



地球物理学进展  
*Progress in Geophysics*  
ISSN 1004-2903, CN 11-2982/P

## 《地球物理学进展》网络首发论文

题目： 无 GPS 受限的分布式时钟同步系统的设计  
作者： 淳少恒，刁庶，陈儒军  
收稿日期： 2021-10-20  
网络首发日期： 2022-03-22  
引用格式： 淳少恒，刁庶，陈儒军. 无 GPS 受限的分布式时钟同步系统的设计[J/OL]. 地球物理学进展.  
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2982.p.20220321.1101.010.html>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 无 GPS 受限的分布式时钟同步系统的设计

淳少恒<sup>1</sup>, 刁庶<sup>1</sup>, 陈儒军<sup>\*2</sup>

1. 无锡职业技术学院控制技术学院, 无锡 214121

2. 中南大学地球科学与信息物理学院, 长沙 410083

\*通信作者 陈儒军, 男, 1973 年生, 博士, 副教授, 主要从事地球物理仪器及信号处理. E-mail: chen.rujun@foxmail.com

**摘要** 为解决在井下或者隧道内这些完全没有 GPS 信号的环境下, 地球物理仪器也能进行分布式勘探这一问题, 本文首先对分布式算法 LSTS (Least Square Estimation Based Time Synchronization) 进行改进得到一种常增益的 LSTS 算法, 记为 LSTS-CG (LSTS with Constant Gain), 然后基于该算法设计出一种全新的不依赖 GPS 的分布式时钟同步系统。LSTS 算法最开始是针对无线传感网提出的, 但对地球物理仪器具有极强的借鉴意义。改进后的 LSTS-CG 算法不仅具有同步误差小, 同步效果稳定, 还具有计算量少, 存储量小等优点, 所以十分适用于分布式勘探系统。在实际设计中, 本文在 FPGA 芯片中实现了 LSTS-CG 算法, 包括设计实现相对斜率估计算法, 低通滤波器, 斜率补偿算法和相位补偿算法, 并且解决了该类电路设计的一些普遍的关键性问题, 如连续离散的虚拟时钟的产生和兼容 GPS 授时方式的设计等。这些问题的解决很好地确保了本系统的高效性和实用性, 使得本系统被大规模应用成为了可能。本文在一片 FPGA 内就完成了所有功能模块的设计, 最大程度地简化了电路结构, 提升了系统的稳定性。通过对本系统的同步误差进行测试, 结果表明, 即使是采用普通晶振, 该系统的同步误差也能达到亚微秒级, 并且还具有功耗低, 成本低廉等优点。最后, 本文从通信时延, 拓扑和周期这三个方面, 测试了本系统的性能, 所得结果具有一定的规律性, 能为野外施工方案的设计提供指导意见。

**关键词** 时钟同步; 常增益的 LSTS 算法; 地球物理仪器; 分布式勘探; FPGA

## Circuit design of a distributed time synchronization system without GPS restriction

CHUN Shao-heng<sup>1</sup>, DIAO Shu<sup>1</sup>, CHEN Rujun<sup>\*2</sup>

1. Control Technology Institute, Wuxi Institute of Technology, Wuxi, 214121, China

2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha, 410083, China

**Abstract** This paper designs a new distributed time synchronization system without GPS restriction to help geophysical instruments perform distributed prospecting in an environment where there is no GPS signal at all, such as in the mine or the tunnel. In order to solve the problem that geophysical instruments can also perform distributed prospecting in underground or tunnel environments where there is no GPS signal at all, this paper first optimizes the distributed algorithm LSTS (Least Square Estimation Based Time Synchronization) to obtain a constant gain LSTS algorithm which denoted as LSTS-CG (LSTS with Constant Gain), and based on this algorithm, a new distributed time synchronization system without GPS restriction is designed. The LSTS algorithm was originally proposed for WSNs (Wireless Sensor Networks), but it has a strong reference for geophysical instruments. The optimized LSTS-CG not only has the advantages of smaller synchronization error and more stable synchronization effect, but also has the advantages of less computation and smaller storage, so it is very suitable for distributed prospecting systems. In the actual design, this paper implements the LSTS-CG algorithm in FPGA (Field Programmable Gate Array), including designing the implementation of relative drift estimation algorithm, low-pass filter, drift compensation algorithm and offset compensation algorithm. And some common key problems in this type of circuits have been solved, including the generation of continuous discrete virtual time and the design of GPS-compatible timing mode. The

收稿日期: 2021-10-20

基金项目: 校级博士科研课题基金项目 (BT2022-02)、国家自然科学基金基础科学中心项目 (72088101) 和国家自然科学基金青年项目 (42104142) 联合资助

作者简介: 淳少恒, 男, 1988 年生, 博士, 副教授, 主要从事电法仪器研究. E-mail: chunsh123@126.com

网络首发时间: 2022-03-22 13:08:41 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2982.p.20220321.1101.010.html>

solution of these problems ensures the efficiency and practicability of the system, making it possible for the system to be applied on a large scale. In this paper, the all functional modules are completed in a FPGA, which simplifies the circuit structure and improves the stability of the system. By testing the synchronization error of this system, the results show that even with ordinary crystal oscillator, the synchronization error can reach sub-microsecond level, and the system also has the advantages of lower power consumption and lower cost. Finally, we test the performance of this system from the three aspects of communication delay, topology and cycle. The results have some regularity and can provide guidance for the design of field construction scheme.

**Key words** Time synchronization; LSTS-CG; Geophysical instrument; Distributed prospecting; FPGA

## 0 引言

随着多年经济的飞速发展,人类对矿产资源的需求量已达到惊人的程度。然而,近地表浅层矿产资源已基本被开采殆尽,因此人类在提高矿产资源利用率的同时,向深部矿产进军是一个主要的发展趋势(曹令敏,2011;叶益信等,2011;刘列峰,2014;李鹏等,2021)。

要对深部矿产进行勘探,首要解决的问题就是提高地球物理仪器勘探的深度和精度。分布式电磁勘探系统采用信息多次覆盖技术,在不增加发送机功率(底青云等,2006;张碧勇等,2014)和电磁耦合感应(Routh *et al.*, 2001)的前提下,就可大幅度增强二次源信号的强度,从而提高勘探深度和精度。再者,该类勘探系统布点密集,一次布点就可完成对测区的测量,具有勘探效率高,横向分辨率高等优点。所以,采用分布式电磁勘探系统进行深部勘探是一种较为理想的解决方案(底青云等,2013)。对于分布式勘探系统,各采集节点需要同步采集数据,并且时钟的同步误差越小,采集数据的质量就越有保证。在后续数据处理中,也需要在全局公共时钟下对采集的数据进行组合和分析,以进一步提高数据的信噪比。所以时钟同步技术是分布式勘探系统的一项基本支撑技术,甚至是该类系统能被有效应用的先决条件。

