

用于水听器阵列的精密时钟同步方法

陈 劲^{1,2}, 段发阶^{1*}, 蒋佳佳¹, 常宗杰¹, 华香凝¹, 李彦超¹

(1. 精密测试技术及仪器国家重点实验室(天津大学), 天津 300072; 2. 天津师范大学 物理与电子信息学院, 天津 300387)

(* 通信作者电子邮箱 fjduan@tju.edu.cn)

摘 要:针对海洋水声探测时水听器间的数据采集同步问题,提出了一种全阵列精确同步的采集时钟产生与传递方法。采用独立的高精度主时钟、异步差分传输线和从时钟端的锁相环(PLL),实现了多节点长时间不间断工作方式下的同步采集,具有抗干扰能力强、同步性能好的特点。建立了时钟同步模型,详细分析了同步延迟的产生环节。通过电路实验验证了整个方案的可行性,在经过长度为 18 m 的非屏蔽双绞线传递后,恢复的从时钟延迟不大于 165 ns,且与距离成线性正比关系。所提方法已经用于实际的水听器阵列数据采集系统,取得较好的效果。

关键词:水听器阵列;数据采集;精确同步;温补压控晶振

中图分类号: TP84 **文献标志码:** A

Application of high-precision clock-synchronous method in hydrophone's linear array

CHEN Jin^{1,2}, DUAN Fajie^{1*}, JIANG Jiajia¹, CHANG Zongjie¹, HUA Xiangning¹, LI Yanchao¹

(1. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments (Tianjin University), Tianjin 300072, China;

2. College of Physics and Electronic Information, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China)

Abstract: The paper proposed a precise full-array-synchronization data acquisition clock generation and transmission method to handle the hydrophone's data acquisition synchronization problem in the ocean underwater acoustic detection. By using the independent high-precision clock source and asynchronous differential transmission lines, the long distance synchronous acquisition of the hydro-phone's array was realized, which was characterized with high anti-jamming capability and so on. The detailed model of the full-array-synchronization principle was analyzed and the prototype system was established. Circuits experiment was carried out to verify the feasibility of the entire system. Recovered clock's time delay in the acquisition node was less than 165 ns when the low-speed synchronous clock signal was transmitted by the unshielded twisted pair of 18 meters length. The experimental results show that the proposed method has good effect when being applied to transfer the standard clock of data acquisition in the linear array.

Key words: hydrophone's array; data acquisition; precise synchronization; Voltage Controlled Temperature Compensated Crystal Oscillator (VCTCXO)

0 引言

水听器阵列数据采集的同步性能直接关系到波束形成及反演的效果^[1],因此,对其同步技术进行研究具有实际的意义。在计算机网络及分布式测控领域中,时钟同步一直是对网络性能有重要影响的核心技术之一。文献[2]介绍了 IEEE1588 精密时钟同步协议(Precision Time Protocol, PTP)的原理,各时钟节点首先通过最佳主时钟(Best Master Clock, BMC)算法确定子网络中的主时钟和自身的状态,然后周期性地交换报文来测量各个从时钟与主时钟的时间偏差和传输延迟,如果在网络中配置一台高精度的时钟服务器作为主时钟,就可以实现精确的网络时钟同步。为了更好地适应分布式网络环境并克服 PTP 中的不足,2008 年公布的 IEEE1588 协议 V2.0 版本对 PTP 做了多项改进^[3],如:新增点延时机制用于测量两个端口间的传输延时,增加了对 PROFINET 等工业总线协议的支持等。文献[4]以 ALTERA 公司的 NIOS II 软核为核心设计了分布式的时钟同步数据采集系统,将 IEEE1588 协议应用于具体的分布式工业以太网。网络时延

测量是 PTP 重要的组成部分,文献[5]针对时延测量中的位置误差问题,提出了一种基于 Windows 网络驱动接口规范的误差消除方法,可达到微秒级精度;文献[6]通过仿真的方法验证了 IEEE1588 用于有主站的树形无线分布式测试网络的可行性;文献[7]设计了一种基于层次结构的时间同步算法,在传感器网络时钟同步协议(Timing-sync Protocol for Sensor Networks, TPSN)的基础上,提出基于等级广播的频率偏移修正方法,可以用于更广泛范围的无线传感器网络。在 Ad Hoc 等无线网络环境下,由于没有固定的中心节点或主时钟,因此时钟同步一直是该类型网络需要解决的关键问题之一。文献[8]通过一种新的时钟同步方案——DE-CSNS(Delay Estimate-Clock Sampling Network Synchronization),实现了 Ad Hoc 网络一跳场景下 15 μ s 左右的收敛误差范围。

