

# 基于环形海底观测网络的时间同步系统研究

谢杰荣 王红霞 王彦凯

(海军工程大学电子工程学院 湖北 武汉 430033)

**摘要** 分析研究环形海底观测网络的时间同步系统的基本架构和建模原型。在此基础上,运用 OMNeT++ 仿真软件对该系统的各级网络传输设备的时钟模式方案展开仿真研究和验证。结果表明,岸基站和主接驳盒的传输设备应分别支持端到端透明时钟模式和边界时钟模式,次接驳盒的传输设备可以不安装 PTP 时钟模块。此方案下系统所需成本较少且满足亚微秒级精度的要求,同时降低了网络负载流量和不对称传输延迟对时间同步性能的影响。

**关键词** 精确时间协议(PTP) 时间同步 海底观测网络 OMNeT++ 仿真研究

中图分类号 TP393 文献标识码 A DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2019.04.023

## TIME SYNCHRONIZATION SYSTEM BASED ON ANNULAR SUBMARINE OBSERVATION NETWORK

Xie Jierong Wang Hongxia Wang Yankai

(College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, Hubei, China)

**Abstract** We analyzed and studied the basic architecture and modeling prototype of the time synchronization system in the annular submarine observation network. On this basis, the clock mode scheme of the network transmission equipment at all levels in the system was simulated and verified by using OMNeT++ simulation software. The results show that the transmission equipment of the shore-based station and the primary junction box should support the end-to-end transparent clock mode and the boundary clock mode respectively. And the transmission equipment of the secondary junction box does not need to install the PTP clock module. In this scheme, the system requires less cost and meets the requirements of sub-microsecond precision, while reducing the impact of network load flow and asymmetric transmission delay on the performance of time synchronization.

**Keywords** Precision time protocol(PTP) Time synchronization Submarine observation network OMNeT++ Simulation research

## 0 引言

海底观测网络是指将多个水下探测节点连接成网络或体系结构,多种通信方式综合应用,建设以大容量通信网络为主干,具备水下综合信息接入、交换及能量输出的水下网络<sup>[1]</sup>。现阶段的海底观测网络大多只是单个或少数节点的线形观测系统,很少形成网络拓

扑结构,规模较小且易于破坏<sup>[2]</sup>。随着海洋观测领域和 underwater 探测信息需求的增长,建设多节点、远距离、高可靠性的环形海底观测网络成为必然趋势。

时间同步对海底观测网络信号控制、电力监控、安全管理和数据采集等功能的实现起着重要作用,特别是海底地震探测、海啸预警和声学追踪等信号的采集分析对时间同步提出了亚微秒级精度的要求<sup>[3]</sup>。常见的同步技术有网络时间协议 NTP、IRIG-B 和 GPS

卫星授时等,但都不能同时满足高精度同步、远距离授时和应用于海底环境的需求。IEEE1588 标准定义的精确时间协议 PTP(Precision Time Protocol)是目前唯一有效的解决途径。

国内外最近十年建成的海底观测网络开始逐渐具备时间同步功能。日本最早在其丰桥新海缆观测系统上研究开发了时间同步系统,并将该系统应用到后续建设的环形 DONET 网络中。该系统可以提供较高精度的授时信号,但并未采用 PTP 协议,而是依靠复杂的延迟补偿结构直接将时间同步信号调制后传给水下传感器,这种方式十分不便且只适用于带宽速率较低的 SDH 网络<sup>[4-5]</sup>。美国、欧洲的相关研究机构对基于 PTP 协议的海底观测网络时间同步系统开展研究探索,分别开发了具备 PTP 从时钟功能的传感器嵌入式模块,并应用到美国的 MARS、OOI 系统和西班牙的 OBSEA 海底观测站等结构简单、节点较少的线形海底观测系统中,实现了微秒级精度的时间同步<sup>[3,6]</sup>。加拿大 NEPTUNE 网络的时间同步系统采用 NTP、SNTP 和 PTP 三种时间同步协议将时间信息经交换机透明传送给从时钟,最终为水下探测仪器提供多种精度的授时信号,同步精度最高可达  $10\ \mu\text{s}$ <sup>[7]</sup>,是目前基于环形海底观测网络的典型案例。但该系统仍不够完善,特别是其各级网络传输设备未安装 PTP 时钟模块,导致系统实现的时间同步精度不够高,且当网络业务流量较大时系统的时间同步性能会受到一定的影响。国内浙江大学在其建设的南海海底观测网络试验系统中,开发了一个同样采用 PTP 协议的时间同步系统。该系统的网络传输设备加入了 PTP 时钟模块,同步精度最高可达  $3\ \mu\text{s}$ <sup>[8]</sup>,但该系统只是基于结构简单、节点较少的线形海底观测系统设计。因此,开展对环形海底观测网络时间同步系统的研究,尤其是对各级网络传输设备所采用的时钟模式方案的研究是十分必要的。

