

基于 IEC61588 的智能配用电同步对时网关

李 彬, 祁 兵, 孙 毅, 唐良瑞

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 提出一种新型的面向无线传感网络的分布式对时方法, 研究了基于 IEC61588 精确网络时钟同步协议的传感网 P2P、E2E 对时技术, 并研制出同时支持 IEC61588 主时钟装置和从时钟模块的智能对时设备。建立了无线传感网的 PTP 分布式对时链路的数学模型, 通过 PTP 跨越定时链路抖动转移特性改进设备定时性能。提出在无线传感网底层采用快速时钟编解码方法减少由于高层应用对定时链的影响, 并针对不同的时钟模式进行测试。测试结果表明, 相比传统模式, 采用快速编解码技术的时间偏差下降约 50%, 平均定时偏差为 0.02~0.03 ms。

关键词: IEC61588; 同步; 网关; 无线传感网络; 编码; 时钟

中图分类号: TN 911.22

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.04.024

0 引言

目前应用较多的无线授时系统有美国的 GPS、俄罗斯全球导航卫星系统、欧洲 Galileo 导航系统以及日趋完善的中国北斗导航系统^[1]。随着智能电网的快速建设及分组传送技术的迅猛发展, 综合考虑设备成本、编解码复杂度以及配置灵活性等方面的问题, 网络对时方式逐渐获得众多设备厂商的青睐^[2-3]。在电力通信系统中, IEC61850 最初考虑的时间同步方案为简单网络时间协议(SNTP), 其时间同步精度相对较低^[4]。随着电网运行水平的不断提高, 电网的智能化改造过程中, 采用自动化技术是未来电网发展的趋势。

随着分布式控制系统对时间同步要求逐渐提高, 传统的时间同步协议如网络时间协议(NTP)、SNTP 由于同步精度有限, 已无法满足现阶段电力自动化设备的同步要求。为解决分布式网络校时问题, IEC 将 IEEE 所制定的 1588 精确定时协议转化为 IEC61588 标准^[5], 同时该标准已被我国采标为《用于网络化测量和控制系统的精确时钟同步协议》。在该协议中明确定义了通过中继网络链接的多点分布式实时时钟同步的方法和步骤, 同时将过程控制协议从数据传送协议中分离。原则上任何其他支持组播地址的中继协议均可使用, 并可通过任意底层网络启动执行, 根据应用的需求定制对时的方法, 进行完全自动化的智能对时。

1 配用电侧的分布式定时需求分析

在配用电侧的信息采集系统是一个覆盖面很广

的通信网络, 采集点具有较强的分散性。目前分布式信息采集应用较多的通信协议主要有 ZigBee^[6]以及中国科学院沈阳自动化研究所推出的无线工业自动化(WIA)技术^[7]。电能计量、电费核算及收缴的及时性和准确性已成为用电企业的重要课题, 系统中任何一个具有无线通信功能的节点均可作为转发其他电表数据的中继, 分布式信息采集网络的覆盖范围可以根据需要灵活调整。为实现低功耗全 Mesh 路由协议, 需要实现网络内部的同步。配电侧的时间同步需求主要体现在电网故障分析判断及实时数据采集时间一致性要求方面, 同时随着未来分布式能源的接入及数字电力技术的推广应用, 对时间同步的要求会更高。表 1 给出了目前电力系统中典型同步应用的时间精度需求。

表 1 时间同步精度需求

Tab.1 Accuracy demand of synchronization

同步精度要求	电力系统同步应用
小于 1 μ s	线路行波测距、同步相量测量、雷电定位系统
1 μ s 至 1 ms	远程终端装置(RTU)、故障录波装置、电气测控单元
1 ms 至 10 ms	馈线终端装置(FTU)、变压器终端装置(TTU)、配网自动化系统
10 ms 至 1 s	电能采集、负荷监控/用电管理系统、电气设备在线监测、SCADA 系统、企业管理信息系统