文献[9]针对分布式声学设备的特点,采用美国国家半导体公司的芯片 DP83640 作为以太网芯片,通过硬件时间戳的方式提高 PTP 的网络延迟测量精度,在 VXWORKS 平台上实现了优于 200 ns 的同步精度范围。与其他分布式测控网络相比,水听器阵列具有以下特点:1)数据采集网络为星

收稿日期:2012-07-25;修回日期:2012-08-20。 基金项目:国家自然科学基金资助项目(50375110);教育部新世纪优秀人才资助计划项目(NCET);天津市科技兴海专项(KX2010-0006);天津市科技支撑重点项目(11ZCKFGX03600)。

作者简介:陈劲(1976-),男,安徽芜湖人,讲师,博士研究生,主要研究方向:光电检测、水声信号检测; 段发阶(1968-),男,湖南郴州人,教授,博士,主要研究方向:激光及光电测试、计算机视觉检测、水声检测; 蒋佳佳(1986-),男,湖北天门人,博士研究生,主要研究方向:阵列信号处理。

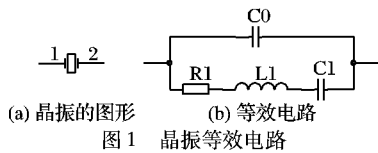
型逻辑拓扑和级联型物理拓扑结构,各节点间的数据传输量和信道物理长度均为确定值;2)同步的控制对象是各节点采集数据的输出时间点,而不仅是本地时钟;3)由于海水是良好的电磁屏蔽体,因此通常无法使用全球定位系统(Global Positioning System, GPS)时标等外来时钟基准;4)基于载波监听多路访问/冲突检测的以太网不一定是阵列的最优传输方式;5)数据采集经常持续数天或数十天且不间断。因此,网络时间协议(Network Time Protocol, NTP)、精密时钟同步协议等时钟协议并不直接适用于该类型的阵列。

本文设计了一种专用于水听器阵列的精密时钟同步方法。采用独立的高精度温补压控晶振(Voltage Controlled Temperature Compensated Crystal Oscillator, VCTCXO)作为全阵列唯一的主时钟,信道中不传送同步报文,而是向各节点传递经过处理的低速同步脉冲,同时保持脉冲的高时间精度。各节点的数据输出通过锁相环跟踪同步脉冲的边沿变化,并实时调整从时钟的输出相位。在阵列长时间不间断的工作方式下,该方法可以提高各节点数据采集的同步性能,减小从时钟振荡周期差别产生的累积误差,且无需以太网协议的支持。

1 原理及系统结构

1.1 石英晶振的温度特性

由于石英晶体振荡器(以下简称晶振)的振荡周期比大多数物质精确,因此被广泛用作各类电子系统的时钟源。其典型的等效电路如图1所示。



随着外部环境特别是温度的变化,晶体振荡周期会发生一定范围的漂移,从而影响时钟的精度。其关系可用式(1)表述:

$$f = f_0 \cdot [1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2 + \gamma(T - T_0)^3] \quad (1)$$

其中: T 为某时刻真实温度, T_0 为参考温度(通常取室温); f_0 为基准频率; α, β, γ 为线性和非线性系数。由式(1)可以看出,减小温度对输出频率 f 影响的主要途径之一是对三个温度相关项进行补偿。

温补压控晶振就是一种加入了温度漂移补偿的高精度时钟源。其主要特点是在电压控制基准频率 f_0 的基础上,配置了特性与石英晶体相似,而温漂方向相反的温度相关网络,用于补偿温度引起的频率漂移项(即式(1)中的后三项)。在 $-20^\circ\text{C} \sim +70^\circ\text{C}$,其频率抖动可以低至 $\pm 0.14 \text{ ppm}^{[10]}$,优于无温度补偿的压控晶振。