目前在地球物理仪器中应用最广的时钟同步技术是 GPS (Global Position System) 授时法和 IEEE1588 协议授时法。GPS 授时法包括 GPS 直接授时法和 GPS 协同授时法。GPS 直接授时法顾名思义就是地球物理仪器通过 GPS 接收器来获取统一的时钟。这种方法虽然具有同步误差小,覆盖范围广等优点,但它易受外界环境的影响而导致失锁。当 GPS 失锁后,同步误差达到毫秒级甚至更差,这显然不能满足分布式电磁勘探系统对时钟同步误差的要求。GPS 协同授时法是 GPS 与本地晶振(一般为恒温晶振)通过协作的方式提供授时(陈凯等,2013;淳少恒等,2015;严发宝等,2017;张启卯等,2020;严超等,2021)。当 GPS 锁定时,该方法一方面用 GPS 提供的秒脉冲 1PPS 来授时,另一方面以 1PPS 为基准信号来对恒温晶振的频率进行校准。当 GPS 失锁后,就停止频率校准,然后立刻对恒温晶振分频产生本地秒脉冲以替代 1PPS,从而继续提供授时。当 GPS 失锁后,这种方法的同步误差就完全取决于恒温晶振的性能。所以这种方法只能解决 GPS 短期失锁的问题,对长期失锁问题则不能有效解决。再者,由于恒温晶振的功耗较高,成本高,所以该方法不适合大规模用于分布式电磁勘探系统。通过上述分析可知, GPS 授时法都不同程度地依赖 GPS 信号,当 GPS 长期失锁,甚至完全没有 GPS 信号时,如井下勘探或隧道内勘探等, GPS 授时法就完全不能提供有效的授时服务。基于 IEEE1588 协议的授时法是一种不依赖 GPS 的授时法(魏佳楠,2014;曹家铭,2016)。在同步过程中,主节点周期发送时间数据包,当从节点接收到主节点的数据包后就立刻标记自身的本地时钟,然后计算自身本地时钟与主节点时钟的差值,用这个差值来对自身本地时钟的相位进行补偿,从而得到同步的时钟。但分析可知,这种授时法不适用于分布式电磁勘探系统。首先,该方法是在假设勘探系统中每个节点的晶振频率(本地时钟的斜率)相等的前提下运行的。也就是说该方法只对节点本地时钟的相位有进行补偿,而对本地时钟的斜率没有进行补偿。在实际工作中,即使是同款的晶振它们的频率也会有一定的差异。当不对频率进行补偿时,会使得时钟同步误差大,且同步效果不稳定。其次是这类方法只适用于主从(Leader-Follower)通信拓扑的时钟同步。而分布式电磁勘探系统会因野外地理环境和施工条件等因素的限制,经常变换采集节点之间的通信拓扑,这使得该类授时法的实用性受到很大限制。所以研究一种在有无 GPS 信号的环境下,都能提供高精度长时

间的完全分布式授时就显得尤为重要，甚至是迫在眉睫。

基于一致性协议的时钟同步技术是一种完全分布式的且不依赖 GPS 的同步技术。这类时钟同步技术最开始是针对无线传感网提出的，但对地球物理仪器具有极强的借鉴意义。该类技术在同步过程中，每个节点都运行相同的同步算法，节点之间周期性地交换时间数据包。当节点接收到时间数据包后经过一系列的运算就可获得一个公共的全局时钟，从而完成时钟同步。在这类同步技术中，最经典的算法是 ATS (Average TimeSynch) 算法 (Schenato *et al.*, 2011)，WMTS (Weighted Maximum Time Synchronization) 算法 (He *et al.*, 2014) 和 LSTS (Least Square Estimation Based Time Synchronization) 算法 (Tian, 2015, 2017)。但由于这些技术的实现需要在硬件中计算相对斜率，设计低通滤波器，还需要计算斜率补偿量和相位补偿量，所以目前市面上还没有一款基于这种技术的时钟同步系统。在这些经典的算法中，LSTS 算法的同步误差和同步效果都是最优的 (Tian *et al.*, 2016)。但分析发现，该算法仍不适合给分布式电磁勘探系统提供授时服务。首先，由于该算法在对晶振的频率进行补偿时采用了衰减的增益，这直接导致低通滤波器和斜率补偿量算法的设计复杂程度大，消耗更多的计算资源，并且各节点还需分别存储不同邻居节点的增益，进一步增加了存储量。其次，在电路中分配给增益的存储空间是有限的。当增益持续衰减时，在某一时刻，增益势必会变为 0。这就会导致 LSTS 算法的斜率补偿失效，进而使得同步误差大，同步效果不稳定。为使得该算法适用于分布式勘探系统，本文把衰减的增益设计成常数，记为 LSTS-CG (LSTS with Constant Gain) 算法。对于 LSTS-CG 算法，当增益都取 0.5 时，只需移位操作就可完成乘法计算，大幅度降低了低通滤波器和斜率补偿算法的设计复杂程度，同时还具有存储量小，同步误差小，同步效果稳定等优点，所以十分适用于分布式电磁勘探系统。

本文以 LSTS-CG 算法为基础，采用普通晶振作为本地时钟，设计出一种全新的不依赖 GPS 的分布式时钟同步系统。在这个系统中，除实现了 LSTS-CG 算法外，本文还解决了该类电路设计的一些普遍的关键性问题，如以“周期计算+预测”的方式产生连续离散的虚拟时钟；参考 GPS 授时的方式，设计一种以“同步秒脉冲+同步时间”的方式提供授时服务等。这些问题的解决可以确保最大化地发挥 LSTS-CG 算法的性能，使本系统在分布勘探系统中的大规模应用成为可能。由于本系统提供授时的方式与 GPS 一样，所以本系统可以兼容 GPS 授时法，即本系统既可以在完全不依赖 GPS 的情况下，作为独立的系统提供授时服务，也可以与 GPS 授时法协同使用，以解决 GPS 易失锁的问题。本系统支持仅在勘探系统中的一个或者几个采集节点安装 GPS 接收器，剩余节点就可同步到 GPS 的时间这一操作。所以该系统使用灵活，可组合性强。此外，由于仅采用一片 FPGA 芯片就完成了所有功能的设计，这最大程度地简化了外围电路，提高了系统的稳定性，并且功耗低，价格廉价，性能优越，所以本文设计的时钟同步系统可为目前绝大多数的分布式电磁勘探系统提供一种精密的授时方案。

## 1 总体电路设计方案

本次设计的时钟同步系统由多个节点组成，每个节点都留有固定接口和授时接口。当被用来提供授时服务时，只需把各节点固定到分布式电磁勘探系统中的各采集单元中，所以使用方便。时钟同步系统的节点的电路主要由无线通信模块和处理器模块两部分组成。本次硬件设计，无线通信模块选用 TI 公司的 CC2420 这款基于 Zigbee 协议的射频收发器 (CC2420, 2010)。处理器选用 Xilinx 公司的 XC6SLX16 这款 FPGA 芯片 (XC6SLX16, 2012)。采用 FPGA+CC2420 这一硬件结构，首先是 CC2420 的性能稳定，功耗低，最高数据传输率可达到 250kbps。其次是 CC2420 在每次发送和接受数据包时，该芯片的 SFD 管脚都会产生一个上升沿信号。由于该信号是从 MAC 层产生的，所以 FPGA 通过该管脚标记时间戳的精度高，且标记时间戳方便。最后是 FPGA 的集成度高，灵活性好，很多外围电路都可以在 FPGA 中完成设计，提高了电路的稳定性。如图 1 所示为，节点的电路结构和实物。从图中可以看出，节点的电路结构和实物都极为简单。