电力自动化设备对时间同步精度要求的等级有所不同, 对时精度的提高需要付出相应的代价, 并非精度越高越好。在进行系统设计时没有必要盲目追求高精度, 满足被授时设备本身的同步精度要求即可。以 WIA 电力信息采集网络为例, WIA-PA 通过网关实现与其他网络的互连。WIA-PA 网关除了与其他 WIA-PA 设备进行通信、交换设备间的信息, 还负责整个 WIA-PA 网络管理和安全管理工作^[7]。每个 WIA 节点周期性地从休眠模式转为工作模式, 并

收稿日期: 2012-04-06; 修回日期: 2012-12-26

基金项目: 国家科技重大专项(2010ZX03006-005-001); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(12QN10)

Project supported by the Major National Science and Technology Special Project(2010ZX03006-005-001) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(12QN10)

通过射频模块广播自身的标识信息及连通性信息。为实现节能的目标,通常希望系统处于工作模式的时间越短越好,因此必须在系统内实现一定精度的时钟同步,通常毫秒级的同步已经能够基本满足 WIA 网络的要求。精确定时协议(PTP)可以支持链式网、环形网、网状网等多种拓扑结构,同时 PTP 也并未明确指定其传输层面的协议。目前已经定义的传输技术有 UDP/IPv4、UDP/IPv6、IEEE802.3、DeviceNet、ControlNet、ProfiNet 等,在 IEC61588 协议中的协议编号 0x0007~0xEFFF 为后续其他传输协议预留了相应的标识^[5]。本文在 PTP 的基础架构上,利用该扩展接口,提出一种基于传感网的 PTP 分布式定时应用模式,所设计的网关可用于配用电侧的信息采集,同时提供符合相应时间精度要求的同步信息。

2 基于 IEC61588 的同步校时网关

2.1 面向分组的分布式定时协议

在配用电侧采集终端同时被多个网关覆盖时,可通过最佳主时钟(BMC)算法进行选择,并同时确定备选最佳主时钟。类似于时间同步数字系统的同步状态信息(SSM)时钟选源协议,IEEE1588v2 也有独立的时间选源算法,即 BMC 算法。与 SSM 协议不同的是,除比较 SSM 时钟等级,BMC 算法需要比较的属性参数较多,如时钟源的优先级、时钟源等级、精度、端口 ID、时钟源在网络中所经过的跳数等。对于从时钟,则将接收到的时间消息、通告消息、时间戳以及内部的滞留时间传送给 PTP 引擎,协议引擎计算出正确的时间并控制本地时钟。对于主时钟,协议引擎将产生 Sync 和 Follow_Up 消息,消息中发送时间戳由本地时钟基于内部滞留时间和输出时间戳产生。在实现中,透传时钟(TC)和普通时钟通常使用相同的本地时钟。PTP 流程见 **a—d**,其示意图参见图 1。图 1 中 t'_{2m} 、 t'_{3m} 和 t_{2m} 、 t_{3m} 分别为对应右侧(从节点)的 t'_2 、 t'_3 和 t_2 、 t_3 在左侧(主节点)的时间。

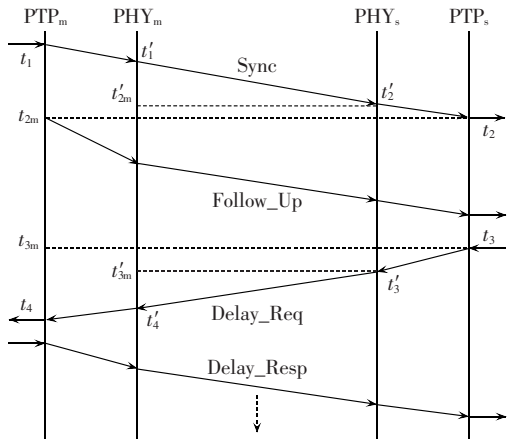


图 1 PTP 流程
Fig.1 Flowchart of PTP

a. 主时钟采用组播方式向从时钟发送 Sync 报文,并在报文发送过程中记录 Sync 报文的发送时间戳 t_1 ,从时钟收到该报文后记录下接收时间戳 t_2 。

b. 主时钟发送 Sync 报文后,立即采用组播方式发送一个携带有时间戳 t_1 的 Follow_Up 报文;从时钟接收 Follow_Up 报文后,获取时间戳 t_1 的值。

c. 从时钟收到主时钟发送的消息后采用单播方式向主时钟发送 Delay_Req 报文,用于发起反向传输延时的计算,并记录发送时间戳 t_3 ;主时钟收到该报文后,记录接收时间戳 t_4 。

d. 主时钟收到 Delay_Req 报文后,立即回复 Delay_Resp 报文,同时携带接收时间戳 t_4 ;从时钟接收 Delay_Resp 报文,从中获得时间戳 t_4 的值。

