

一种分布式时钟同步技术设计

孟祥辉¹, 丛 凯², 李 祺³

(1. 中国人民解放军 92228 部队, 北京 100854; 2. 海装驻北京地区第三军事代表室, 北京 100074;
3. 北京机电工程研究所, 北京 100074)

摘要: 时钟同步是分布式网络内各节点设备协同工作的重要前提, 网络内许多任务的完成都需以时钟同步作为基础; 为了实现分布式系统中高精度的时钟同步, 文章在现有的时钟同步技术的基础上, 设计了一种分布式时钟同步技术, 以北斗卫星授时技术作为主同步机制, 单向时钟同步技术作为辅助同步机制; 即在正常情况下网络中的节点设备利用北斗卫星进行授时, 而在无法顺利接收北斗授时信号的少数情况下, 节点设备之间利用单向时钟同步技术完成时钟同步, 两者结合共同实现不同情况下高精度的时钟同步; 在 LabVIEW 编程环境下设计仿真程序对方案进行验证, 结果表明, 该方案可以实现分布式系统中的时钟同步, 方案的可行性可以得到验证, 然后通过进一步的误差分析可知, 误差处在一个可接受的范围内。

关键词: 时钟同步; 分布式网络; 北斗; 授时

Design on a Distributed Clock Synchronization Technology

MENG Xianghui¹, CONG Kai², LI Qi³

(1. Unit 92228 of the Chinese People's Liberation Army, Beijing 100854, China;
2. Third Military Representative Office of Seafarers in Beijing, Beijing 100074, China;
3. Beijing Institute of Mechanical and Electronic Engineering, Beijing 100074, China)

Abstract: Clock synchronization is an important prerequisite for devices to work together in a distributed network, and many tasks in the network are based on clock synchronization. In order to achieve high precision clock synchronization in distributed system, this paper designs a distributed clock synchronization technology based on the existing clock synchronization technology. The Beidou satellite timing technology is used as the main synchronization mechanism, and the one-way clock synchronization technology is used as the auxiliary synchronization mechanism. In other words, under normal circumstances, the node devices in the network use the Beidou satellite for timing, but in a few cases when the Beidou timing signal cannot be received smoothly, the node devices use the one-way clock synchronization technology to complete the clock synchronization, and the combination of the two can achieve high precision clock synchronization under different circumstances. The simulation program was designed in LabVIEW programming environment to verify the scheme. The result shows that the scheme can realize clock synchronization in distributed system, and the feasibility of the scheme can be verified. Then through further error analysis, the error is in an acceptable range.

Keywords: clock synchronization; distributed network; beidou system; timing

0 引言

随着信息技术的高速发展, 许多系统都需要建立在分布式网络的基础之上, 人们对分布式、网络化测量系统的需求越来越高, 对设备之间时钟同步的要求也越来越高^[1]。分布式网络将节点分散在区域内, 一定程度上提高了系统的稳定性和可靠性, 各个设备(从节点)通过有线或无线的方式与中央处理器(主节点)进行信息交互, 能够共同完成复杂任务^[2]。网络中的各个设备节点分布在不同的位置, 同时还配有独立的时钟, 由于设备工作环境的复杂多样, 可能会出现设备节点时钟之间不同步的情况, 由此可能会导致部分工作无法正常进行。尤其是部分要求进行实时调度和控制的分布式系统, 对于时钟同步的要求更为严格。所以, 网络中各设备能够在统一的时钟节拍下进行工

作, 是分布式应用的重要前提。

为了能够给分布式网络中的各个节点设备提供一个统一的时钟, 使得各节点的时钟可以实现精确的时间同步, 本文提出一种时钟同步技术, 利用北斗卫星导航系统的授时服务与单向时钟同步技术, 将两者结合, 实现不同情况下的时钟同步, 最后基于 LabVIEW 设计仿真程序, 对方案进行了验证。

1 传统时钟同步技术

在典型的分布式无线网络中, 目前使用最广泛的是分布式无线传感器网络^[3], 而对于时钟同步算法的研究也主要针对无线传感网络^[4]。其中具有代表性的算法有 RBS 算法、TPSN 算法和 FTSP 算法^[5]。

RBS (reference broadcast synchronization) 算法是基于

收稿日期: 2021-05-06; 修回日期: 2021-05-21。

作者简介: 孟祥辉(1979-), 男, 河南新乡人, 博士, 高级工程师, 主要从事陆战装备论证方向的研究。

引用格式: 孟祥辉, 丛 凯, 李 祺. 一种分布式时钟同步技术设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(8): 223-227, 232.