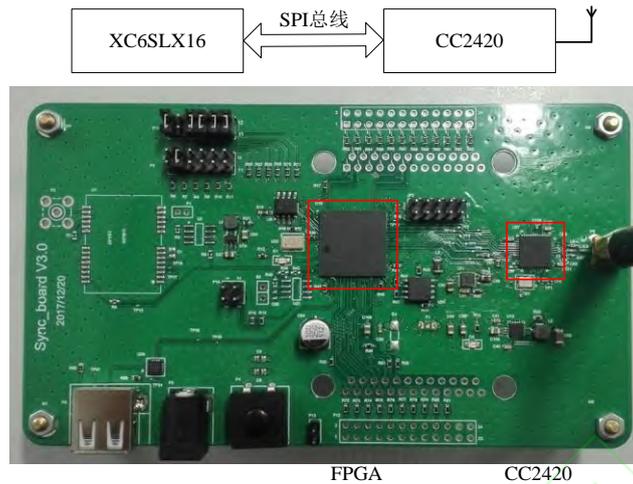


图1 节点的电路结构图  
Fig.1 Circuit structure of a node

如图2所示为，XC6SLX16内部电路结构。

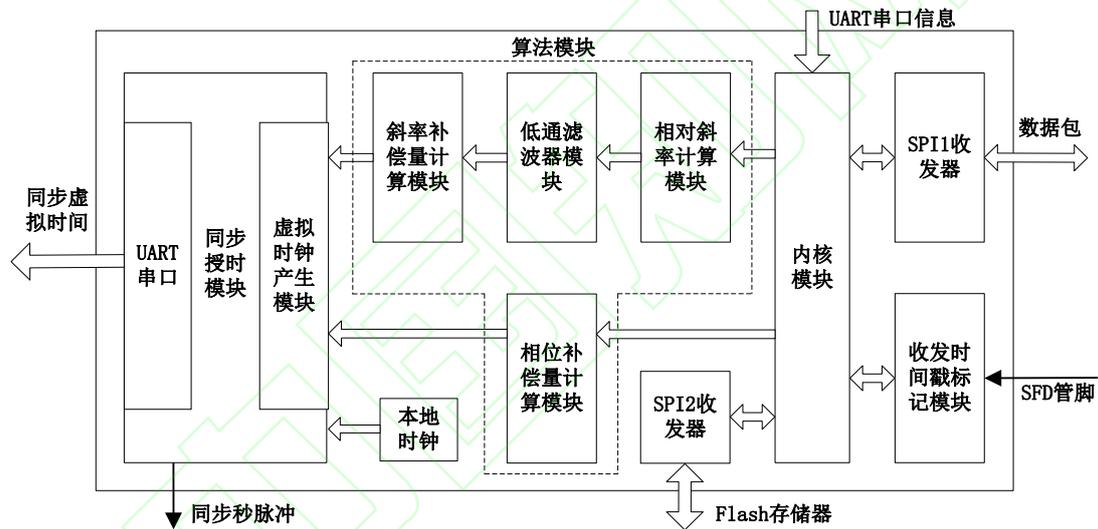


图2 XC6SLX16内部电路结构  
Fig.2 Internal circuit structure designed in the FPGA

由上图可知，XC6SLX16内部电路主要包括SPI收发器，收发时间戳标记模块，内核模块，算法模块和同步授时模块。每个模块的主要功能如下。

(1) SPI收发器：该模块包括SPI1收发器和SPI2收发器，分别用来完成内核模块与CC2420和Flash存储器之间的通信。

(2) 收发时间戳标记模块：该模块用来标记和存储数据包接收和发送时对应的本地时钟。

(3) 内核模块：该模块是XC6SLX16内部电路的控制核心，主要包括完成CC2420的配置和初始化；协调数据包的发送和接收，以避免时间碰撞；协同收发时间戳标记模块完成接收时间戳的标记和存储；再就是解析接收的数据包，完成数据的分发、存储和丢包等处理。

(4) 算法模块：该模块用来计算时钟同步算法的相对斜率量，斜率补偿量和相位补偿量。

(5) 同步授时模块：该模块用来计算和预测每次系统时钟上升沿到来时的虚拟时钟，并根据得到的虚拟时钟产生同步秒脉冲和同步虚拟时间，以完成同步授时。

## 2 算法的设计

### 2.1 LSTS-CG 算法介绍

在时钟同步系统中，每个节点都有自己的本地时钟。本地时钟就是计数器对节点中晶振的上升沿或下降沿进行计数，并输出数值。设计中选用晶振的型号为 7C-50.000MBE，该晶振是市面上的一款十分普通的晶振，标准频率为 50MHz，频率准确度为  $\pm 50\text{ppm}$ 。式 (1) 为本地时钟的数学模型，

$$\tau_i(t) = \alpha_i t + \beta_i \quad (1)$$

其中  $\tau_i(t)$  是节点  $i$  的本地时钟读数， $t$  是绝对时间， $\alpha_i$  是晶振的斜率，也就是晶振的频率， $\beta_i$  是时钟的初始相位。

在时钟同步过程中，各节点以伪周期形式广播自己数据包，该数据包包含斜率补偿量，相位补偿量和发送时间戳。以节点  $j$  和  $i$  为例，当节点  $j$  接收到邻居节点  $i$  发送的数据包后，就立刻标记自己的本地时钟，然后利用节点  $i$  此次发送的数据包和第一次发送的数据包以及接收数据包时标记的接收时间戳来完成 LSTS-CG 算法的计算。整个算法的计算过程如下。

(1) 首先计算节点  $j$  的相对斜率量  $\hat{\alpha}_{ij}(l)$ ，并对  $\hat{\alpha}_{ij}(l)$  进行低通滤波处理，

$$\hat{\alpha}_{ij}(l) = \frac{\tau_j(l_{id}) - \tau_j(0_{id})}{\tau_i(l_i) - \tau_i(0_i)} \quad (2)$$

$$\eta_{ij}^{-1}(l) = (1 - \rho_e) \eta_{ij}^{-1}(l-1) + \rho_e \hat{\alpha}_{ij}^{-1}(l) \quad (3)$$

其中  $l$  表示节点  $i$  所发数据包的序号， $\tau_i(l_i)$  和  $\tau_i(0_i)$  分别表示节点  $i$  第  $l$  次和初次发送数据包时所标记的发送时间戳， $\tau_j(l_{id})$  和  $\tau_j(0_{id})$  分别表示节点  $j$  接收到节点  $i$  发送的第  $l$  次和初次数据包时所记录的接收时间戳， $\rho_e \in (0,1)$ ， $\eta_{ij}(l)$  为相对斜率量被低通滤波后的量， $\eta_{ij}(0) = 1$ 。由于数据包的传输存在时延，所以上文中表示收发时间戳的符号有所不同。

(2) 然后计算斜率补偿量  $\hat{\alpha}_j(k+1)$  和相位补偿量  $\hat{\beta}_j(k+1)$ ，

$$\hat{\alpha}_j(k+1) = (1 - \rho_a) \hat{\alpha}_j(k) + \rho_a \eta_{ij}^{-1}(l) \hat{\alpha}_i(k) \quad (4)$$

$$\hat{\beta}_j(k+1) = \hat{\beta}_j(k) + \rho_b (\hat{\tau}_i(l_i) - \hat{\tau}_j(l_{id})) \quad (5)$$

其中  $\rho_a \in (0,1)$ ， $\hat{\alpha}_j(0) = 1$ ， $k$  为节点  $j$  数据更新的次数， $k \geq l$ ， $\rho_b \in (0,1)$ ， $\hat{\beta}_j(0) = 0$ ， $\hat{\tau}_i(l_i) = \hat{\alpha}_i(k) \tau_i(l_i) + \hat{\beta}_i(k)$ ， $\hat{\tau}_j(l_{id}) = \hat{\alpha}_j(k) \tau_j(l_{id}) + \hat{\beta}_j(k)$ 。

当得到斜率补偿量和相位补偿量之后，虚拟时钟计算模块按照如下公式计算虚拟时钟，为授时服务做准备。

$$\hat{\tau}_j^n = \hat{\alpha}_j(k) \tau_j^n + \hat{\beta}_j(k) \quad (6)$$

其中  $\tau_j^n$  表示节点  $j$  第  $n$  次标记自身的本地时钟读数。

上述公式中， $\rho_e$ ， $\rho_a$  和  $\rho_b$  都为常数，当它们都取 0.5 时，在硬件中只需一步简单的右移操作就可完成乘法运算，大幅度减少了算法的计算量和硬件资源的消耗。

### 2.2 运算器的设计

在 FPGA 中设计时钟同步算法之前需要对算法的各中间变量进行量化。如表 1 所示为实际设计中算法的各中间变量量化的位数。

表1 算法的各变量量化位数  
Tab.1 The quantization bits of each variable of the algorithm

变量	相对斜率	滤波后的相对斜率	斜率补偿量	本地时间	相位补偿量	虚拟时钟
量化位数	40bits	40bits	40bits	48bits	48bits	48bits

注：前三个量包含整数和小数部分，其中整数部分占用 1bit，小数部分占用 39bits。后三个量只有整数部分，没有小数部分。

由于 LSTS-CG 算法都是采用常增益，所以在 FPGA 中设计该算法只需设计不同位数的乘法器和除法器，而无需设计其它种类的运算器，如开方器等。对于乘法器可以选择直接调用 Xilinx 公司提供的 IP 核，完成相应配置就可使用。但这种方法使得部分乘法器和除法器需要特殊的硬件资源来支持，从而降低了整个程序的可移植性。为保持整个程序的可移植性和通用性，本次设计根据乘除运算的规则，通过加减、移位和比较等基本方法来实现乘除运算。当运算器设计完成后，在设计时钟同步算法时只需重复调用这些运算器即可。