本文首先分析研究了环形海底观测网络的时间同步系统的基本架构和建模原型,通过运用 OMNeT++ 仿真软件进行建模,然后对系统各级网络传输设备的时钟模式方案进行仿真研究,最后对该方案下影响同步性能的网络负载流量和不对称传输延迟两个因素展开评估,验证设计方案的可行性。

## 1 环形海底观测网络的时间同步系统

### 1.1 基本架构

海底观测网络按组成设备所处位置的不同可分为三个层面:岸基站监控中心层、水下接驳盒层和海底探测设备层,各层面之间通过专用海底光电复合缆完成信息传递和电能供应。岸基站监控中心层是海底观测网络的数据处理和指挥控制中心,由时间服务器、数据库服务器、网页服务器、监控计算机、远程供电设备和网络传输设备等组成;水下接驳盒层一般可分为主接驳盒和次接驳盒两级结构,接驳盒内部装有网络传输设备、控制单元、供电单元和信息接入设备等;海底探测设备将采集到的各类监控视频、探测信号和传感器数据经各级水下接驳盒上传至岸基监控中心进行分析处理,以还原目标事件,这一过程的有效实现极大依赖于时间同步技术。

海底探测设备采集到的带有时间标记的数据,要与其他探测设备的数据乃至是全球事件数据进行关联分析,则该时间标记应建立在一个统一且公认的时间基准上。UTC 是目前全球最常用的时间基准和时间尺度,海底观测网络的时间同步系统应采用 UTC 作为时间源,并由位于岸基站监控中心的时间服务器获取。为了减少系统的复杂度和提升网络的可扩展性,海底观测网络的时间同步系统应统一采用一种高精度时间同步技术,输出的时间同步信号可灵活转换成多种格式和精度的时间信号,以最大化满足各级别的时间同步精度要求。

通过对不同时间同步技术的比较分析,设计的环形海底观测网络时间同步系统选择 PTP 协议作为主要时间同步技术。PTP 协议基于延迟请求、响应的原理,采用时间戳机制和主从时钟方案以实现时间同步,协议规定了四种时钟模型,分别是普通时钟 OC(Ordinary Clock)、边界时钟 BC(Boundary Clock)、端到端透明时钟 E2E TC(End-to-End Transparent Clock)和点到点透明时钟 P2P TC(Peer-to-Peer Transparent Clock)。其中 OC 可作为同步机制中的主时钟或从时钟;BC 具有多个 PTP 端口,可看作多个 OC 的集成体,但最多只能有一个端口处于从时钟状态;TC 也有多个端口,没有主、从时钟状态,但 E2E TC 具有测量事件报文在时钟的驻留时间的功能,P2P TC 在此基础上还具有测量相邻两时钟之间的端口平均路径延迟的功能。

该系统的基本架构如图 1 所示,共包括三个部分。



式传输 PTP 报文,暂未安装 PTP 时钟模块。

以该系统作为建模原型,运用 OMNeT++ 软件进行建模仿真,并对该系统的时间同步性能影响因素进行仿真研究,结果表明:对于环形海底观测网络的时间同步系统,要保证亚微秒级精度的时间同步性能,各级传输设备应当考虑加入 PTP 时钟模块。下面对各级传输设备采用的时钟模式方案展开仿真研究。

## 2 各级传输设备时钟模式的仿真研究

### 2.1 主接驳盒传输设备的时钟模式

基于建立的时间同步系统模型,展开仿真实验,首先分析该系统的时间同步实现情况,初始状态下从时钟端口的状态曲线如图 3 所示。可以观察到,开始仿真后该端口迅速到达从时钟状态,随后一直在从时钟状态和未校准状态之间来回摆动,最终无法被决策为稳定的从时钟状态。