接收端—接收端的同步机制，引入了参考节点，任意两个待同步节点在接收到参考节点的广播后，记录下收到消息的本地时间，然后与其他节点交换自己记录下的时间^[6]。这种方法的优点在于减小了发射端发送时间对精度的影响，缺点在于信息交换次数多，造成了额外的开销，而且也不适合点对点通信的网络^[7]。

TPSN (time synchronization protocol for sensor network) 算法采用双向成对同步技术^[8]，它的特点在于，同步之前，还有一个层次建立的阶段，在这个阶段，通过信息传递，保证每个节点都有自己的层数标识，然后进入同步阶段，由根节点开始逐层往下进行双向时钟同步，每一级节点只与其上一级的父节点进行同步^[9]。这种算法具有较强的可扩展性，相比 RBS 算法同步精度更高，但缺点在于所有节点都以根节点作为同步标准，一旦根节点失效，重新进行层次建立和同步会增大能耗^[10]。

FTSP (flooding time synchronization) 算法是一种基于发送者—接收者机制的同步算法^[11]，通过参考节点与待同步节点单向广播同步消息的方式来实现全网同步。发送节点广播同步信息，在广播范围内的接收节点根据同步信息解析其中的时间戳，计算自身与发送节点间的时钟偏差，调整本地时钟，完成同步。算法整体采用泛洪广播的同步机制，传输信息量较大，能耗多，计算复杂度也较高^[12]。

上述几种算法的同步过程可粗略地划分为单向时钟同步和双向时钟同步。单向时钟同步的信息传递是单向进行的，由两个节点中的一方发给另一方，而收到信息的一方不需要向发送方返回任何信息，例如 RBS 算法和 FTSP 算法。收到时间信息后，作为收端的一方对信息做适当处理，求出时钟偏移量，然后调整本地时钟。而双向时钟同步类似于握手机制，假设节点 A 与节点 B 进行同步，节点 A 向节点 B 发出同步请求，请求中包含了节点 A 发送时刻的本地时间，节点 B 收到请求时，记下此刻的时间，然后将这一时间信息和要发送确认信息时的本地时间都加入数据包，一并发送给节点 A，节点 A 收到消息后即可求出与节点 B 之间的时延及时钟偏移，然后根据时钟偏移调整本地时钟。一般来说，双向时钟同步的精度都会高于单向时钟同步，但通常也会伴随着更多的信息交换或者更高的计算复杂度。

2 技术设计方案

为了实现高精度的时钟同步，本设计采用北斗卫星导航系统作为主同步机制，而在极少数情况下，由于建筑物的遮蔽，接收设备对于北斗信号的接收可能会受到影响，从而导致时钟同步无法正常进行，此时需要利用其他时钟同步技术作为辅助手段完成时钟同步。

2.1 北斗卫星授时

北斗卫星导航系统由我国自主研发，可以为用户提供全球范围内的全天候、全天时的定位、导航和授时等服务，稳定性和准确度与 GPS 相当^[13]。

北斗授时传递的是国家授时中心发播的标准时间信号，

也就是目前国际通用的标准时间——协调世界时 (UTC, universal time coordinated)。北斗授时技术主要包括 RDSS (radio determination satellite service) 单向授时、RDSS 双向授时和 RNSS (radio navigation satellite service) 授时^[14]。

RDSS 单向授时的原理是在用户终端位置已知的前提下，地面测量控制中心将导航电文通过卫星传递给用户终端 (如图 1 所示)，用户终端收到信号并解出即可得到本地时间与系统时间的偏差。授时误差主要由对信号传播时延的估计决定，在位置已知的情况下，信号传播时延是可以测量的，但该时延受信号传输路径的影响较大。用户终端通常在估算此延迟时存在较大误差，一般精度只能控制在 100.6 ns 以下^[10]。