### 3 同步授时模块

“同步秒脉冲+同步时间”是提供授时服务最基本，也是应用最广的一种方式，如 GPS 定位系统和北斗卫星导航系统等都是以这种方式提供授时服务。这种方式提供的授时服务，通过同步秒脉冲来体现同步误差，同步时间按照 UTC (Universal Time Coordinated) 形式输出，使得授时协议十分简单，很方便底层硬件对时间的获取。为能更好地给分布式电磁勘探系统提供授时服务，增加本系统的实用性和通用性，本文基于 LSTS-CG 算法，设计完成了以“同步秒脉冲+同步时间”的方式提供授时服务。

要产生同步秒脉冲信号，首先要解决的核心问题就是，每次系统时钟的上升沿到来时，是否都能产生虚拟时钟。也就是说能否产生连续离散的虚拟时钟。如果采用标记本地时间，然后按照式 (2) ~ (6) 来计算虚拟时钟，这在一个系统时钟周期内显然是不可能完成的。为解决这个问题，本次采用“周期计算+预测”的方案来完成设计。如图 3 所示为产生连续离散的虚拟时钟的电路结构。

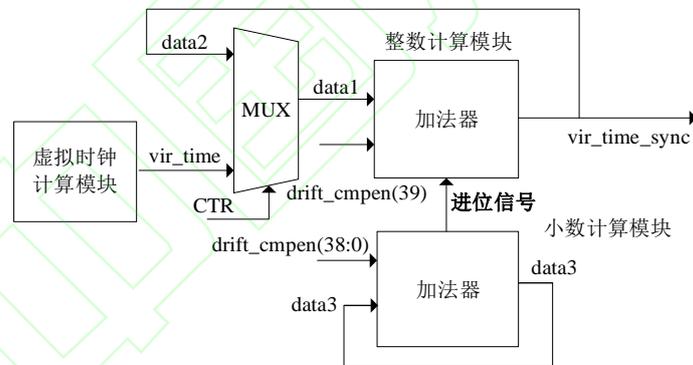


图 3 产生连续离散的虚拟时钟的电路结构  
Fig.3 Circuit structure for generating the continuous discrete virtual clock

图 3 中的虚拟时钟计算模块每 1s 被启动一次，每次被启动时，就标记本地时钟，然后联合存储的斜率补偿量和相位补偿量按照式 (6) 计算虚拟时钟。图 3 中的虚拟时钟计算模块就是方案中的“周期计算”。“周期计算”只能得到某些特定时刻的虚拟时钟，而特定时刻中间的虚拟时钟仍然不能得到。图 3 中的右半部分是方案中的“预测”，用来计算中间时刻的虚拟时钟。

由时钟同步算法可知，每次系统时钟的上升沿到来时，本地时钟就加 1，对应的虚拟时钟就要加一个斜率补偿量的数值。由于虚拟时钟没有小数，而斜率补偿量包含整数部分  $drift\_cmpen(39)$  和小数部分  $drift\_cmpen(38:0)$ ，为正确计算虚拟时钟，需要把斜率补偿量的整数和小数分别输出到整数计算模块和小数计算模块。这两个计算模块通过进位的方式连接。每次系统时钟的上升沿到来时，各加法器就计算一次，这样就可预测出连续离散的虚拟时钟  $vir\_time\_sync$ 。由于上述的“预测”都是采用加法器完成式设计的，所以能在一个系统时钟周期内完成计算。当得到连续离散的虚拟时钟后，用得到的

数值除以数值  $a$ ，取商的整数部分作为同步虚拟时间。该虚拟时间可进一步写为 UTC 的形式，然后通过 UART 串口输出，这样就可以提供授时服务。数值  $a$  是一个可人为取值的正整数，该数值可以根据硬件资源来选取。当节点设计除法器的资源比较丰富时，数值  $a$  可以取 1s 所表示的数值。当资源比较匮乏时，数值  $a$  可以在 1s 所表示数值的周围取 2 的指数，这样在计算同步虚拟时间时只需移位操作即可。

图 3 中，MUX 是一个由 CTR 控制的多路复用器。当 CTR=0 时，data2 与 data1 导通，当 CTR=1 时，vir\_time 与 data1 导通。CTR 由虚拟时钟计算模块控制，当完成虚拟时钟的计算后，该模块才把 CTR 置为高电平，并且只持续一个系统时钟周期。其余的时段，CTR 均为 0。

需要注意的是，当把虚拟时钟通过 MUX 多路复用器装载到预测模块时，这时的虚拟时钟应该是装载那一刻的本地时钟对应的虚拟时钟。而虚拟时钟计算模块需要多个系统时钟周期才能完成计算，这表明显然不可能在装载的瞬间计算出虚拟时钟。本次设计的解决方法是，先测出标记时刻与装载时刻的时间差，然后把这个差值加到标记时刻得到一个新的本地时间，以这个新的本地时间来计算虚拟时钟，这样就得到装载时刻的虚拟时钟。由于 FPGA 内的电路都是严格按照系统时钟的上升沿来工作的，所以在以系统时钟周期为单位的情况下，这个时间差的误差几乎没有。

## 4 实验结果

### 4.1 硬件系统介绍

如图 4 所示为设计的时钟同步系统。该系统一共由 16 个节点组成，其中 15 个节点是正常节点，剩下的一个是辅助测试节点。正常节点与辅助测试节点的电路板完全一样。当一个节点被用作不同的功能时，只需往电路板中烧写相应的程序即可。这充分利用了 FPGA 的编程灵活性，同时也节省了硬件成本。辅助测试节点主要被用来测量时钟同步算法的同步误差。当测量整个系统的同步误差时，就把各节点产生的同步秒脉冲输入到辅助测试节点。辅助测试节点每检测到有同步秒脉冲的上升沿到来时，就标记自己的本地时钟，通过对标记的一系列本地时钟作差就能完成同步误差的测量。需要注意的是，该系统节点的数量并不是固定不变，而是可以根据施工需求来增加或者减少节点。

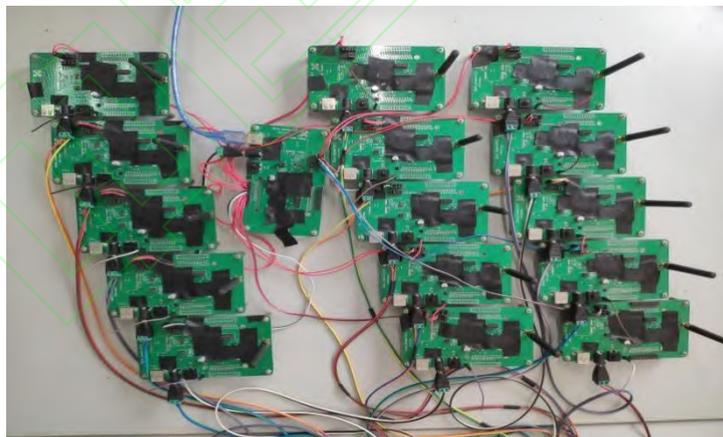


图 4 时钟同步系统  
Fig.4 Time synchronization system

### 4.2 同步授时

在实际应用中，任何一种时钟同步算法，都需要转换成能对底层硬件直接授时的方式。本文基于 LSTS-CG 算法设计完成了以“同步秒脉冲+同步时间”的方式提供授时服务。

本次实验，在如图 7 所示的网格通信拓扑下，时延为  $0.3 \mu\text{s}$  级时，测试了节点之间同步秒脉冲的同步误差。如图 5 所示为，本系统产生的同步秒脉冲。该图的左图为 LSTS-CG 算法还有没同步时，节点之间的同步秒脉冲，右图为已经完成同步后，节点之间的同步秒脉冲。由这两幅图可知，只有当