1.2 水听器阵列工作原理

水听器(Hydrophone)是一种接收水下声信号的传感器,广泛用于海洋中各类信息的获取^[11-13]。线列阵是最常见的阵列形式之一,其主要特征是将多个水听器等间隔直线排列^[14],放置于透声性能良好的圆柱形狭长水密海缆内,实用化阵列的长度经常达数百米至数千米。工作时,探测船在海上沿直线航行(称为测线),线列阵被水平拖曳在船尾的恒深海水中。根据探测时声波来源的不同,可以将其分为两种类型:主动探测和被动探测。在主动探测方式下,水下的高压气枪阵列定时产生声波并经海底反射,线列阵接收水中的声波数据,传送到探测船的计算机中。借助于波束形成及声波阻抗反演等处理,就可以得到海水中或海底地下的信息。

1.3 同步模型

如图2所示,时钟同步系统可以分为时钟源(主时钟)和

若干采集节点(从时钟),各节点等间隔级联排列,相距18 m左右。最前端的VCTCXO输出16.384 MHz的初始时钟 f^H ;传输时钟 $f_1^L \sim f_m^L$ 以及各节点采样数据输出脉冲 $f_1^D \sim f_m^D$ 的频率均为4 kHz。如前文所述,应使各节点数据输出的不同步性(即 $f_1^D \sim f_m^D$ 的相位误差)尽量小,又由于阵列信道没有完整的以太网协议,因此不能直接在信道内传递高速时钟 f^H 或同步报文,而需要通过分频器对 f^H 降频传输,此时,仍需保持波形的高边沿陡度和时间精度。各节点的从时钟通过锁相环(Phase Locked Loop, PLL)做倍频获得。PLL误差比较器的两输入端分别接 $f_1^L \sim f_m^L$ 和 $f_1^D \sim f_m^D$,锁相目标是两输入端相差为零。PLL输出即是恢复出的高速采集时钟 $f_1^H \sim f_m^H$ 。

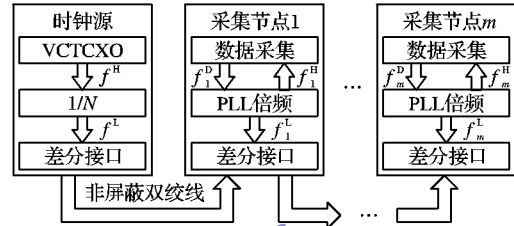


图2 同步系统模型

1.4 时钟同步的精度分析

当信号在单位长度的导线或印刷电路走线中传输时,会产生一定的时间延迟(称为单位传播延迟,用 δ^t 来表示)。该数值与信道绝缘介质介电常数的平方根成正比。例如,空气的介电常数为1.0,因此无线电波的 δ^t 大约为3.35 ns/m;非屏蔽双绞线线芯外的聚乙烯护套介电常数取值为1.8~2.8,其 δ^t 应在4.45~5.60 ns/m。

同步时钟的传递延迟如式(2)所示:

$$\delta_n^s = \delta^d + 2 \cdot \delta^c + l_n \cdot \delta^t + \delta_n^m \quad (2)$$

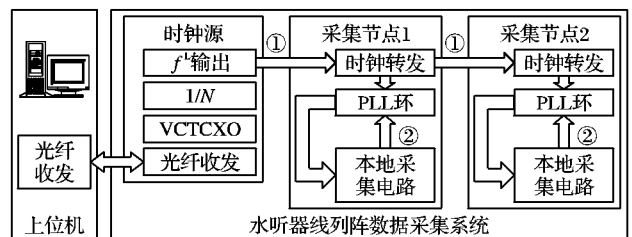
其中: δ_n^s 为第 n 个采集节点时钟的总延时; δ^d 为时钟源 N 分频时间延迟; δ^c 为差分接口延迟; $l_n \cdot \delta^t$ 为第 n 个节点的传输延迟; δ_n^m 为第 n 个节点PLL倍频的延迟。

式(2)中列出的采集节点与主时钟距离 l_n 随节点编号 n 的增大而线性增加,且为确定值,其他的误差也均为确定值。因此,可以通过软件的方法补偿第 n 个节点时钟的总延迟 δ_n^s ,进一步提高时钟的精度。