时钟偏移量可通过主时钟和从时钟设备双向通信延时差的平均值估算,然而对于未采用媒质无关接口(MII)扩展的定时设备,通常其时间差统计的是主时钟和从时钟 PTP 的协议栈之间的对端延时,采用 PTP 和 MII 协议均会造成一定程度的误差:

$$\Delta t_{\text{PTP}} = [(t_1 - t_2) + (t_4 - t_3) + \delta_1 - \delta_2] / 2$$

$$\Delta t_{\text{MII}} = [(t'_1 - t'_2) + (t'_4 - t'_3) + \delta_1 - \delta_2] / 2 = \Delta t_{\text{PTP}} + \delta_{\text{dev}}$$

其中, $\delta_{\text{dev}} = [(\delta_{m1} - \delta_{m4}) + (\delta_{s2} - \delta_{s3})] / 2$,即为 PTP 协议栈定时与 MII 时间戳的误差; $\delta_{m1} = |t_1 - t'_1|$, $\delta_{m4} = |t_4 - t'_4|$, $\delta_{s2} = |t_2 - t'_2|$, $\delta_{s3} = |t_3 - t'_3|$, $\delta_1 = |t'_1 - t'_2|$, $\delta_2 = |t'_3 - t'_4|$ 。

对于 P2P 透传时钟,每个端口有一个模块用于测量该端口与对端端口的链路延时,对端端口也必须支持 P2P 模式。链路的延时通过交换 Pdelay_Req、Pdelay_Resp 以及 Pdelay_Resp_Follow_Up 消息进行测量,P2P 透传时钟仅修正并转发 Sync 和 Follow_Up 消息。在传感网中,本地的停留时间和收到消息的端口的链路延时均记入修正值。P2P 的修正包括了链路延时和停留时间,从而反映了整个路径的延时。从时钟可以根据 Sync 消息计算出正确的时间,而不需再发送 Delay 测量消息^[8]。在发生时钟路径倒换时,P2P 方式基本不受影响,而 E2E 方式则需要进行新的延时测量之后,才能计算出正确的时间。

通过网络收集 PTP 域内各节点上的时钟精度和级别,利用 BMC 算法计算出祖父(GM)时钟作为整个区域的参考时钟。各时钟节点之间通过交互的 Announce 报文中所携带的最优时钟优先级、时间等级、时间精度等信息,最终选出 1 个节点作为 PTP 域的最优时钟,同时,各节点之间的主从关系以及各节点上的主从端口也已经确定。通过该过程,整个 PTP 域中建立起了一棵无环路、全连通,并以最优时钟为根的生成树。此后,主节点定期发送 Announce 报文给从节点,如果在一段时间内,从节点没有收到主节点发来的 Announce 报文,便假定该主节点失效,重新进行最优时钟的选择。

2.2 PTP 软件处理

普通时钟通常具有一个 PTP 物理通信端口与网络相连,根据所实现的功能,在无线传感网络协议栈上包含 2 类逻辑接口,即事件接口和通用接口^[8-10]。事件接口接收和发送需要时间标签的事件消息,而通用接口则接收和发送其他消息并封装成标准的传感器网络协议报文进行传输。在网络中,普通时钟可以作为 GM 时钟或从时钟^[11-12]。当作为 GM 时钟时其 PTP 端口处于主状态,作为从时钟时其 PTP 端口则处于从状态。PTP 节点内部功能模型框图如图 2 所示。