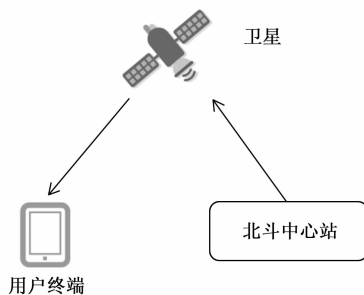


图 1 RDSS 单向授时示意图

RDSS 双向授时的原理是通过用户终端和北斗中心站之间的信息交换来测量信号的传输时延，从而得出时钟差值。北斗中心站通过如图 2 所示的信息交流，获得与用户终端之间的单向传输时延，之后中心站将这个时延发送给用户终端，用户终端利用这个时延，结合导航电文校正本地时钟，调整本地时钟，从而实现与中心站之间的时钟同步。这种方法可以避免授时终端天线位置误差、电离层或对流层改造残差等诸多不确定因素引起的单向授时偏差^[15]，授时精度可达 20 ns^[16]。但由于存在时间信息的交换，卫星和北斗中心站需要响应用户的同步需求，这会占用卫星和北斗中心站的资源，因此对用户容量有限制^[17]。

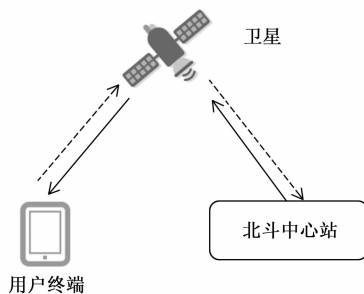


图 2 RDSS 双向授时示意图

RNSS 授时也是一种单向授时方法。如图 3 所示，用户终端与中心站之间没有信息交互，只需接收卫星发播的授时信号，计算卫星到用户终端之间的传输时延，即可获得卫星时间^[18]。还可以利用不同卫星的时间来进一步减小下行传输时延的估计误差，这个误差一般在 20 ns 以内。由于

卫星时间与系统时间之间的误差非常小, 经过计算, RNSS 授时的误差, 即用户终端与北斗系统之间的误差可以控制在 23.7 ns 以内^[10]。

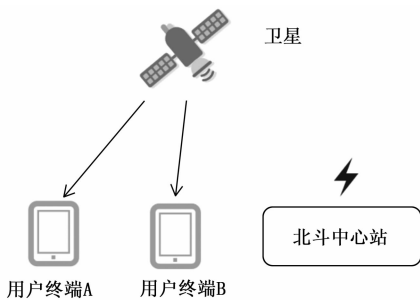


图 3 RNSS 授时示意图

可将以上 3 种授时方法简单地分为单向授时和双向授时。相比于单向授时, 双向授时可以更精确地反映时延信息, 具有较高的授时精度。针对单向授时和双向授时的不同特点, 为了更好地发挥系统的性能, 通常会采取单向授时和双向授时独立工作或组合工作的形式。在一般情况下, 单向授时负责保持定时用户机和中心站系统的时间同步, 双向授时则间隔一个较长时间周期进行, 用于修正这一时间周期内各环节产生的误差^[19]。也就是用尽可能少的双向授时与单向授时结合使用, 以达到接近双向授时的精度^[20]。

利用北斗卫星导航系统可以实现纳秒级别的高精度的时钟同步, 并且对接收设备要求简单, 每个接收设备配备北斗接收模块即可, 这种接收模块在市面上很常见, 无需特别定制。

随着北斗系统在民用领域的不断应用, 各个芯片制造商也开发了基于北斗卫星系统的授时模块, 给各行各业的用户提供北斗授时服务, 实现其在各行业各自具有特殊需要的时间、日期的同步。

表 1 市售芯片授时性能

公司名称	产品名称	授时精度/ns
U-blox	NEO-M8T	20
U-blox	ZED-F9T	5
和芯星通	UM482	20
泰斗微电子	T303-3	15

从表 1 中可以看出, 北斗授时时间精度都较高; 不同制造商, 授时精度略有差异。

2.2 辅助同步机制

在大多数情况下, 北斗导航系统都能与授时模块正常进行通信, 但是在有较高建筑物遮蔽的情况下, 授时模块可能无法正常接收北斗卫星信号, 进而导致时钟同步无法顺利进行。此时需要利用其他时钟同步技术作为辅助同步机制完成时钟同步。本设计中, 辅助同步机制以主同步机制为基础, 获取传输时延, 再利用单向同步技术, 传递时间信息, 得出时钟偏移, 使得设备间能达到高精度的同步。