2 采集系统与实验

2.1 采集系统

在同步模型的基础上,设计了基于精密时钟同步技术的水听器阵列数据采集系统,并进行了电路实验,如图3所示。主时钟位于数据采集系统的最前端,时钟源为16.384 MHz的贴片式VCTCXO模块,分频后的4 kHz低速同步时钟经过18 m六类非屏蔽双绞线传输至采集节点1,并在从时钟的PLL环中与节点1的4 kHz采集数据输出脉冲比较相位,锁定其为零相差。同时,节点1转发主时钟的低速同步时钟,再经过18 m双绞线传输至采集节点2,以此类推。



注:①表示4 kHz低速同步时钟;②表示4 kHz采集数据输出。

图3 水听器阵列的数据采集系统

2.2 实测同步延迟

图4为示波器记录的主时钟及节点1的实测结果,可以

看出各部分的波形均保持了好的边沿陡度,失真度小。其中实测的主时钟分频延迟 δ^d 约为3.2 ns。经过18 m六类非屏蔽双绞线的异步差分传输后,同步时钟波形仍然保持了较好的形状,其时间延迟 $l_1 \cdot \delta^d$ 实测为90 ns左右,处于理论计算的数值范围内。节点1的从时钟在经过 N 倍频后,频率仍然保持为16.384 MHz,但是引入了60 ns左右的延迟 δ^m 。实测主时钟单端-差分转换的延迟 δ^e 的数值约为6 ns。将以上各部分的数据代入式(2),可得出总时间延迟的累加计算值为165.2 ns。图4(d)为主时钟到采集节点1恢复的高速时钟间的波形对比,由于时间延迟已经超过单个时钟周期,因此需要结合上述各部分延迟数据来确定其整周期数。综合以上因素,可得实测的节点1同步时钟总延迟 δ_1^t 约为165 ns,与数值计算结果吻合。

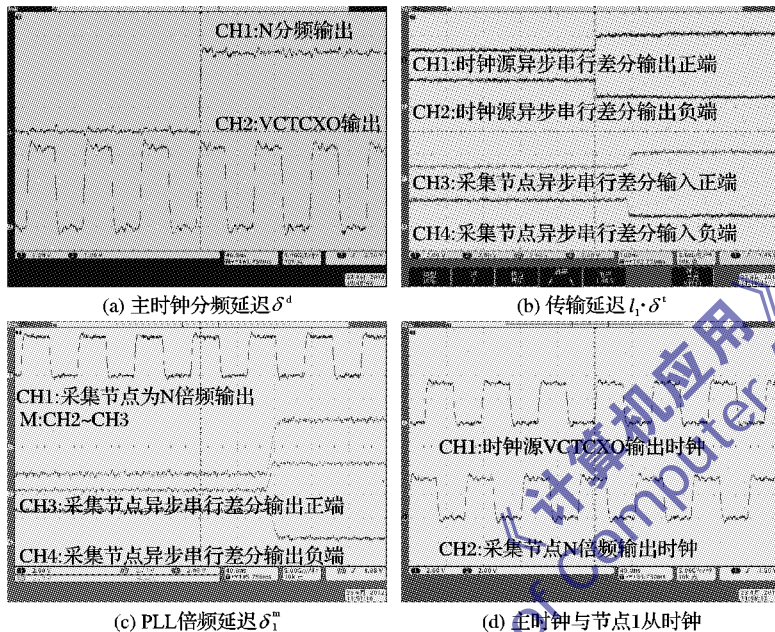


图4 电路实验波形

随着阵列采集节点的增加,信道距离不断加长,同步时钟传递的延迟也会增加,其主要影响因素为 l_n 的增加。由于该数值与阵列信道长度呈现线性正比关系,因此可以通过后期的数据处理消除信道物理长度对同步精度的影响。

2.3 测试结果

在电路实验的基础上,本文建立了完整的水听器线阵列,并在国内某片开阔水域进行了外场测试。图5为测试时上位机的实时回显波形,右侧椭圆框内即为水听器接收到的水中数百米外某声源脉冲信号,可清晰看出声源与线列阵的方位角。由图5可知,线列阵内各水听器采集的数据同步性能好,本文所提出的时钟同步方法可以满足线列阵数据采集的要求。