LSTS-CG 算法已完成时钟同步后，节点产生的秒脉冲才会同步。

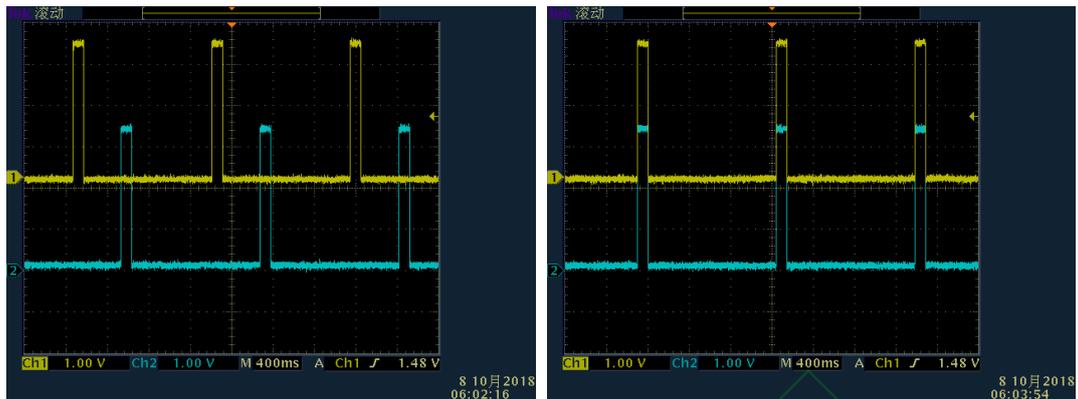


图 5 基于 LSTS-CG 算法产生的同步秒脉冲  
Fig.5 Synchronous second pulses generated based on LSTS-CG

如图 6 所示为，本系统产生的同步秒脉冲的同步误差的对比。当同步算法稳定后，以节点 1 产生的同步秒脉冲（黄色秒脉冲）为参考信号，其它节点的同步秒脉冲（蓝色秒脉冲）都与它的同步秒脉冲进行比较。通过这些图可知，当 LSTS-CG 算法稳定后，在某些不同的时刻，节点 5，节点 8，节点 11 和节点 15 与节点 1 的同步误差分别为-80ns，250ns，80ns 和 85ns。

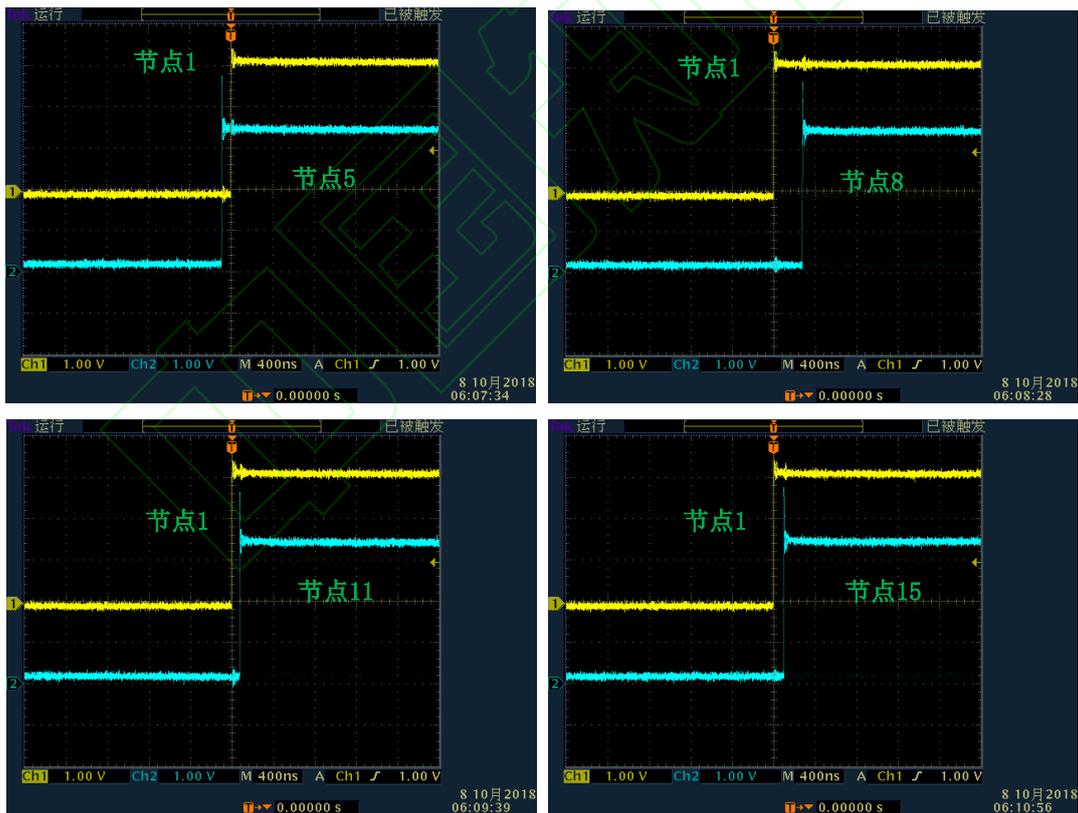


图 6 节点之间的同步秒脉冲的同步误差  
Fig.6 Synchronization error of synchronous second pulses between nodes

#### 4.3 算法的比较

由于 FPGA 的编程灵活性，本次设计的硬件系统不仅可以实现 LSTS-CG 算法，还可以实现 ATS 和 LSTS 算法。本文在这个硬件系统中设计完成了 ATS, LSTS 和 LSTS-CG 算法，并在如图 11 所示的

通信拓扑结构下，系统比较了这三种算法的性能。如表 2 所示为硬件实验中设置的算法参数。本次实验，随机时延为  $0.3\mu\text{s}$  级，广播数据包的周期为 2s，1tick 表示 20ns。

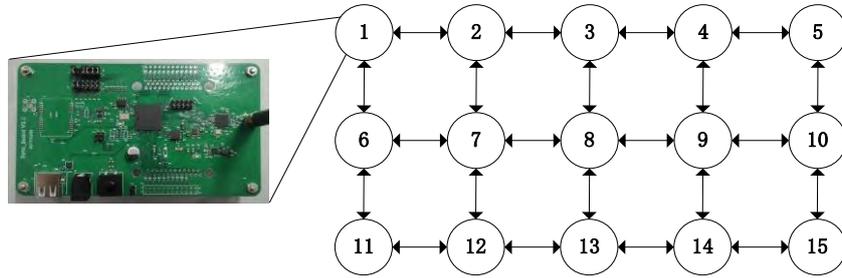


图 7 15 个节点组成的网络通讯网络  
Fig.7 Grid communication topology of 15 nodes

表 2 参数设置  
Tab.2 Parameters setting

算法	$\rho_e$	$\rho_a$	$\rho_b$
ATS	0.5	0.5	0.5
LSTS	$\frac{l^2}{1+\dots+l^2}$	$\frac{1}{(1+l)^{0.5}}$	0.5
LSTS-CG	0.5	0.5	0.5