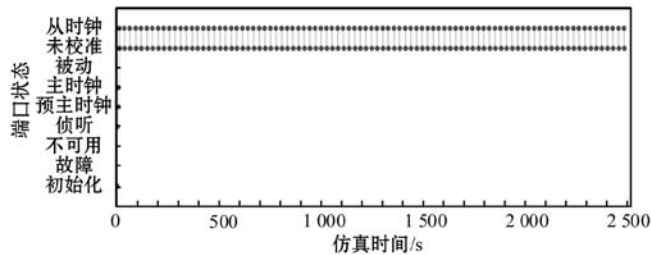


图3 初始状态下从时钟端口的状态曲线

对仿真结果的分析表明:在该模型中,由于从时钟所在分支链路的汇聚节点采用了不具备 PTP 时钟模块的普通传输设备,它会转发并透明传送所有时钟的 PTP 通知报文,所以从时钟运行最佳主时钟 BMC (Bestmaster Clock) 算法时会接收到多个时间源的信息而难以做出状态决策,导致系统最终无法实现高精度时间同步。因此,对于环形海底观测网络的时间同步系统,处于汇聚层的主接驳盒传输设备必须采用具备 PTP 时钟模块的特殊传输设备。

下面对主接驳盒传输设备采用的时钟模式进行仿真研究。在主接驳盒传输设备中分别加入 BC 模型、E2E TC 模型和 P2P TC 模型,分三组进行仿真实验。

第一组仿真实验中,主接驳盒传输设备采用 BC 模式,部分时钟端口的状态曲线如图 4 所示。开始仿真后,BMC 算法判断出系统存在时钟成环情况,迅速将环路中最左端主接驳盒传输设备的 4 端口(与左端岸基传输设备相连接的端口)决策为被动状态并保持稳定不变,从时钟迅速达到从时钟状态并稳定维持下去。后两组仿真实验中,主接驳盒传输设备采用 E2E TC 模式或 P2P TC 模式,从时钟的端口状态仿真结果

与图 3 相比没有发生变化。

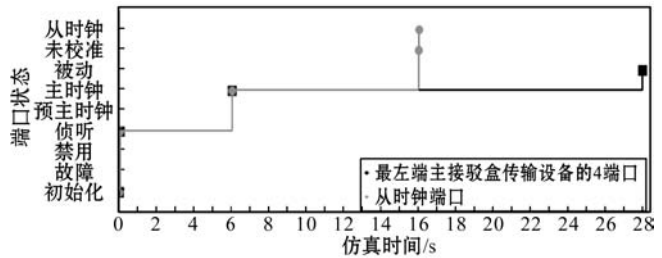


图4 采用 BC 模式时部分时钟端口的状态曲线

对仿真结果的分析表明:主接驳盒传输设备采用 BC 模式时可以避免时钟成环,使系统生成同步状态的逻辑断点,由于 BC 模型能够将主时钟与超主时钟的同步链路分割成多段子链路,每段子链路中时钟端口只接收一个时间源的信息,因此该模式下从时钟可以保持稳定的从时钟状态,使系统实现高精度时间同步;主接驳盒传输设备采用 E2E TC 模式或 P2P TC 模式时,由于 TC 模型也会转发所有时钟的 PTP 通知报文而自身不进行时间同步,所以从时钟运行 BMC 算法时仍会接收到多个时间源的信息而难以做出状态决策,导致该模式下系统最终无法实现高精度时间同步。

**结论 1** 环形海底观测网络的时间同步系统中,主接驳盒传输设备必须采用 BC 模式以避免时钟成环。

### 2.2 岸基传输设备的时钟模式

实现系统的时间同步后,还需优化系统的时间同步性能。基于该系统模型,主接驳盒传输设备采用 BC 模式后,其他传输设备仍未加入 PTP 时钟模块时,从时钟的时间偏差仿真结果如图 5 所示。可以观察到,从时钟的时间偏差在  $(-0.5 \mu\text{s}, -0.25 \mu\text{s})$  区间内反复波动,收敛时间约为 150 s,当第 2 000 s ~ 2 070 s 网络负载流量产生时,该曲线出现尖刺状的急剧抖动,超出了  $1 \mu\text{s}$ ,此外该曲线还存在明显向负方向偏移的情况。