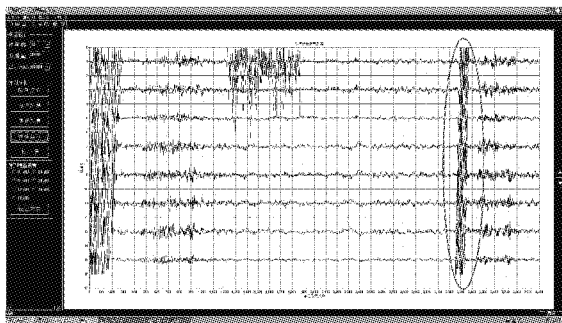


图5 上位机实时波形

3 结语

水听器线列阵在海洋石油勘探、生态监测及工程勘探等场合具有实际意义。IEEE1588的前期研究已经表明,精密时钟同步方法可以有效提高分布式网络中的同步精度。本文讨论了一种专用的传感器线列阵长距离时钟同步方法,建立了信号采集多节点间的同步模型。实验结果表明,当传输距离为18 m时,同步时钟的总延迟不大于165 ns。同时,由于时钟传递的延迟与线列阵的长度呈现较好的线性关系,因此可以通过采集节点的时钟补偿算法来进一步减小总延迟,提高系统的数据采集同步精度。设计了基于该同步方案的水听器线列阵,在湖水中进行了长时间不间断的水声数据采集。实验结果显示,建立在精密时钟同步基础上的全阵列数据采集及传输系统工作正常,采集的水声数据同步性好。

通过本文的研究,说明专用的精密时钟同步方法可以用于长距离传感器线列阵的数据采集同步。该方法的实现复杂度可控,对信道带宽要求低,受环境影响小,能实现较高精度的全阵列同步。

参考文献:

- [1] JAGANNATHAN S, HORN B K P, RATILAL P, *et al.* Force estimation and prediction from time-varying density images [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(6): 1132-1146.
- [2] 林涛,张浩,孙鹤旭. 基于精密时间协议的时钟同步技术[J]. 计算机应用, 2007, 27(8): 1828-1830.
- [3] 李晓珍,苏建峰. 基于IEEE1588高精度网络时钟同步的研究[J]. 通信技术, 2011, 44(3): 105-107.
- [4] 何伟,林英撑,张玲. 基于NIOS II的时钟同步数据采集系统[J]. 计算机工程, 2009, 35(9): 243-245.
- [5] 陈世强,周旭,王俊峰,等. 基于网络驱动接口规范的网络时延测量位置误差消除方法[J]. 计算机应用, 2012, 32(7): 1787-1790.
- [6] 李本亮,王厚军,师奕兵,等. 基于PTP的无线分布式测试系统时钟同步研究[J]. 电子科技大学学报, 2010, 39(4): 556-559.
- [7] 陶志勇,胡明. 无线传感器网络中基于层次结构的时间同步算法[J]. 计算机应用, 2012, 32(6): 1513-1515.
- [8] 漆璐,陈晔. Ad Hoc网络时钟同步研究[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(12): 4702-4704.
- [9] 马龙华,陈孝良,程晓斌,等. 分布式声学测量设备中精确时钟同步研究[J]. 计算机工程与设计, 2011, 32(1): 351-353.
- [10] TaiTian Electronics Co., Ltd. High precision voltage controlled temperature compensated crystal oscillator [EB/OL]. [2011-10-05]. <http://www.taitian.com>.
- [11] McGUIRE J J, BOETTCHER M S, JORDAN T H. Foreshock sequences and short-term earthquake predictability on East Pacific Rise transform faults [J]. Nature, 2005, 434(7032): 457-461.
- [12] MAKRI S N C, RATILAL P, JAGANNATHAN S, *et al.* Critical population density triggers rapid formation of vast oceanic fish shoals [J]. Science, 2009, 323(5922): 1734-1737.
- [13] LANDRO M, STRONEN K L, DIGRANES P, *et al.* Time-lapse seismic as a complementary tool for in-fill drilling [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2001, 31(2): 81-92.
- [14] MAKRI S N C, JAGANNATHAN S, IGNISCA A. Ocean acoustic waveguide remote sensing: visualizing life around seamounts [J]. Oceanography, 2010, 23(1): 204-205.