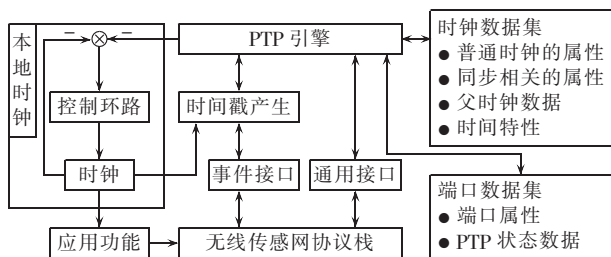


图 2 面向无线传感网的 PTP 定时模型

Fig.2 PTP timing model for WSN

当普通时钟的端口为从状态时,由时钟控制环路控制本地时钟与父时钟同步。当普通时钟作为 GM 时钟时,本地时钟可选择自由振荡模式或者同步于外部时钟源(如 GPS 等)^[13-14]。

端到端透传时钟自动转发所有的 PTP 消息,但对于事件消息,同时计算消息报文经过本节点所耗费的时间,并累加到消息报文中的 Correction 字段中。通过抖动转移特性反映系统对输入抖动扩展或抑制的程度,指导系统设计和改进定时设备的性能。图 3 描述了 PTP 时钟跨越定时链路时的抖动累积模型。

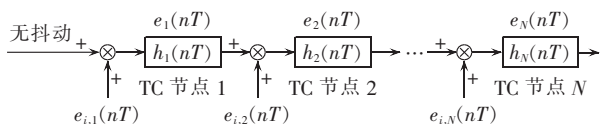


图 3 PTP 的抖动累积模型

Fig.3 Jitter accumulation model of PTP

$h_i(nT)$ 为第 i 个 PTP 设备在第 n 个采样周期内的系统传递函数,PTP 节点内部的抖动 $e_{i,k}(nT)$ 由随机分量和系统分量两部分组成。随机分量是指与 PTP 中继链路上其他 PTP 节点抖动完全不相关的抖动,而与其他中继节点抖动相关的抖动称为系统抖动。每个 PTP 节点随机抖动相互之间完全不相关,并且是均值为零的白色随机过程,则第 k 个 PTP 节点输出端的累积随机抖动功率谱函数为:

$$\Phi_k^R(f) = \Phi_{i1}^R \prod_{m=1}^k |H_m(f)|^2 + \Phi_{i2}^R \prod_{m=2}^k |H_m(f)|^2 + \cdots + \Phi_{ik}^R |H_k(f)|^2$$

其中, $H_i(f)$ 为 $h_i(nT)$ 的频域形式, Φ_{ik}^R 为第 k 级随机抖动功率谱密度常数。

PTP 节点的系统抖动与随机抖动不同,其相互之间是相关的,并且均值为零,则第 k 个 PTP 节点的输出端累积系统抖动的功率谱函数为:

$$\Phi_k^S(f) = \left| \sqrt{\Phi_{i1}^S} \prod_{m=1}^k H_m(f) + \sqrt{\Phi_{i2}^S} \prod_{m=2}^k H_m(f) + \cdots + \sqrt{\Phi_{ik}^S} H_k(f) \right|^2$$

若系统设备满足相同特性或者差别不大,则可用平均抖动转移特性来描述定时链路的抖动特性,假定各 PTP 传输设备的再定时电路的变化对抖动累积的影响是随机的,则上式可简化为:

$$\Phi_k^R(f) = \Phi_k^R |H_a(f)|^{2k} (1 - |H_a(f)|^{2k}) / (1 - |H_a(f)|^2)$$

$$\Phi_k^S(f) = \Phi_k^S |H_a(f)|^{2k} (1 - |H_a(f)|^{2k}) / (1 - |H_a(f)|^2)$$

其中, $H_a(f)$ 为任意 PTP 节点的抖动转移特性, Φ_k^R 和 Φ_k^S 分别为第 k 级 PTP 节点所累积的随机抖动和系统抖动的功率谱密度常数。