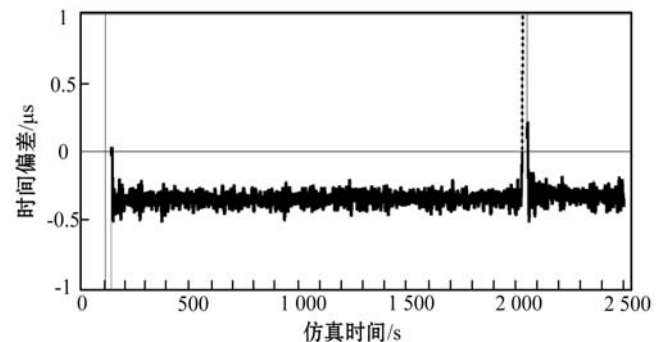


图5 未加入 PTP 时钟模块时从时钟的时间偏差曲线

对仿真结果的分析表明:该系统受到了网络负载流量和传输设备的不对称延迟的较大影响,对于现实中时刻存在负载流量的环形海底观测网络,要保证亚

微秒级精度的时间同步,各级传输设备尤其是核心层交叉流量更大的岸基传输设备应当考虑采用具备 PTP 时钟模块的特殊传输设备。

下面对岸基传输设备采用的时钟模式进行仿真研究。在岸基传输设备中分别加入 BC 模型、E2E TC 模型和 P2P TC 模型,分三组进行仿真实验。

第一组仿真实验中,岸基传输设备采用 BC 模式,从时钟的时间偏差曲线如图 6(黑色曲线)所示。可以观察到,该曲线的负方向偏移程度未发生改变,网络负载流量造成的尖刺抖动有所减小,从时钟的时间偏差可以保持在  $1\mu\text{s}$  以内,但其收敛时间却增加至 900 s 左右。

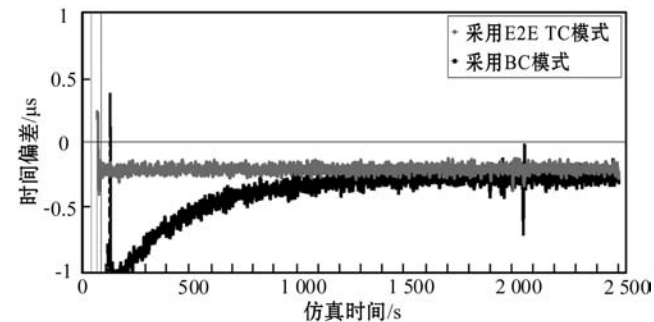


图 6 采用 BC 或 E2E TC 模式时从时钟的时间偏差曲线

第二组仿真实验中,岸基传输设备采用 E2E TC 模式,从时钟的时间偏差曲线如图 6(灰色曲线)所示。可以观察到,该曲线的负方向偏移程度有所降低,网络负载流量造成的尖刺抖动也大大减小,从时钟的时间偏差保持在  $(-0.3\mu\text{s}, -0.15\mu\text{s})$  区间内,收敛时间也减少至 70 s 左右。

第三组仿真实验中,岸基传输设备采用 P2P TC 模式,从时钟的时间偏差曲线如图 7(黑色曲线)所示。可以观察到,从时钟的时间偏差收敛时间减少至 60 s 左右,但该曲线向负方向偏移了近 0.7 ms。

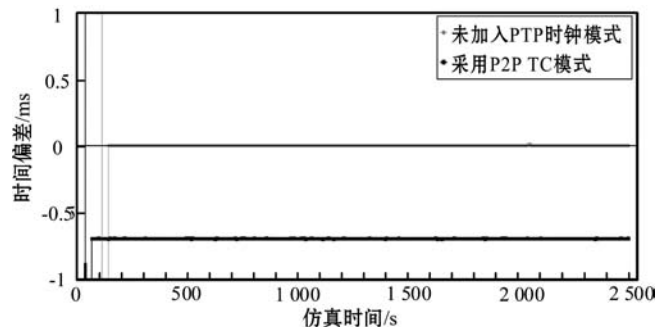


图 7 采用 P2P TC 模式时从时钟的时间偏差曲线

对仿真结果的分析表明:岸基传输设备采用 BC 模式或 E2E TC 模式时,都能有效减轻网络负载流量对时间同步性能造成的影响,保证系统实现亚微秒级精度的时间同步,但 BC 模式不能修正传输设备的不对称延迟产生的影响,且会大大增加从时钟的时间偏

