

基于主站 GPS 无线广播重发精确同步校时方案的实现

袁博华¹, 古 珑¹, 李尚柏², 钟 睿²

(1. 国网山西省电力公司 大同供电公司, 山西 大同 037000;

2. 四川大学 原子核科学技术研究所 辐射物理及技术教育部重点实验室, 成都 610064)

摘要: 无线分布式测量系统中, 测量时钟的同步与校时是系统实现的重点和难点技术问题; 提出一种基于主站 GPS 的无线精确校时方案, 即在主站配置 GPS 同步时钟源, 再通过无线帧信号广播重发侦听方式, 对子站时钟进行高精度同步校时; 文章重点讨论了利用 nRF905 无线模块实现广播重发侦听校时的网络系统结构、校时原理、校时精度、较传统无线校时方案的优势以及其它影响校时精度的因素等内容; 本校时方案应用于在线绝缘带电检测系统中, 既降低了硬件成本, 又取得了高精度的校时效果, 完全满足系统设计要求。

关键词: 主站 GPS; 广播重发; 无线校时; 精确同步

Scheme of Synchronization Timing Based on Master Station GPS Wireless Broadcast Retransmission

Yun Bohua¹, Gu Long¹, Li Shangbai², Zhong Rui²

(1. State Grid Shanxi Datong Electric Power Company, Datong 037000, China; 2. Institute of Nuclear Science and Technology, Sichuan University, Ministerial Key Laboratory of Radiation Physics and Technology, Chengdu 610064, China)

Abstract: In wireless distributed measurement system, the key and difficult technical problem is the synchronization of measurement time. In this paper, a new method based on the GPS of the master station is presented, in which the master station had configured a GPS synchronization clock source, and then use the wireless broadcast retransmission frame signal interception mode to synchronize the sub-station time with high precision. In this paper, we discussed how to use nRF905 wireless module to realize broadcasting retransmission sense, include system structure, principle, accuracy, the comparison with the traditional wireless correcting scheme and other accuracy factors need pay attention. The scheme applied to the on-line insulation detection system, which can reduce the hardware cost and achieve high accuracy.

Keywords: master GPS; broadcast retransmission; correction time; precise synchronization

0 引言

随着国民经济的飞速发展, 电网规模也不断扩大。为了保障电力系统设备的安全运行, 各类监测终端获得了广泛的应用。监测数据为及早发现隐患、排除故障以及调度工作等都起着非常重要的作用^[1]。

目前, 智能电网监测系统一般采用多终端进行监测, 各类监测终端数量众多且地域分布广泛, 由于传统有线连接方式存在布线复杂等问题, 因此慢慢已不能适应技术发展的要求。目前, 此类大规模分布测量系统多采用无线组网的方案^[2]。如图 1 所示。

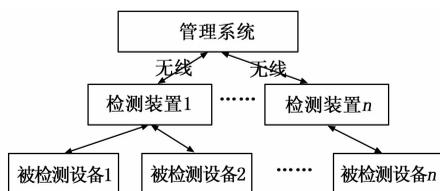


图 1 无线分布测量结构

图 1 中, 检测装置负责对各个被检设备的多路信号进行采样检测、分析, 然后通过无线信道, 将数据结果汇总到管理系统。此类系统中, 各检测装置记录的数据需要打上高精度的时间标记。这样, 在汇总的时候, 来自不同检测装置的数据才能在标准时间轴上对齐, 从而使得管理人员能够了解整个系统在各个时刻的状态。但是, 由于无线分布系统中, 不同测量装置都有自己不同的晶振时钟, 这就造成检测装置时间节奏的不同步。因此, 解决无线组网条件下各个检测装置时间同步问题是实现整个系统的重点和难点所在^[3]。

解决这一问题最常见的方案是在各个检测装置安装 GPS 接收模块, 通过 GPS 秒脉冲前沿对齐的方法来校准各自的工作时间, 以此实现不同检测装置的时间同步。由于这种方案需要在每个检测装置上安装 GPS 模块, 增加了硬件开销, 这在大规模的工业应用中是必须要考虑的成本。

为了节约硬件成本, 考虑到此类系统已经存在供数据传输的无线通道, 在此基础上, 如何利用无线通道实现校时, 以降低硬件开销, 成为人们研究的热点。本文提出一种利用 nRF905 无线模块, 实现主站 GPS 通过无线网络的精确校时方案。

