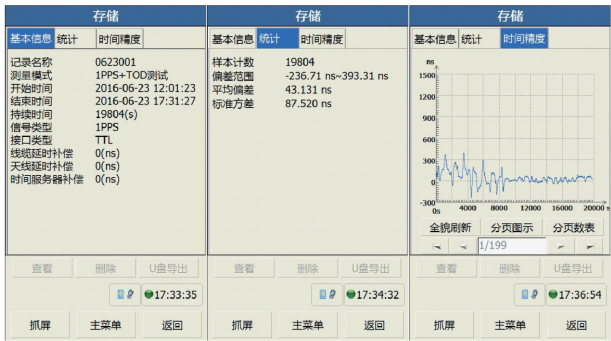


图 9 时间同步精度测试结果



图 10 精度验证试验平台

实验测试结果表明,系统的授时精度在 1 μ s 以内,与理论分析的结果接近,基站到终端的授时精度偏差小于 ± 100 ns,与仿真结果也很接近.

4 结束语

研究了 TD-LTE 帧同步工作机制,提出了一种基于 TD-LTE 帧同步的电网时间同步方法,并设计了时延补偿机制,以修正无线传播多路径造成的时延偏差. 实测验证了该方法的可行性,无线授时精度可达亚微秒量级,满足配电网各类业务需求. 空口无线授时技术为配电网业务终端授时提供了一

条全新途径,可作为现有配电网业务终端授时方式的有效补充,适合智能电网发展对设备同步的要求.

参考文献：

[1] John D M. The next generation grid-energy infrastructure of the future [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2009(3/4) : 26-32.

[2] Dedominicis C M, Ferrari P, Flammini A, et al. On use of IEEE1588 in existing IEC61850-based SASs: curbe-havior and future challenges [J]. IEEE Transaction on Insmentation and Measurement, 2011, 60 (9) : 3070-3081.

[3] Chang Chiuping, King Chungta, Chan Chenmin. On ref-erence node deployment for precise clock synchronization in smart power grid[C] //IEEE Ninth International Con-ference on Dependable, Autonomic and Secure Computing (DASC). Sydney: IEEE, 2011, 12: 465-472.

[4] Zhang Wuyang, Shi Songjie, Lu Yan, et al. Study on the configuration scheme of time synchronization system in the substation[C] //2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). Xi'an: [s. n.], 2016, 8.

[5] Li Fen, He Guanghui, Wang Xu. An improved hybrid time synchronization approach in wireless sensor networks for smart grid application[C] //2015 IEEE 17th Interna-tional Conference on High Performance Computing and Communications (HPCC). New York: IEEE, 2015, 8: 798-801.

[6] 李小文, 罗佳. TD-LTE 自适应辅同步信号检测算法与仿真实现[J]. 计算机应用研究, 2012, 29 (10): 3932-3934.

Li Xiaowen, Luo Jia. Simulation and realization on adap-tive secondary synchronization signal detection in TD-LTE system[J]. Application Research of Computer, 2012, 29 (10) : 3932-3934.