2.3 自动校时网关硬件设计

为实现智能电网建设“全覆盖、全采集、全预付费”的总体目标,保证智能电网建设规范有序推进,按照坚强智能电网建设的总体要求,必须实现配用电信息采集系统及主站、采集终端之间的同步。在目前国家电网所发布的《电力用户用电信息采集系统》系列标准中已经明确规定相关设备的外形接口、通信接口以及材料和工艺要求等。集中器应能够提供可靠的时钟信号,从而保障采集网络的同步性和一致性。在配用电侧,集中器可作为校时网关的首选设备,所研制的多模校时网关通信接口采用模块化结构设计,满足采用不同通信方式的通信模块可互换的要求,且其外形尺寸符合 Q/GDW375.2 的规范要求。处理单元采用 S3C6410 高性能处理器 ARM11,具有 256 MByte RAM 以及 2 GByte MLC2 Nand Flash,核心板采用高密度 6 层板设计。上行方向同时支持 TD-LTE 以及 McWiLL,可进行自动测量并灵活选网,并获取可靠的时钟源;下行方向采用 WIA 微功率无线通信技术,并嵌入电力信息采集协议栈,完成对所辖区域内设备的信息采集。

3 测试结果

搭建测试平台,采用 1 台校时网关、6 个 WIA 采集终端随机组网;选用 Si4432 射频芯片,配置 8 位前导码,最大发射功率 20 dBm;上行工作频段位于 1785~1805 MHz,采用 RS 码编码方式。为进行极限网络测试,主时钟配置为每 10 ms 发送一次 Sync 同步报文,采集网络的数据采用 IP 承载方式,业务包

含加速转发(EF)、确保转发(AF)2类,PTP符合标准的IEC61588格式并通过IEEE802.15.4承载^[12]。虽然在IEEE1588的v2版本中已明确建议在MII增加硬件时间戳^[5],但是由于涉及到底层的操作不易扩展,目前仍有大量的应用应用接口和驱动接口打时间戳,从而不能忽略协议栈所引起的非对称时延。

根据ITU-TG.810所定义的同步准确性的说明^[11],本文采用时间偏差TDEV(Time DEviation)衡量时钟同步的准确度,该参数定义如下:

$$TDEV = \sqrt{\frac{1}{6n^2} \left\langle \left[\sum_{i=1}^n (x_{i+2n} - 2x_{i+n} + x_i) \right]^2 \right\rangle}$$

其中, n 为抽样点编号, x_i 为第*i*个采样周期的时延差值, $\langle \cdot \rangle$ 表示取均值运算。

双模校时网关采用一阶低通滤波器,其通带系数为0.1,阻带系数为0.15,抽样频率为100 Hz,相当于2.5 Hz的下降边沿,其频率响应曲线如图4所示,频率已作归一化处理。

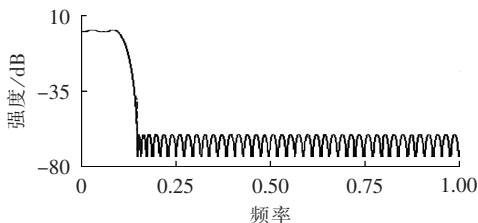


图 4 滤波器频率响应曲线

Fig.4 Frequency response curve of filter

图5给出了引入PTP的传感网络中采用不同排队策略的延时统计。从PTP的运行原理可知,端端的延时上限满足如下关系:

$$D \leq \frac{\sigma}{r} + \sum_{i=1}^n C_i$$

其中, σ 为漏桶模型中网络边缘处漏桶的深度,相当于边缘节点处端口缓存的大小; r 为业务的数据速率; C_i 为数据包在第*i*个节点的延时。

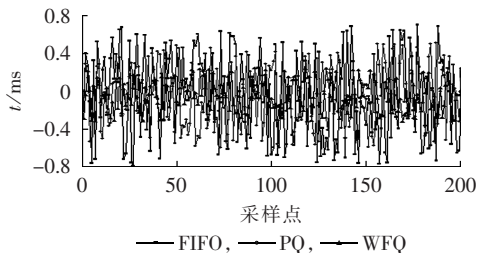


图 5 不同队列下定时信息传输性能

Fig.5 Performance of timing transmission under different queuing strategies

从测试结果可以看出,先入先出(FIFO)队列的端到端延迟通常不超过80 ms。FIFO队列根据数据到达的先后顺序分配转发所需带宽,所有报文共享网络和路由器的资源,即Best-Effort服务,对分组投递