如图 8 所示为，三种算法的相对斜率估计的误差。通过此图可以看出，当存在随机时延时，ATS 算法未收敛，而 LSTS 算法和 LSTS-CG 算法均收敛。

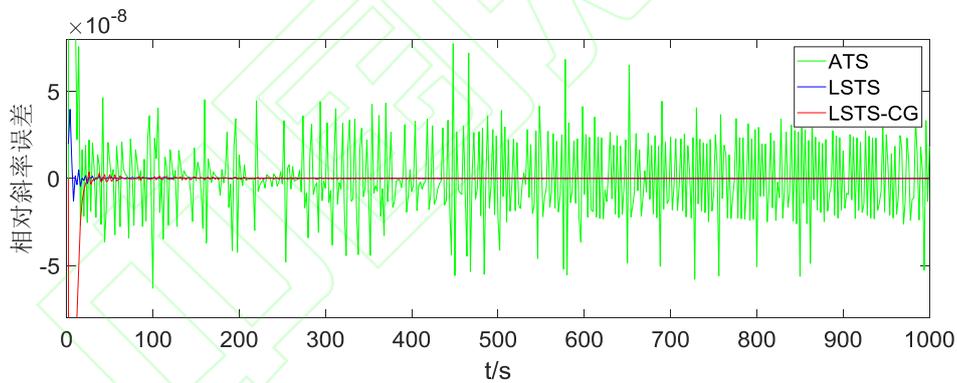


图 8 相对斜率估计误差  
Fig.8 Relative drift estimation errors

如图 9 所示为，三种算法收敛速度的比较。通过此图可以看出，当存在时延时，LSTS 和 LSTS-CG 算法均以  $1/k$  的速度渐近收敛。

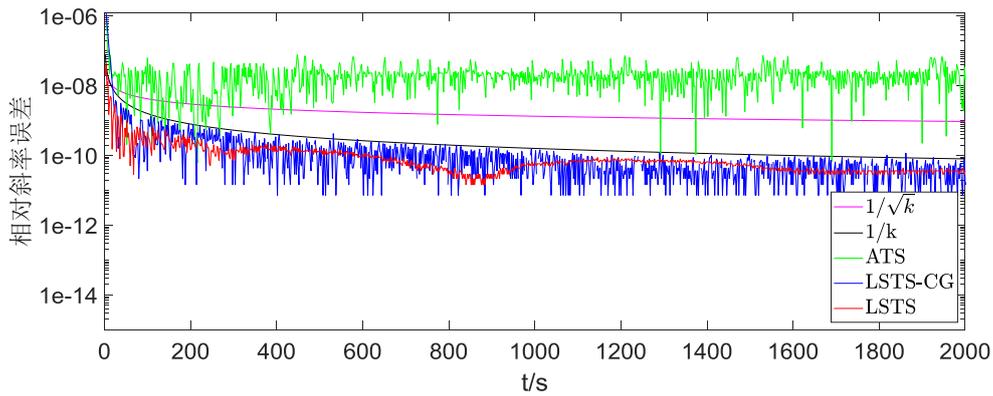


图 9 相对斜率估计误差的收敛速度  
 Fig.9 Convergence rate of relative drift estimation errors

如图 10 所示为, LSTS 和 LSTS-CG 算法的同步误差对比。由此图可知, 当时延为  $0.3\mu\text{s}$  级时, LSTS 和 LSTS-CG 算法的同步误差分别稳定在  $1\mu\text{s}$  级和  $0.8\mu\text{s}$  级, LSTS-CG 算法的同步误差比 LSTS 算法更小。由于 LSTS-CG 算法的各增益都取 0.5, 使得在硬件设计中只需进行右移操作就可完成乘法计算, 所以计算量少。综合可得, LSTS-CG 算法是最优的。

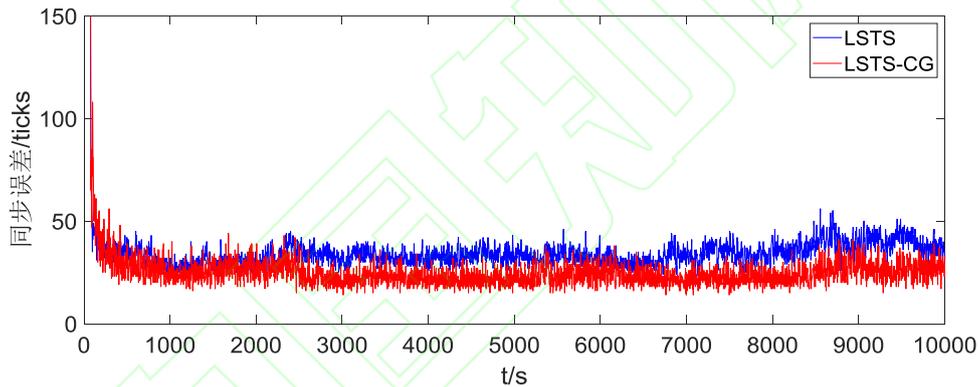


图 10 LSTS 和 LSTS-CG 的同步误差  
 Fig.10 Synchronization errors of LSTS and LSTS-CG

#### 4.4 不同时延对同步误差的影响

在野外采集中, 分布式电磁勘探系统各节点之间的距离会有所不同, 所以需研究不同的距离对同步误差的影响。节点之间距离的不同就是时延的不同。本次实验, 在如图 7 所示的网格拓扑下, 分别选取  $0.3\mu\text{s}$ ,  $0.6\mu\text{s}$ ,  $0.9\mu\text{s}$ ,  $1.2\mu\text{s}$  和  $1.5\mu\text{s}$  这 5 个时延量级, 来研究对本系统同步误差的影响。这 5 个时延对应到距离分别为 90m, 180m, 270m, 360m 和 450m。

如图 11 所示为, 不同时延对应的同步误差和时延随同步误差的变化趋势。由这些图可知, 节点之间的时延越大, 系统的同步误差也就越大, 并且同步误差随时延的增加基本呈线性增长。

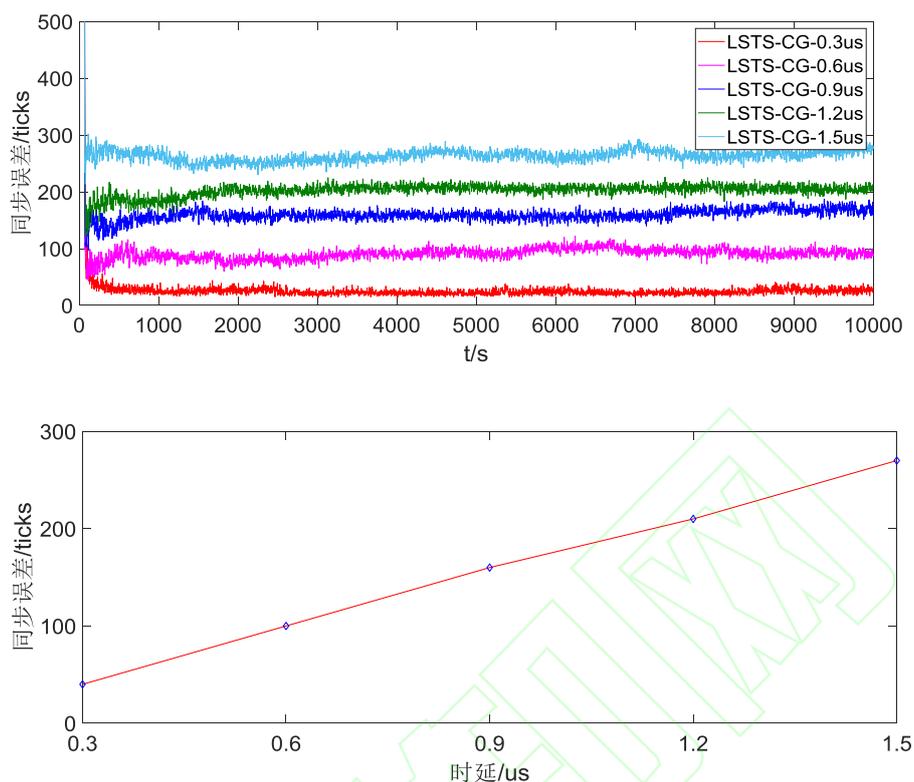


图 11 不同时延对应的同步误差和时延随同步误差的变化趋势  
 Fig.11 Synchronization error corresponding to different delays and the trend of synchronization error with delays

当同步误差随时延的增加呈线性增长时，通过这一关系就能很好地预测不同的距离所对应的同步误差，这能为野外施工方案的设计提供一些指导意见。对于分布式电磁勘探系统而言，节点之间的距离一般在 30m 左右。而当节点之间的距离小于 90m 时，设计的系统的同步误差为 0.8 $\mu\text{s}$ ，所以本套同步系统能很好地满足野外分布式勘探对同步误差的要求。为表述方便，后文中在没有明确指出时延时，都是默认 0.3 $\mu\text{s}$ 。

#### 4.5 不同拓扑对同步误差的影响

分布式勘探系统在对测区进行数据采集时，会因施工方案和施工条件等因素的限制而需要设计不同的通信方案。除网格拓扑外，本文还选取无向线性拓扑，有向线性拓扑，星形拓扑和一般拓扑这几种较为典型的拓扑，以模拟野外勘探时需要用到的通信拓扑。如图 12 所示为不同的通信拓扑。拓扑中的通信链路不需要时刻保持连通，只在收发数据时连通即可。