1 系统结构与传统校时原理

主站 GPS 无线校时系统网络拓扑结构由一个主站和多个子站构成。例如, 图 1 所示的多个检测装置中, 可由其中的 1 个充当主站角色, 其它的作为子站。主站和子站的硬件结构基

收稿日期: 2015-08-13; 修回日期: 2015-09-17。

作者简介: 袁博华(1987-), 男, 广西桂林人, 中级工程师, 主要从事电力系统及其自动化方向的研究。

本上是相同的, 只是主站配置有 GPS 或具有标准时间接口, 而子站无需配置 GPS 模块, 因此节约硬件成本, 如图 2 所示。

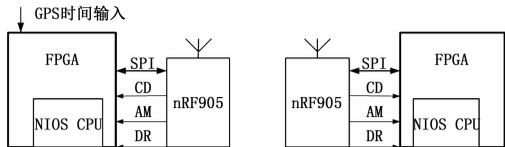


图 2 主站和子站硬件构成

其中, 采用 FPGA 实现 nRF905 硬件信号的捕获和逻辑控制。为了简化系统的硬件结构, 在 FPGA 中搭建一个 SPI 总线接口和 NIOS CPU。SPI 接口与无线通信模块 nRF905 相连, 并通过 NIOS CPU 实现对 nRF905 的读写操作。

传统的无线校时的基本步骤是, 当主站收到 GPS 秒脉冲时, 将绝对时间通过数据包广播给各个子站, 子站收到时间数据包后, 解析并校正自己的时间。完成这一基本过程, 耗时一般在 1 s 内, 因此, 这类基本校时方案能够达到校时精度为秒级, 适合校时精度要求不高的应用场合^[4]。

为了达到更高的校时精度, 目前采用的部分校时方案中, 对校时过程中的一些时间消耗进行了修正。以本文采用的 nRF905 模块校时原理为例, 如图 3 所示。

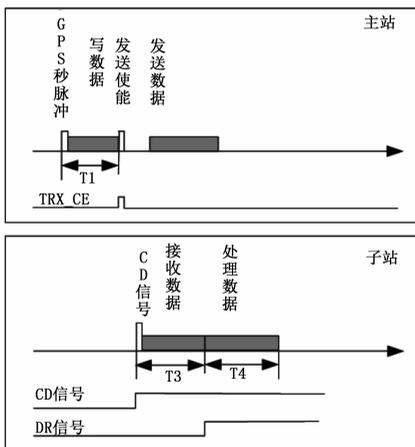


图 3 nRF905 校时基本原理

图 3 中, 传输的数据包中包含的是 GPS 绝对时间。当主站接收到 GPS 秒脉冲信号或其它标准时间信号(如 IRIGB 码)时, 主站通过向子站发送时间数据包的方式广播绝对时间, 其中接收到 GPS 秒脉冲到使能发送 TRX_CE 的时间间隔为 T_1 。随之, 子站就会侦测到载波信号 CD 和接收就绪信号 DR, 两者之间耗时为 T_3 。此时子站读取校时包的绝对时间(耗时为 T_4), 并校正本地时钟, 达到同步时钟的目标。

如果从主站发送使能 (TRX_CE 有效) 到实际发送之间没有延迟, 那么子站侦测到载波信号的时刻就是主站实际发送的时刻, 因而子站得到绝对时间的时刻相对于 GPS 秒脉冲信号的延迟就是 $T_1 + T_3 + T_4$ 。

然而, 实际工作中, 主站只能控制发送使能, 真实的发送时刻是由 nRF905 决定的。当 nRF905 初始化后, nRF905 用发送使能信号 TRX_CE 控制发送。当 TRX_CE 置高时, 发送过程开始, 需要执行以下步骤:

- 1) 无线发射自动上电。
- 2) 产生引导码、计算 CRC 校验码, 产生发送数据包。

- 3) 发送使能信号 TRX_CE 置低, 发送数据包。
- 4) 当发送完成后, 设置 DR 信号为高电平。
- 5) 当数据传输完成后, 进入接收模式或休眠模式。

TRX_CE 控制信号的最小脉冲宽度为 $10 \mu\text{s}$, 为了建立稳定可靠的传输, 从 TRX_CE 有效到实际发送还需要约 $650 \mu\text{s}$ 的延迟时间。因而主站的实际发送时刻是无法精确预知的, 因此, 根据图 1 所示的原理只能达到毫秒级的校时精度, 而不能达到微秒级的高精度校时。这也是目前普通无线校时方案还没有解决的问题。