的延迟、延迟抖动、丢包率和可靠性等需求不提供任何承诺和保证。优先级队列(PQ)算法建立优先队列,在调度时严格按照优先级从高到低的次序,优先发送较高优先级队列中的分组,当较高优先级队列为空时,再发送较低优先级队列中的分组,其延时小于50 ms。通常将关键业务分组(如PTP控制消息)放入较高优先级的队列,将非关键业务分组放入较低优先级的队列,从而保证优先传送关键业务分组。PQ方法的缺点在于非关键业务的分组仅能在处理关键业务数据的空闲间隙被传送,如果较高优先级队列中长时间有分组存在,则低优先级队列中的数据将一直无法处理。加权队列(WFQ)算法对公平队列进行了改进,在计算报文调度次序时考虑了优先权,使高优先权的报文获得优先调度的机会多于低优先权的报文。WFQ根据数据的优先级高低动态分配每个流应占有出口的带宽,通过轮询各个队列,按照带宽比例从队列中取出相应数量的报文进行发送,进而保障网络资源享用的公平性,因此其延时特性最好。无论采用何种队列算法,每一级透传时钟节点会引入新的时钟抖动,从而造成随机抖动的累积,通常第*k*级透传时钟节点的随机抖动可表示为:

$$e_k(nT) = [e_{k-1}(nT) + e_{i,k}(nT)] h_k(nT)$$

因此,在接收端的随机抖动可表示为:

$$e_N^R = \sum_{k=1}^N e_{i,k}^R(nT) \prod_{m=k}^{N-1} h_m(nT)$$

为说明抖动的累积效应,图6给出了WFQ方法下同步对时网关在不同层次实现解码的时钟偏移量。传统PTP的协议栈模型的偏差波动最大,且具有较高的偏移量^[9];透传时钟模式下时钟信息采用端到端的定时方式,定时链上的所有其他节点对定时信息仅进行简单的转发,不进行高层编解码,运行偏差最低;MII解码则在与物理传输媒质网关的最底层进行信息的编解码,具有效率高、性能稳定等特点,在不经补偿的情况下存在固定范围大小的偏差,相比透传时钟模式其偏差为0.02~0.03 ms。

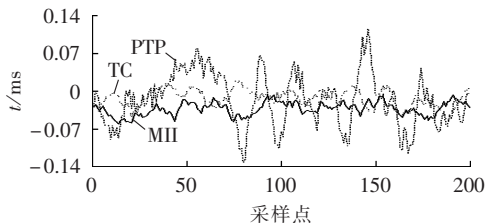


图 6 不同定时模式下的时钟偏差

Fig.6 Clock error under different synchronization modes

图7分别给出了不同定时模式下的TDEV性能曲线,TDEV通常用于规定相位噪声,即描述定时信号的漂动,用于评估漂动容限和漂动传递特性。时

间间隔误差经带通滤波器以及均方根检测器后可得出 TDEV 值。可以看出,透传时钟模式的性能介于 MII 和传统 PTP 模式之间,平均 TDEV 在 $4\ \mu\text{s}$ 左右,但由于透传时钟模式下系统通常采用端到端的模式,其开销较大,只有引入定时信息汇聚技术后才能提升网络运行效率。采用 MII 模式后,传统 PTP 的 TDEV 值下降了 50% 左右,具有较好的输出漂摆特性。

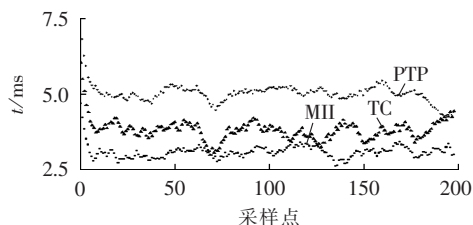


图 7 不同模式下的 TDEV 比较

Fig.7 Comparison of TDEV under different synchronization modes

4 结语

PTP 目前已经广泛应用于电力系统自动化方向,在未来配用电侧的同步应用中,需要将客户层的时间同步和传送层的时间同步严格分开。在进行信息融合处理后,对于客户层的时间同步,传送层全部采用透传时钟,这样传送设备只需负责打时间戳和计算修正项,而不用参与处理客户层的时钟协议。PTP 功能仅在接口板实现,而不用时钟板的参与。如果能在进传送网时打输入时间戳,而在出传送网时增加输出时间戳并计算修正项,则只需要边界端口处理即可。对于传送层的时间同步,与客户层完全独立,可以使用任何方便的形式。