在单向时钟同步中, 主节点向从节点发送含有本地发

送时间的消息, 从节点收到后将接收时刻的本地时间与主节点的发送时刻的时间信息做处理。如图 4 所示, 是单向时钟同步信息传输过程。

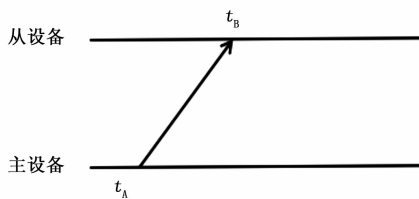


图 4 单向时钟同步示意图

t_A 表示主节点的本地时间, t_B 表示从节点的本地时间, $offset$ 表示主从节点间的时钟偏移, Δt 表示整个传输过程产生的时延, 可得到下式:

$$t_B - t_A = offset + \Delta t \quad (1)$$

Δt 主要由以下几个部分组成: 收发端处理时延、传播时延和发送时延。收发端处理时延是指发端和收端对信息做编码解码等处理所需的时间; 传播时延是指信号在空中传播的时间, 由于电磁波传播速度极快, 这部分时延通常忽略不计; 发送时延是指发出信息所需的时间, 主要受信息长度和发送速率的影响。

传统的方法是信号在空中传播的所需的时间忽略不计, 通过数据长度和发射速率估算发送时延和处理时延^[21], 得到整个传输过程的时延 Δt 之后, 根据公式 (1) 也就可以求出时钟偏移量。但由于部分时延是通过估算得到, 导致这种方法的对时精度不高。为了更高的对时精度, 本文提出另一种方法实现更高精度的单向时钟同步。

在主从节点都与北斗卫星校准的时候, 需要进行信息传递, 获取相关时间信息, 为辅助同步机制打下基础。如图 5 所示, 具体过程如下:

1) 在节点设备与北斗卫星系统完成时钟同步的前提下, 主节点向从节点发送含有本地发送时刻的信息。

2) 从节点收到后将这一信息与本地接收时刻的时间信息做处理, 求出传输时延。由于双方时钟是经过校准的, 时钟偏移 $offset$ 可以看作是 0, 根据公式 (1) 即可求出整个过程的传输时延 Δt , 从节点将这个时延数据 Δt 记录下来。

3) 在需要利用辅助同步机制时, 进行如图 4 所示的单向时钟同步, 从节点在对时间信息进行处理时, 将前面记下的 Δt 当作已知值, 代入公式 (1) 即可求出时钟偏移量 $offset$ 。从节点根据这个偏移量调整本地时钟, 完成时钟同步。

3 仿真及分析

3.1 仿真环境

本文基于 LabVIEW 环境设计仿真程序, 主要以一条简单的传输链路作为信息传递的基础 (如图 6 所示), 发送端相当于主节点, 接收端相当于从节点, 模拟不同的场景对方案进行验证。由于北斗授时精度主要由选用的北斗卫星信号接收模块所决定, 且精度为纳秒级别, 所以主要对辅