差收敛时间,不利于时间同步系统的稳定性;E2E TC 模式可以修正传输设备的不对称延迟产生的影响,而且能够减少从时钟的时间偏差收敛时间。P2P TC 模式理论上也能够减轻网络负载流量和传输设备的不对称延迟的影响,但由于主接驳盒传输设备已经采用了 BC 模式,当岸基传输设备采用 P2P TC 模式时,E2E 和 P2P 两种同步机制的共存容易引起同步算法的混乱,导致部分 PTP 报文的传输延迟无法及时测出,从而造成从时钟较大的偏移误差,系统最终无法实现高精度时间同步。

**结论 2** 环形海底观测网络的时间同步系统中,岸基传输设备应当采用 E2E TC 模式以保证系统实现亚微秒级精度的时间同步。

### 2.3 次接驳盒传输设备的时钟模式

最后对处于接入层的次接驳盒传输设备采用的时钟模式进行仿真研究。在次接驳盒传输设备中分别加入 BC 模型、P2P TC 模型和 E2E TC 模型,分三组进行仿真实验,其中主接驳盒传输设备已采用 BC 模式,岸基传输设备已采用 E2E TC 模式。

前两组仿真实验的研究结果与岸基传输设备时钟模式方案的研究结论一致,此处不再赘述。第三组仿真实验中,从时钟的时间偏差曲线如图 8(黑色曲线)所示。可以观察到,当次接驳盒传输设备采用 E2E TC 模式时,该曲线的负方向偏移程度略微降低,网络负载流量造成的尖刺抖动有所减小,但减小的幅度也不大,从时钟的时间偏差收敛时间未发生改变。

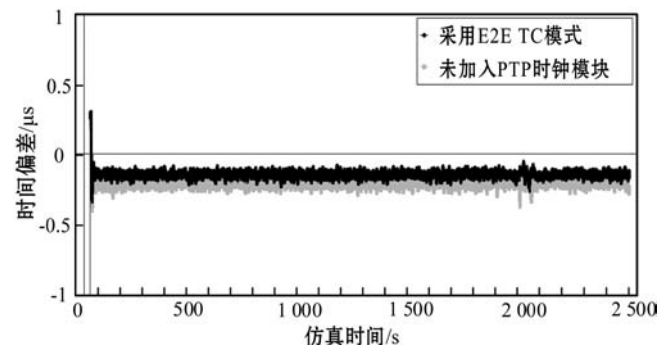


图 8 采用 E2E TC 模式时从时钟的时间偏差曲线

对仿真结果的分析表明:次接驳盒传输设备同样不适合采用 BC 模式和 P2P TC 模式,采用 E2E TC 模式时虽然可以优化系统的时间同步性能,但取得的效果比较微弱,而且由于次接驳盒的空间比较小、数量比较多,在其内部添加额外的 E2E TC 时钟硬件会导致成本大大增加。

**结论 3** 环形海底观测网络的时间同步系统中,同等时间同步精度要求下,次接驳盒传输设备可以不安装 PTP 时钟模块,仍以透明传送的方式传输 PTP

报文。

### 3 仿真研究结果与验证

通过对各级网络传输设备所采用的时钟模式进行仿真研究,本文得出以下方案:对于环形海底观测网络的时间同步系统,岸基站和主接驳盒的传输设备应分别支持端到端透明时钟模式和边界时钟模式,次接驳盒的传输设备可以不具备 PTP 时钟模块,继续采用透明传送的方式传输 PTP 报文。此方案既满足了系统亚微秒级精度的时间同步要求,又有效节约了水下节点的设备空间和系统的建设成本。

通过评估网络的上行负载流量和 PTP 时钟端口的不对称延迟两个因素对时间同步性能的影响状况,对该方案进行仿真验证。

海底观测网络中,单个海底探测设备上传的数据流量一般不超过 200 Mbit/s,水下摄像机、水听器等探测设备的数据流量较大,但也都在 1 000 Mbit/s 以内,相比之下,岸基站监控中心下传的指挥控制信息流量很小且不会发生太大的变化。仿真研究传输设备的时钟模式方案时,网络的上行流量被设置为接近于信道容量的初始值 1 000 Mbit/s,已经充分考虑了网络上行负载流量的饱和情况。因此,这里只需要评估一般状态下上行负载流量的影响情况。将网络的上行流量设置为 200 Mbit/s,其他参数保持不变,启动仿真实验。

从时钟的时间偏差曲线如图 9(黑色曲线)所示。可以看到,从时钟的时间偏差在流量产生时间段里几乎不受影响。这说明在设计的传输设备时钟模式方案中,网络负载流量对时间同步性能的影响已经被有效降低了。