参考文献:

- [1] LIXIA M, LOCCI N, MUSCAS C, et al. Synchrophasors measurement in a GPS-IEEE1588 hybrid system[J]. European Transactions on Electrical Power, 2011, 21(4): 1509-1520.
- [2] CARTA A, LOCCI N, MUSCAS C, et al. GPS and IEEE1588 synchronization for the measurement of synchrophasors in electric power systems[J]. Computer Standards & Interfaces, 2011, 33(2): 176-181.
- [3] DEDOMICIS C M, FERRARI P, FLAMMINI A, et al. On the use of IEEE1588 in existing IEC61850-based SASs: current behavior and future challenges[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(9): 3070-3081.
- [4] 3GPP. TS25.104 V9.5.0 Base Station(BS) radio transmission and reception(FDD)[S]. [S.L.]: 3GPP Support Office, 2010.
- [5] International Electro-technical Commission. IEC61588 Precision clock synchronization protocol for networked measurement and control systems[S]. Geneva, Switzerland: IEC, 2009.
- [6] ZigBee Alliance. 053474r17_TSC ZigBee specification[S]. [S.L.]: ZigBee Standards Organization, 2008.
- [7] International Electrotechnical Commission. IEC/PAS62601/Ed.1 Industrial communication networks-fieldbus specifications-WIA-PA communication network and communication profile[S]. Geneva, Switzerland: IEC, 2008.
- [8] MAHMOOD A, GADERER G. Time-stamping for IEEE1588 based clock synchronization in wireless LAN[C]//International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication, ISPCS 2009. Brescia, Italy: IEEE, 2009: 1-6.
- [9] LEE Sungwon, LEE Seungwan, HONG Choongseon. An accuracy enhanced IEEE1588 synchronization protocol for dynamically changing and asymmetric wireless links[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(2): 190-193.
- [10] FERRIGNO L, PACIELLO V, PIETROSANTO A. Experimental characterization of synchronization protocols for instrument wireless interface[J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(3): 1037-1046.
- [11] 刘巍, 熊浩清, 石光, 等. IEEE1588 时钟同步系统应用分析与现场测试[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(2): 127-130.
- [12] LIU Wei, XIONG Haoqing, SHI Guang, et al. Application analysis and field test of IEEE1588 clock synchronization system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(2): 127-130.
- [13] 杨丽, 赵建国, PETER A C, 等. IEEE1588V2 在全数字化保护系统中的应用[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(10): 98-102.
- [14] YANG Li, ZHAO Jianguo, PETER A C, et al. Application of IEEE1588V2 in pure digital protection system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(10): 98-102.
- [15] LEE S. An enhanced IEEE1588 time synchronization algorithm for asymmetric communication link using block burst transmission[J]. IEEE Communications Letters, 2008, 12(9): 687-689.
- [16] HAN J, JEONG D K. Practical considerations in the design and implementation of time synchronization systems using IEEE1588[J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(11): 164-170.
- [17] IEEE Computer Society. IEEE Std 802.15.4 Wireless Medium Access Control(MAC) and PHYSical layer(PHY) specifications for low-rate Wireless Personal Area Networks(WPANs)[S]. New York, USA: IEEE, 2006.
- [18] ITU-T Recommendation. ITU-TG.810 Definitions and terminology for synchronization networks[S]. Geneva, Switzerland: ITU, 1996.
- [19] GADERER G, LOSCHMIDT P, SAUTER T. Improving fault tolerance in high-precision clock synchronization[J]. IEEE Trans Ind Informat, 2010, 6(2): 206-215.
- [20] de DOMINICIS C M, FERRARI P, FLAMMINI A, et al. On the use of IEEE1588 in existing IEC61850-based SASs: current behavior and future challenges[J]. IEEE Trans Instrum Meas, 2011, 60(9): 3070-3081.
- [21] FERRARI P, FLAMMINI A, MARIOLI D, et al. IEEE1588-based synchronization system for a displacement sensor network[J]. IEEE Trans Instrum Meas, 2008, 57(2): 254-260.