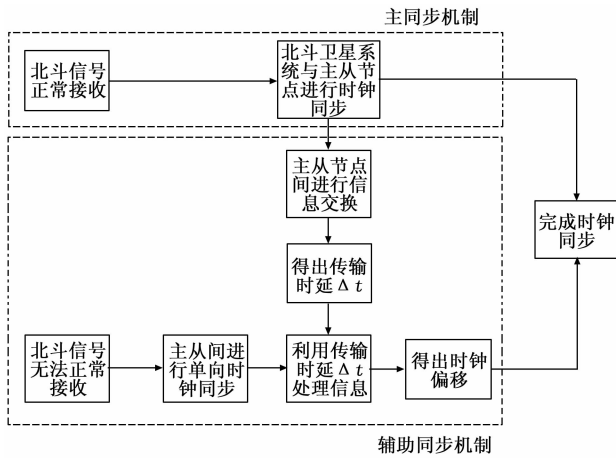


图 5 辅助同步机制原理图

助同步机制进行验证。程序如图 7 所示。

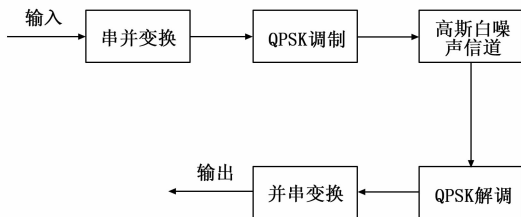


图 6 传输链路模块图

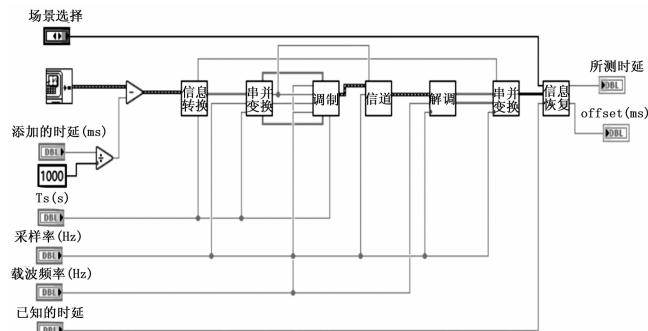
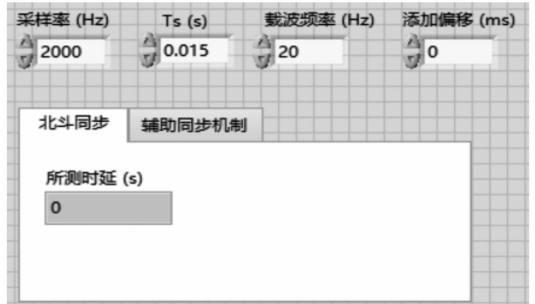


图 7 程序框图

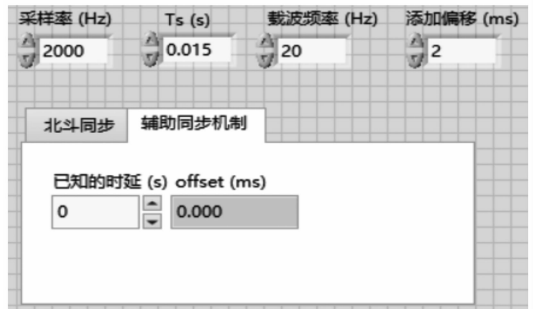
由于时间信息在 LabVIEW 中的数据格式为“时间戳”(Timestamp, LabVIEW 中一种表示绝对时间的数据类型), 为了便于信息的传递和处理, 在发端将其转换为二进制数据进行传输, 相应地, 在收端也有恢复时间信息的子程序。之后, 将转换后的二进制信息进行串并变换, 得到两路并行的数据, 然后进入调制模块, 把两组数据分别与 $\sin\alpha ct$ 和 $\cos\alpha ct$ 相乘, 得到的数据再经加法器相加得到 QPSK 调制信号。然后调制信号进入高斯白噪声信道, 之后再进入解调模块进行相干解调, 将输入信号分别与两个频率相同且正交的载波相乘, 得到两组数据, 再将两组数据进行判决, 然后将两个支路的并行数据恢复成串行数据, 最后经过信息恢复模块, 将二进制信息转换为时间戳信息, 再对其进行相关处理, 得出时延。

3.2 仿真过程

仿真步骤如下: 首先在前面板中(如图 8(a)所示)按表 2 设置相关参数, 在选项卡中选择“北斗同步”, “添加偏移”是指为了让效果更明显而手动添加的收端与发端的时钟偏移量, 此时设为 0, 运行程序, 然后观察运行结果, 可得到所测时延, 将这个时延数据记录下来。然后在选项卡中选择“辅助同步机制”, 如图 8(b)所示, “添加偏移”设为 2, 将上一步记录的时延数据输入“已知的时延”, 运行程序, 观察运行结果。



(a) 仿真程序前面板



(b) 仿真程序前面板

图 8 前面板图

表 2 仿真参数

参数	数值
载波频率	20 Hz
符号周期	0.015 s
采样率	2 000 Hz
高斯白噪声	均值为 0, 标准差为 0.5

仿真具体实现过程如下: 当选项卡中选择“北斗同步”, “添加偏移”设为 0 时, 此时发端和收端共用同一个主机时钟源, 模拟收发端与北斗卫星正常进行同步的情况, 然后运行程序, 在程序中, 发端向收端发送含有本地发送时刻的信息, 收端收到后, 解出信息并处理, 得出整个过程消耗的时延 Δt , 如图 9 所示。

收端将这个时延数据记下。在之后使用辅助同步机制时, 将这个时延作为已知条件。

利用辅助同步机制进行时钟同步时, 需在选项卡中选择“辅助同步机制”, 同时, “添加偏移”设为 2 ms, 此时虽然发端和收端仍然使用相同的主机时钟源, 但是由于人为地添加了时钟偏移, 使得发端时钟比收端时钟“慢”了