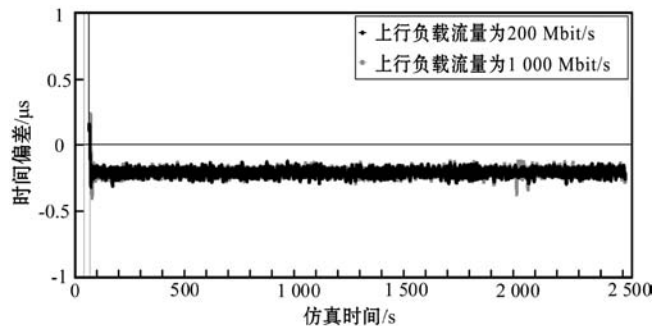


图9 评估上行负载流量时从时钟的时间偏差曲线

时钟端口产生的不对称延迟是导致 PTP 报文的不对称传输延迟的重要因素,一般为几十纳秒,最大时不超过 180 ns<sup>[11]</sup>。仿真研究传输设备的时钟模式方案时,PTP 时钟端口的不对称延迟被设置为初始值 -50 ns,已经充分考虑了不对称传输延迟的影响,这里对系统采用该方案后的极限情况进行评估。将 PTP

时钟端口的不对称延迟设置为 200 ns,其他参数保持不变,启动仿真实验。

从时钟的时间偏差曲线如图 10(黑色曲线)所示。可以看到,当 PTP 时钟端口的不对称延迟为 200 ns 时,从时钟的时间偏差向正方向偏移,且偏移量的大小约等于取初始值 -50 ns 时偏移量大小的 4 倍,虽然偏移较大,但仍能保持在 1 μs 以内,满足系统亚微秒级精度的时间同步要求。这说明在设计的传输设备时钟模式方案中,不对称传输延迟对时间同步性能的影响也得到了有效降低。

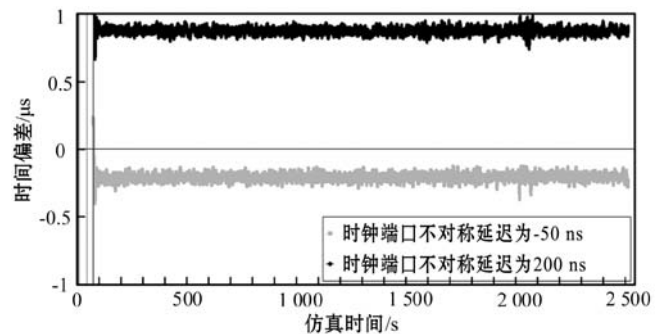


图10 评估时钟端口不对称延迟时从时钟的时间偏差曲线

**结论 4** 在环形海底观测网络的时间同步系统中,设计的传输设备时钟模式方案表现较好,采用该方案后,系统能够实现亚微秒精度的时间同步,并有效降低网络负载流量和不对称传输延迟的影响。

### 4 结 语

建设多节点、远距离、高可靠性的环形海底观测网络是未来海洋探测领域的重要发展趋势,而高精度时间同步的实现是其中的关键一环。本文在对环形海底观测网络的时间同步系统的基本架构和建模原型进行了分析研究的基础上,通过运用 OMNeT++ 仿真软件对该系统的各级网络传输设备的时钟模式方案展开了仿真研究和验证,得出了岸基站和主接驳盒的传输设备应分别支持端到端透明时钟模式和边界时钟模式、次接驳盒的传输设备可以不具备 PTP 时钟模块的方案。设计的方案可以实现较好的时间同步性能,满足亚微秒级精度的要求,系统所需成本较少,且能够有效降低网络负载流量和不对称传输延迟的影响,为未来环形海底观测网络及其时间同步系统的建设提供参考价值。

### 参 考 文 献

- [1] 王激,王红霞,孙洋. 新型海底观测网的研究[J]. 信息通信, 2015(8):56-58.