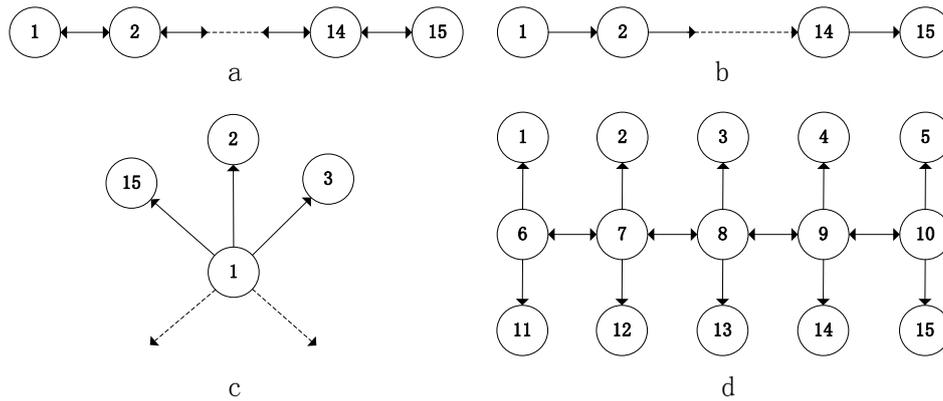


图 12 不同的通信拓扑  
Fig.12 Different communication topologies

如图 13 所示为，在不同的通信拓扑下，设计的时钟同步系统的同步误差。由这些图可知：（1）星形拓扑的同步误差最小，达到了  $0.4\mu\text{s}$ ，无向线性拓扑和一般拓扑次之，基本都稳定在  $0.8\mu\text{s}$ ，有向线性拓扑最差，为  $3\mu\text{s}$ ；（2）同步误差的方差从小到大依次为星形拓扑最小，无向线性拓扑和一般拓扑几乎一样，有向线性拓扑最大；（3）星形拓扑趋于稳定消耗的时间最小，有限线性拓扑和一般拓扑次之，无向线性拓扑最长。当通信周期为  $2\text{s}$  时，这四种拓扑趋于稳定消耗的时间分别为  $62\text{s}$ ， $122\text{s}$ ， $126\text{s}$  和  $938\text{s}$ 。这些结果表明，考虑到施工效率的问题，采集系统的通信拓扑应尽量避免设计成无向线性拓扑。当需要较低的同步误差时，应尽量避免设计成有向线性拓扑。即使不可避免地需要包含无向或者有向线性拓扑，也应尽量缩短这两种拓扑的直径。星形拓扑的上述性能基本都是最优的，但该拓扑只有一个主节点发送数据，而主节点的有效广播半径有限，所以实际使用时需综合考虑来设计通信方案。

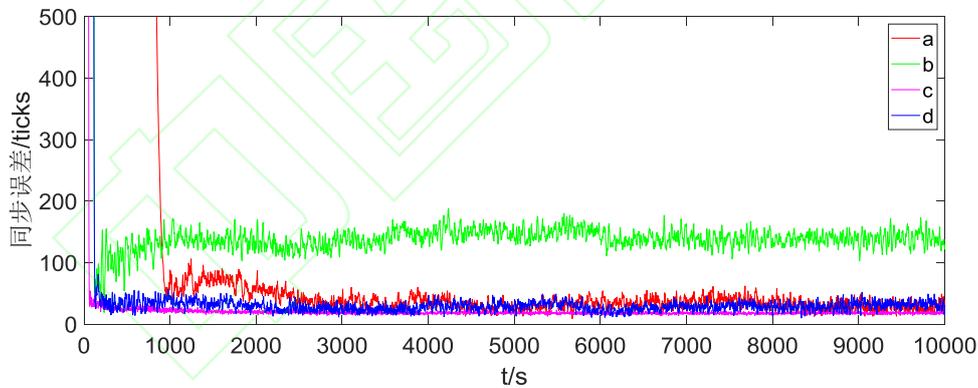


图 13 不同拓扑的同步误差  
Fig.13 Synchronization errors of different topologies

需要说明的是，对于星形拓扑或者类星形拓扑（具有多个主节点），如果主节点安装有 GPS 接收器，也就是说主节点可以获得 GPS 的时间，并广播获取的时间，那么所有的从节点都可同步到 GPS 的时间。这表明，本套同步系统与 GPS 不是互斥的，而是可以混合使用。所以本系统灵活性高，实用性强。本次晶振选用的是市面上的一款很普通的晶振，频率准确度为  $\pm 50\text{ppm}$ ，如果把主节点的晶振换成恒温晶振（频率准确度一般为  $\pm 1\text{ppm}$ ），本系统的同步误差会进一步得到改善。

#### 4.6 通信周期对同步误差的影响

本次硬件实验在如图 7 所示的网格拓扑下，测试了不同的通信周期对本系统同步误差的影响。如图 14 所示为同步误差随通信周期的变化趋势。由此图可知，通信周期越大，系统的同步误差也越大，但二者并不是线性相关。当通信周期大于某一值时，同步误差随通信周期的变化不显著。参

照如图 14 所示的结果,在实际工作中,可以根据对同步误差的需求选取相应的通信周期,从而合理控制通信的繁忙程度。

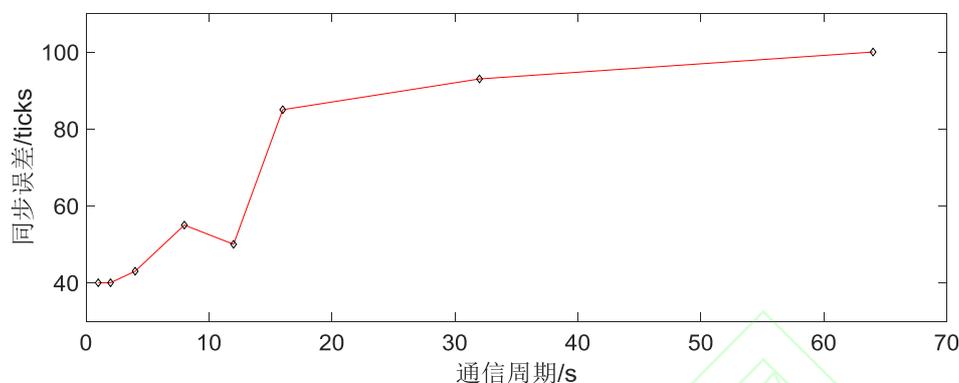


图 14 同步误差随通信周期的变化趋势  
Fig.14 Synchronization error varies with communication cycle

## 5 结论

为解决在井下或者隧道内这些完全没有 GPS 信号的环境下,地球物理仪器也能进行分布式勘探这一问题,本文以 LTS-CG 算法为基础,设计出一种全新的不依赖 GPS 的分布式时钟同步系统。LSTS-CG 算法是对 LSTS 算法的一个改进,改进后的算法不仅保持了 LSTS 算法的优点,还具有计算量少,存储量小等优点,所以十分适用于分布式勘探系统。本文在硬件中实现了 LSTS-CG 算法,而且解决了该类电路设计的一些普遍的关键性问题。这些问题的解决使本系统在分布勘探系统中的直接使用成为可能。

本系统以“同步秒脉冲+同步时间”的方式提供授时服务,使得授时协议十分简单,很方便底层硬件对时间的获取。由于授时的方式与 GPS 一样,所以本系统不仅可以不依赖 GPS 提供授时,而且可以像 GPS 一样授时,实用性很强。通过对本系统的同步误差进行测试,结果表明,即使是采用频率准确度为 $\pm 50\text{ppm}$ 的普通晶振,该系统的同步误差也能达到  $0.8\mu\text{s}$ ,并且还具有功耗低,成本低廉等优点。所以本系统具有很好的市场潜力和应用前景。本文从通信时延,通信拓扑和通信周期这三个方面,测试了本系统的性能,所得结果具有一定的规律性,能为野外施工方案的设计提供指导意见。