图 9 运行结果图

2 ms, 也就模拟了实际应用中出现的不同步的情况。将图 9 中测得的时延作为已知条件在前面板输入, 如图 10 所示。

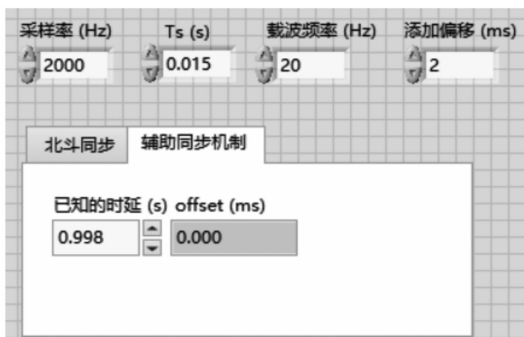


图 10 仿真程序前面板

运行程序, 可以得到如图 11 所示的结果。



图 11 运行结果图

可以看到程序输出的结果 offset 为 2.001 ms, 说明通过辅助同步机制求出的时钟偏移为 2.001 ms, 而程序运行前人为添加的偏移量为 2 ms, 两者十分接近。

3.3 结果分析

通过以上仿真可以看到, 通过辅助同步机制求得的时钟偏移与实际偏移之间存在 0.001 ms 的误差, 这是由于软件环境波动导致的不稳定现象, 方案的可行性仍然可以得到证明。

而在实际情况中, 辅助同步机制的误差一部分来自于北斗导航系统。因为设备在正常情况下与北斗卫星导航系统实现了同步, 我们将此时的时钟偏移 offset 看作了 0, 以此为前提求得了时延 Δt , 然后将时延应用在了辅助同步机制中。但实际上, 虽然网络中的各节点设备与北斗卫星进行了同步, 设备之间仍然存在时钟偏移, 虽然偏移量很小,

但却被当作 0 来处理, 由此导致了辅助同步机制的误差。但是又由于北斗卫星同步精度为纳秒级, 使得辅助同步机制下的这一部分误差也为纳秒级, 这一量级的误差是可以接受的。而另一部分误差来自于传输环境的波动。在利用辅助同步机制进行同步时, 之前测得的 Δt 被当作已知值代入了公式进行计算, 也就相当于把 Δt 看作了此时的整体传输时延。若传输链路出现了波动, 导致此时整个传输过程的时延不等于 Δt , 就会使得最终的 offset 出现误差。但若传输链路始终处于一个相对稳定的环境下, 那这一部分误差是完全可以接受的。

与以往的时钟同步技术相比, 本方案没有将整个过程产生的时延划分为不同的部分分别去计算或者测量, 而是将所有时延看作一个整体进行处理, 解决了收发端处理时延难以估算的问题。但是辅助同步机制的前提是需要设备与北斗卫星进行正常同步时, 进行信息传递, 获取设备间的传输时延。这在一定程度上增加了信息交换次数, 带来了能量损耗。但是若网络长期处在一个稳定条件下, 一次信息交换得到的传输时延在很长一段时间内都是适用的, 因此在主同步机制能够正常运行的情况下, 主从节点设备间可以周期性地传递信息, 获取传输时延, 为辅助同步机制做准备。

4 结束语

本文提出的用于分布式网络的时钟同步方法, 在北斗卫星授时的基础上, 利用单向时钟同步技术, 确保网络内的节点设备任何时刻都能够实现高精度的同步。利用 LabVIEW 设计的仿真程序验证了方案的可行性, 只要收发双方之间建立了稳定的可以互相传递信息的传输链路, 即可利用该方案获得高精度的时钟同步。同步误差主要来自于传输环境的稳定性和北斗授时精度。传输环境的稳定性主要受传输链路和外界环境的影响, 因此需要选择可靠的不易波动的传输链路, 以及尽可能地使传输链路始终处于相对稳定的环境中。而北斗授时精度与选择的授时模块有关, 不同厂商制造的授时模块精度有所差异。在实际应用中应根据实际需求, 选择合适的硬件模块以达到理想效果。

参考文献:

- [1] 谢太军. 分布式系统高精度时钟同步的研究与实现 [D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [2] 任雅楠. 基于 IEEE 1588 的分布式无线网络时钟同步技术研究 [D]. 山西: 中北大学, 2019.
- [3] TINGEN J, PHILBECK L, HOLCOMB L B. Developing classroom web sites for 21st century learning [J]. Kappa Delta Pi Record, 2011, 47 (2): 88-90.
- [4] 庄晓燕. 分布式测试系统时钟网络结构与同步算法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [5] 林晓鹏. 无线传感器网络时间同步技术分析 [J]. 智能计算机与应用, 2016, 6 (2): 17-19.

(下转第 232 页)