2 高精度校时优化方案及实现

本文根据 nRF905 的自动重传特性提出了一种改进型的校时方法, 精度可达微秒级。其校时过程如图 4 所示^[5]。

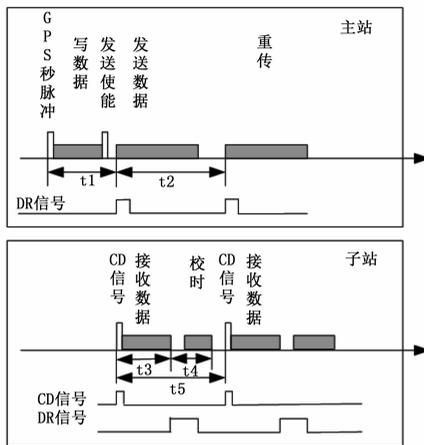


图 4 nRF905 自动重发机制校时原理

nRF905 的自动重传模式由配置寄存器的 AUTO_RETRAN 位确定, 可用 TRX_CE 控制自动重发次数。当 AUTO_RETRAN 被设置为 1, 且保持 RTX_CE 和 TX_EN 为高时, 则可使相同的数据包发送若干次, 一旦 TRX_CE 被置为低电平, 则发送完当前的数据包后, 进入休眠模式。

在自动重传模式下, 对于每个传输包, 发送就绪信号 DR 在引导码发送开始时被置高, 引导码发送结束时被置低。因而在每个传输数据包的开始时刻出现 DR 信号的脉冲, 脉冲的宽度代表了引导码的发送时间。

如图 4 所示, 将主站的发送模式设置为自动重传模式, 主站在 GPS 秒脉冲的前沿开始发送, 每个校时包发送两次。在主站开始发送时, 启动一个高精度计时器。由于发送被设为自动重传模式, 第一个校时包的引导码发送时, 主站的发送就绪信号 DR 信号变高。用 DR 信号的上升沿停止计时器, 该计时器的值 t_1 就是从 GPS 秒脉冲到校时包实际开始发送的时间。

对于子站, 在检测到第一个校时包的载波信号 CD 时, 用 CD 启动一个高精度计时器, 用接收就绪信号 DR 停止计时器。该计时器的值就是子站校时包的接收时间 t_3 。再启动一个计时器, 测量子站读取校时包、解析数据以及完成本地时钟校正所用的时间 t_4 。

从上面的分析可以看出, 由于在重传模式下, 数据包的发送开始时刻由 DR 信号的上升沿精确定位, 从而解决了正常发送模式下不能精确确定发送开始时刻的难题, 子站得到绝对时间的时刻相对于 GPS 秒信号的延迟就是 $t_1 + t_3 + t_4$ 。

子站在接收校时包后, 用校时包的绝对时间(年、月、

日、时、分、秒)校正本地时钟,并记录本地时钟相对于标准时刻的延迟偏差,从而达到精确的时间同步。

此外,为了实现高精度的校时,还需要考虑其它一些影响校时精度的因素,包含:

1) 本地晶振带来的误差

值得注意的是, t_1 是由主站的计时器测量的值,而 t_3 和 t_4 是由子站的计时器测量的值,也就是说主站和子站测量的计时基准是不一致的。由于二者的本地时钟的误差,相同的测量脉冲数所代表的时间是不同的。对于工业上常用的晶体振荡器,每秒之间的时钟误差可能达到几十个微秒。因此必须对它们进行修正。

如图 5 所示,对于主站,可以通过测量相邻两个 GPS 秒脉冲之间的计时脉冲数,从而精确计算出计时脉冲的时间间隔。如图 4 所示,假定在两个 GPS 秒之间,主站测量的计时脉冲数为 N_0 ,脉冲宽度为 t_0 ,则主站的计时脉冲的时间间隔为

$$N_0 \times t_0 = 1, t_0 = 1/N_0$$

由于主站每秒都会出现 GPS 秒脉冲,可以不断的测量这个值,并甄别测量值的合法性,再通过统计方法计算计时脉冲的时间间隔 t_0 ,从而提高计时器的精度和它的稳定性。