作者简介:



李 彬(1983-),男,北京人,讲师,博士,主要从事电力系统通信技术研究,包括 SDH/WDM/PTN 传输网络、无线传感网络等(E-mail: direfish@163.com)。

(下转第 141 页 continued on page 141)

tronics,2008,54(3):1074-1081.

[9] CHENG Z,MARK J W. Channel estimation by modulated Lagrange interpolation[J]. Signal Processing,2010,90(3):2749-2759.

[10] MUSOLINO A,RAUGI M,TUCCI M. Cyclic short-time varying channel estimation in OFDM power-line communication[J]. IEEE Trans on Power Delivery,2008,23(1):157-163.

[11] 袁东风,张海刚. LDPC 码理论与应用[M]. 北京:人民邮电出版社,2008:46-47.

[12] ABEIDA H. Data-aided SNR estimation in time-variant rayleigh fading channels[J]. IEEE Trans on Signal Processing,2010,58(11):5496-5507.

[13] LIU Kewen,XING Ke. Research of MMSE and LS channel estimation in OFDM systems[J]. Information Science and Engineering,2010:2308-2311.

[14] 马天荣,穆晓敏,杨守义,等. 一种新的 OFDM 系统优化脉冲成形方法[J]. 电讯技术,2010,50(2):16-20.

MA Tianrong,MU Xiaomin,YANG Shouyi,et al. A new optimal pulse shaping method for OFDM systems[J]. Telecommunication Engineering,2010,50(2):16-20.

[15] SANDEEP P,CHANDAN S,CHATURVEDI A K. ISI-free pulses with reduced sensitivity to timing errors[J]. IEEE Communications Letters,2005,9(4):292-294.

作者简介:
陈 可(1981-),男,江西九江人,博士研究生,主要从事智能控制与优化方面的研究工作(E-mail:coco_chen81925@yahoo.com.cn)。

Improved channel estimation algorithm based on virtual carriers of low-voltage power line OFDM system

CHEN Ke,HU Xiaoguang

(School of Automation Science and Electrical Engineering,Beijing University of Aeronautics and Astronautics,Beijing 100191,China)

Abstract: The channel characteristics of low-voltage power line are analyzed and a channel estimation algorithm with increased pilot density is proposed,which replaces part of VCs(Virtual Carriers) by pilots and redistributes the pilots in the new OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) with equal frequency interval among subcarriers to increase the channel estimation precision by reducing pilot frequency interval. The filters of OFDM system are enhanced by the linear combination of the window functions of raised-cosine and better-than-raised-cosine to avoid the increase of inter symbol interference due to the reduction of VCs. The low density parity check code is applied in system to obtain the better response characteristics of channel frequency. The simulative results show that the bit error rate and mean square error of channel estimation by the proposed algorithm are lower than those of conventional OFDM systems while the symbol transmission rate of system is not decreased.

Key words: orthogonal frequency division multiplexing; channel estimation; low density parity check; virtual carrier; electric filters; bit error rate; communication

.....

(上接第 134 页 continued from page 134)

IEC61588 based precision synchronization gateway for power distribution

LI Bin,QI Bing,SUN Yi,TANG Liangrui

(School of Electrical and Electronic Engineering,North China Electric Power University,Beijing 102206,China)

Abstract: A distributed clock synchronization approach focused on wireless sensor network is proposed and the network P2P/E2E synchronization technology based on IEC61588 is researched. An intelligent clock synchronization device which supports both IEC61588 master and slave clock modules is developed. The distributed PTP synchronization link is established for wireless sense network,which improves the synchronization performance through crossing the timing-chain to transfer jitter. Fast clock decoding in low layer of wireless sensor network is proposed to reduce the impact of high-layer application on timing-chain. Its performance is evaluated under different scenarios and in different synchronization modes. Results show that,compared with traditional synchronization modes,the time deviation is reduced by 50% and the average timing error is about 0.02~0.03 ms.

Key words: IEC61588; synchronization; gateways(computer networks); wireless sensor networks; decoding; clocks