**致谢** 感谢田玉平教授提供的无私帮助和指导。

## References

- [1] CC2420. 2010. CC2420 data sheet [EB/OL]. Texas Instruments Inc. <https://www.ti.com.cn/zh-cn/wireless-connectivity/zigbee/products.html>
- [2] Cao J M. 2016. Research of network time synchronization in wired telemetry seismograph [Master's thesis] (in Chinese). Jilin: Jilin University.
- [3] Cao L M. 2011. The application and expectation of the geophysical methods to deep metal mine exploration [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 26(2): 701-708, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2011.02.040.
- [4] Chen K, Jing J E, Wei W B, et al. 2013. Numerical simulation and electrical field recorder development of the marine electromagnetic method using a horizontal towed-dipole source [J]. Chinese Journal Geophysics (in Chinese), 56(11): 3718-3727, doi:10.6038/cjg20131113.
- [5] Chun S H, Chen R J, Xiang B W, et al. 2015. Frequency correction method of OCXO and its application in the data acquisition of electrical prospecting [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 30(4): 1870-1881, doi: 10.6038/pg20150448.
- [6] Di Q Y, Fang G Y, Zhang Y M. 2013. Research of the surface electromagnetic prospecting (SEP) system [J]. Chinese Journal Geophysics (in Chinese), 56(11): 3629-3639, doi: 10.6038/cjg20131104.
- [7] Di Q Y, Wang G J, An Z G, et al. 2006. Geophysical exploration of a long deep tunnel on the west route of South to North Water Diversion Project [J]. Chinese Journal Geophysics (in Chinese), 49(6): 1836-1842, doi:10.3321/j.issn.0001-5733.2006.06.032.
- [8] He J, Cheng P, Shi L, et al. 2014. Time synchronization in WSNs: a maximum-value-based consensus approach [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 59(3): 660-675, doi: 10.1109/TAC.2013.2286893.
- [9] Liu L F. 2014. Research on a scalable geophysical data acquisition system [PhD's thesis] (in Chinese). Anhui: University of Science and Technology of China.
- [10] Li P, Luo Y Q, Tian Y, Liu Y, et al. 2021. Research progress of geophysical exploration technology for deep geological resources [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 36(5): 2011-2033, doi: 10.6038/pg2021EE0407.
- [11] Schenato L, Fiorentin F. 2011. Average TimeSynch: a consensus-based protocol for clock synchronization in wireless sensor networks [J]. Automatica, 47(9): 1878-1886, doi:10.1016/j.automatica.2011.06.012.
- [12] Routh P S, Oldenburg D W. 2001. Electromagnetic coupling in frequency-domain induced polarization data: a method for removal [J].

Geophysical Journal International, 145: 59-76.

- [13] Wei J N. 2014. Design of clock synchronization in large-scale seismic data acquisition system [Master's thesis]. Beijing: Tsinghua University.
- [14] XC6SLX16. 2012. XC6SLX16 data sheet [EB/OL]. Xilinx Inc. [http://www.xilinx.Com/support/documentation/data\\_sheets/ds160.pdf](http://www.xilinx.Com/support/documentation/data_sheets/ds160.pdf)
- [15] Yan C, Chen R J, Shen R J, *et al.* 2021. Distributed multi-channel data acquisition system for electrical and electromagnetic methods [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 36(4): 1743-1750, doi: 10.6038/pg2021CC0178.
- [16] Yan F B, Liu J X, Su Y R, *et al.* 2017. A study on uncertainty and error of sampling clock in electromagnetic prospecting systems [J]. Chinese Journal Geophysics (in Chinese), 60(11): 4204-4211, doi: 10.6038/cjg20171108.
- [17] Tian Y P. 2015. LSTS: a new time synchronization protocol for networks with random communication delays [C]. Proc. the 54th IEEE Conference on Decision and Control, 7404-7409, doi: 10.1109/CDC.2015.7403389.
- [18] Tian Y P. 2017. Time Synchronization in WSNs with random bounded communication delays [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 62(10): 5445-5450, doi: 10.1109/TAC.2017.2697683.
- [19] Tian Y P, Zong S H, Cao Q. 2016. Structural modeling and convergence analysis of consensus-based time synchronization algorithms over networks: non-topological conditions [J]. Automatica, 65(3): 64-75.
- [20] Ye Y X, Deng J Z, Li M, *et al.* 2011. Application status and vistas of electromagnetic methods to deep ore prospecting [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 26(1): 327-334, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2011.01.039.
- [21] Zhang Q, Feng Y, Liu F, *et al.* 2020. Research and implementation of distributed multi-channel electromagnetic acquisition station and its monitoring software [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 35(6): 2441-2449, doi: 10.6038/pg2020EE0463.
- [22] Zhang B Y, He G, Wang J. 2014. New high-density electrical instrument measuring system [J]. Instrument Technique and Sensor, (1): 24-26, doi: 10.3969/j.issn.1002-1841.2014.01.009.
- [23] Zhang S L, Wang H, Zhang Z Q, *et al.* 2011. Analysis of international proprietary technology development of geophysical instrument [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 26(3): 1120-1130, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2011.03.043.

#### 附中文参考文献

- [24] 曹家铭. 2016. 有线遥测地震仪网络同步技术研究[硕士论文]. 吉林: 吉林大学.
- [25] 曹令敏. 2011. 地球物理方法在金属矿深部找矿中的应用及展望[J]. 地球物理学进展, 26(2): 701-708, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2011.02.040.
- [26] 淳少恒, 陈儒军, 向毕文等. 2015. OCXO 时钟修正机制在电法勘探采集中的应用研究[J]. 地球物理学进展, 30(4): 1870-1881, doi: 10.6038/pg20150448.
- [27] 陈凯, 景建恩, 魏文博等. 2013. 海洋拖曳式水平电偶源数值模拟与电场接收机研制[J]. 地球物理学报, 56(11): 3718-3727, doi: 10.6038/cjg20131113.
- [28] 底青云, 方广有, 张一鸣. 2013. 地面电磁探测系统(SEP)研究[J]. 地球物理学报, 56(11): 3629-3639, doi: 10.6038/cjg20131104.
- [29] 底青云, 王光杰, 安志国等. 2006. 南水北调西线千米深长隧洞围岩构造地球物理勘探[J]. 地球物理学报, 49(6): 1836-1842, doi: 10.3321/j.issn.0001-5733.2006.06.032.
- [30] 刘列峰. 2014. 一种可扩展的大规模地球物理勘探数据采集系统的研究[博士论文]. 安徽: 中国科学技术大学.
- [31] 李鹏, 罗玉钦, 田有, 刘洋, 鹿琪, 陈常乐, 刘财. 2021. 深部地质资源地球物理探测技术研究发展[J]. 地球物理学进展, 36(5): 2011-2033, doi: 10.6038/pg2021EE0407.
- [32] 魏佳楠. 2014. 大型地震数据采集系统中的时钟同步设计[硕士论文]. 北京: 清华大学.
- [33] 严超, 陈儒军, 申瑞杰, 吴曦林, 王小杰, 陈兴生, 刘海飞. 2021. 分布式多通道电法电磁法数据同步采集系统[J]. 地球物理学进展, 36(4): 1743-1750, doi: 10.6038/pg2021CC0178.
- [34] 严发宝, 柳建新, 苏艳蕊等. 2017. 电磁法观测系统采样时钟不确定度及误差研究[J]. 地球物理学报, 60(11): 4204-4211, doi: 10.6038/cjg20171108.
- [35] 叶益信, 邓居智, 李曼等. 2011. 电磁法在深部找矿中的应用现状及展望[J]. 地球物理学进展, 26(1): 327-334, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2011.01.039.
- [36] 张启卯, 冯永强, 刘富波, 耿智, 刘慧. 2020. 分布式多通道电磁采集站及其监控软件的研究与实现[J]. 地球物理学进展, 35(6): 2441-2449, doi: 10.6038/pg2020EE0463.
- [37] 张碧勇, 何刚, 王君. 2014. 新型高密度电法探地仪测量系统[J]. 仪表技术与传感器, (1): 24-26, doi: 10.3969/j.issn.1002-1841.2014.01.009.
- [38] 张树良, 王辉, 张志强等. 2011. 国际地球物理仪器专利技术研发态势分析[J]. 地球物理学进展, 26(3): 1120-1130, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2011.03.043.