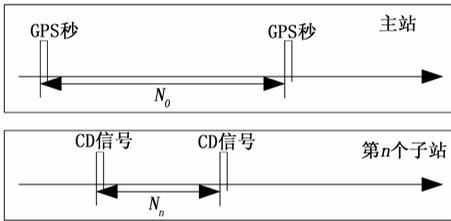


图 5 晶振因素修正

在标定了计时器的精度后,主站可以通过 DR 信号精确测量相邻两个重发数据包之间的时间 t_2 (见图 2)。而这个时间正是子站侦测到两个相邻 CD 信号的时间 t_5 。假定第 n 个子站用本地时钟测量到两个相邻 CD 信号之间的计时脉冲数为 N_n ,计时脉冲宽度为 t_n ,则

$$N_n \times t_n = t_2, t_n = t_2/N_n$$

(上接第 191 页)

4 结论

新型方舱是首次在新一代运载火箭测发控系统中运用,该系统在 2015 年的型号工作中获得成功,其工程指标达到新一代快速、发射运载火箭要求。其外观如图 11 所示。

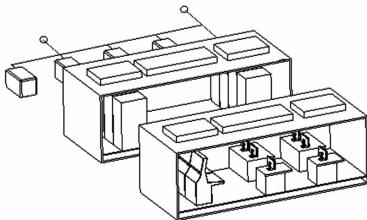


图 11 新型测发控系统外观

2 个标准方舱集成的该系统具有快速移动能力,其功能和操作性达到型号总体测发要求,可运用于今后火箭的快速、移动测发系统中。该系统集成设计技术和模式与解决问题的方法,为今后运载火箭测发系统设计、开发、使用创造了新的途

$$t_5 = N_n \times t_n$$

利用上述讨论的方法,用 GPS 秒脉冲对主站计时间隔进行标定,用相邻重发发时包所对应的 CD 信号对子站的计时器时间间隔进行标定,从而消除了本地时钟带来的误差,进而提高了时间同步的精度。

2) 传输距离带来的误差

电磁波的传输速率是 30 万公里/秒,这意味着每 300 m 就有 $1 \mu s$ 的传输延迟。如果主站和子站之间的安装距离在 300 m 之内,则传输延迟小于 $1 \mu s$,如果主站和子站的安装距离超过 300 m,则传输延迟大于 $1 \mu s$ 。

在许多应用场合,主站与子站分布在 300 m 之内,在考虑微秒级时间同步精度的情况下,可以忽略安装距离所带来传输延迟。但当主站和子站的安装距离超过 300 m 时,必须进行传输延迟的修正。关于传输延迟修正的方法已有很多文献给出,由于篇幅所限,本文只考虑安装距离小于 300 m 的情况。

3 结论

无线校时方案,充分利用了无线通信信道,既完成了数据传递,又完成了同步时钟校准。因此是一种成本低廉的实用性方案。针对传统无线校时方案中校时精度不够高的问题,本文提出采用 nRF905 无线模块的重发机制,实现了微妙级的时钟同步方案。本方案应用在无线绝缘带电检测系统中,取得了良好的效果。

参考文献:

- [1] 邓有强. 输电线路在线监测技术现状研究 [J]. 电力技术资讯, 2013, 10.
- [2] 张九宾. 基于 GPS 的无线传感器网络时间同步技术 [J]. 传感器与微系统, 2009, 28: 6.
- [3] 陈 晔. 基于 IEEE 1588 的无线传感器网络时钟同步方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36: 3.
- [4] 刘晓路. 无线传感器网时间同步算法的比较 [J]. 信号与系统, 2010, 7.
- [5] nRF905 Product Specification, Nordic Semiconductor ASA, Datasheet order code: 051005nRF905 [Z].

径和设计方法^[4],可使用在以后相关系统设计工作中。新一代快速、发射运载火箭的新型测发控系统采用火箭总体测发体制、精简系统布局、缩短测发流程、使用方舱、设备集成先进技术,确保在测发可靠性前提下,实现了测发设备方便转运^[5],满足运载火箭快速简易测发需求;系统的研制成功,实现了航天装备(各类空间载荷)能够快速发射、进入空间目标,该系统技术应用前景广阔。

参考文献:

- [1] 蔡远文,等. 测试发射技术及其在军事航天中的应用与发展 [J]. 航天控制, 2003 (1): 2-3.
- [2] 毛勤俭. 方舱设计手册 [M]. 南京: 河海大学出版社, 2012.
- [3] 杨瑞青,等. 军用自动测试系统通用性技术研究与应用 [J]. 国外电子测量技术, 2009 (1): 18-19.
- [4] 郭志华. 国外军用方舱技术的发展 [J]. 信息与通讯, 2010 (11): 2-3.
- [5] 宋秀兰,等. 军用方舱通用规范 [S]. 总装备部, GJB6109-2007: 5-8.