求解比集中式求解的成本低,将这两者进行对比,并仍选择文献[7]算法作为参照。表1显示算法的运行时间,其中,E-NIL-C表示采用集中式求解,而E-NIL表示采用分布式求解。

表1 算法的运行时间

| 算法      | 运行时间   |
|---------|--------|
| E-NIL   | 2.34 s |
| 文献[7]算法 | 3.01 s |
| E-NIL-C | 3.32 s |

E-NIL算法的计算时间为2.34 s,而文献[7]算法的计算时间为3.01 s。但是采用集中式求解的运行时间达到3.32 s,高于E-NIL。这也说明通过分布式实施SOCP能够有效地降低算法的复杂度。

## 4 结 语

本文针对移动WSNs的节点定位,提出基于二阶锥规划的分布式定位算法SOCP-DL。SOCP-DL算法先基于测距和速度测量值,建立ML估计表达式,然后再利用SOCP松弛技术求解,并对SOCP松弛技术分布式实施,进而降低算法的复杂度。实验数据表明,提出的SOCP-DL算法能够有效地提高定位精度。

## 参 考 文 献

- [1] Tomic S, Beko M, Dinis R. RSS-Based Localization in Wireless Sensor Networks Using Convex Relaxation: Noncooperative and Cooperative Schemes[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(5):2037-2050.
- [2] 江禹生,冯砚毫,管芳,等. 无线传感网非测距三维节点定位算法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2016,39(5):140-148.
- [3] Ghari P, Shahbazian R, Ghorashi S. Wireless Sensor Network Localization in Harsh Environments using SDP Relaxation[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(1):137-140.
- [4] Naddafzadehshirazi G, Shenouda M B, Lampe L. Second order cone programming for sensor network localization with anchor position uncertainty[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(2):749-763.
- [5] Han G J, Jiang J F, Zhang C Y, et al. A survey on mobile anchor node assisted localization in wireless sensor networks [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(3): 2220-2243.
- [6] Tomic S, Beko M, Dinis R. RSS-Based Localization in Wireless Sensor Networks Using Convex Relaxation: Noncooperative and Cooperative Schemes[J]. IEEE Transactions on

Vehicular Technology, 2015, 64(5):2037-2050.

- [7] Salari S, Shahbazpanahi S, Ozdemir K. Mobility-Aided Wireless Sensor Network Localization via Semidefinite Programming[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(12):5966-5978.
- [8] Shi Q, He C, Chen H, et al. Distributed Wireless Sensor Network Localization Via Sequential Greedy Optimization Algorithm[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(6):3328-3340.
- [9] Grant M, Boyd S. CVX: Matlab software for disciplined convex programming[OL]. version 1.21, Apr. 2011. <http://cvxr.com/cvx>.
- [10] Ssu K F, Ou C H, Jiau H C. Localization with mobile anchor points in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(3):1187-1197.
- [11] Sheu J P, Hu W K, Lin J C. Distributed Localization Scheme for Mobile Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2010, 9(4):516-526.

## (上接第154页)

- [2] 余贝,王红霞,谢杰荣. 基于可靠性的海底观测网传输网络拓扑结构研究[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2018(1):25-27.
- [3] Milevsky A, Walrod J. Development and test of IEEE 1588 Precision Timing Protocol for ocean observatory networks [C]//Oceans. IEEE, 2009.
- [4] Yokobiki T, Eiichiro E, Araki A, et al. Time-synchronization system for cabled observation systems[C]//The Seventeenth International Offshore and Polar Engineering Conference, 1-6 July, Lisbon, Portugal, 2007.
- [5] Kawaguchi K, Araki E, Kogure Y, et al. Development of DONET2-Off Kii channel observatory network[C]//Underwater Technology Symposium. IEEE, 2013.
- [6] Rio J D, Toma D M, Shariat-Panahi S, et al. Smart IEEE-1588 GPS clock emulator for cabled ocean sensors[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2014, 39(2):269-275.
- [7] Lentz S, Lecroart A. Precision timing in the NEPTUNE Canada network[C]. Oceans. IEEE, 2009.
- [8] Li D, Wang J, Zhang Z, et al. Research and implementation of an IEEE 1588 PTP-based time synchronization system for Chinese experimental ocean observatory network[J]. Marine Technology Society Journal, 2015, 49(1):47-58.
- [9] 杨帆,王红霞,余贝,等. 水下信息传输网中 OTN 与 SDH 技术集成研究[J]. 光通信技术,2016,40(8):4-7.
- [10] 余贝. 缆系水下信息传输网络传输性能优化研究[D]. 武汉:海军工程大学,2017.
- [11] Puhm A, Kramer M, Moosbrugger P, et al. Problems and solutions for refitting a sensor network with IEEE1588 clock synchronisation[C]//Emerging Technology and Factory Automation. IEEE, 2015.