****

**硕士研究生学位论文中期检查报告**

**Mid-term Examination Report for SJTU Master Student**

|  |  |
| --- | --- |
| **学号 Student ID** | 119032910097 |
| **姓名 Name** | 陈相 |
| **学生类别 Degree Program** | 专业型硕士生 Professional Master |
| **学习形式 Study Mode** | 全日制 Full-time |
| **导师 Supervisor(s)** | 陈彩莲 |
| **专业 Major** | 控制工程 |
| **学院 School** | 电子信息与电气工程学院 |
| **考核日期 Date** | 2022.9.30 |

填报说明 **Instruction**

1. 硕士研究生学位论文中期检查应通过[数字交大](http://my.sjtu.edu.cn/)在线提交申请，填写本表并上传系统。特殊情况下经研究生院事先同意，可不上传系统，并使用《上海交通大学硕士论文中期检查评审表》完成评审。

The application for thesis mid-term examination should be submitted online through [My SJTU](http://my.sjtu.edu.cn/). The student shall filled this form and upload it in the system. Under special circumstance, this form does not need to be uploaded and the review can be proceeded with the review form with prior consent from the graduate school.

1. 本报告请用A4纸双面打印，于左侧订在一起。各栏空格不够时，请自行加页。考核前提前一周送交导师、评审专家审阅。

This report should be printed with A4 papers and bound together on the left. If the space left is not enough, please feel free to add extra pages. The print version shall be sent to the supervisor, and the review committee members for review at least one week before the oral presentation.

1. 中期检查报告通过后，定稿版报告由研究生、导师各存档一份，无需上传系统。

Upon passing the review, the final version of this report shall be archived by the graduate student and his/her supervisors for future reference.

**中期检查报告 Mid-term Examination Report**

|  |  |
| --- | --- |
| 论文题目  Thesis Title | **5G+TSN异构网络时钟同步算法** |
| 研究课题来源  Source of Research Project | 请在合适选项前画√ Please select the proper options by “√”.  国家自然科学基金课题 NSFC Research Grants  国家社会科学基金 National Social Science Fund of China  国家重大科研专项 National Key Research Projects  其它纵向科研课题 Other Governmental Research Grants  企业横向课题 R&D Projects from Industry  自拟课题 Self-proposed Project |
| 论文开题日期  Thesis Proposal Date | 2021.6 |

1. **报告正文 Report。**请阐述开题报告以来学位论文研究工作的进展情况及所取得的阶段性成果，并简述下一阶段研究计划，不少于4000汉字。Please summarize your research progress and achievements since your thesis proposal as well as your plan for next step. No less than 3200 words if written in English.

**1.1 研究背景**

近年来，诸如工业自动化，IoT（Internet of Things）之类的技术增长了许多倍，应用变得至关重要。[1]云计算和高速网络的兴起要求高度精确的时间同步[2]。廉价的振荡器或石英晶体的特性会随功率，老化和热量的变化而变化。因此，不能保证两个相似的晶体以相同的时间/频率振荡。这些限制使振荡器的运行与其他振荡器略有不同。对于大型基础架构而言，用昂贵的时钟代替计算机的内置廉价时钟是不可行的。因此，一种有力而有效的方式来同步已传播结构的时钟是必不可少的[3]。NTP（Network Time Protocol）是时钟同步的最广泛使用的解决方案。后来，一种更精确的解决方案称为PTP，已被证明对时钟同步更有利[4]。尽管PTP通信算法与NTP类似，但PTP在事件的精确硬件辅助时间记录上却有所不同，称为时间戳[5]。 PTP是可以实现高精度时钟同步的一种可行解决方案。时钟同步是工业网络中非常重要的一环，而且对于时钟同步的要求也是越来越高的，其中无线和有线的时钟同步精度也是有着较大的差别。在有线领域，早期NTP的时钟同步精度由于是协议层的时间戳，误差一般达到10μs以上，再后来1588的时钟同步利用硬件时间戳，将精度提到到了几十纳秒到几十亚微秒间，同时减少了时钟同步对外部GPS信号的依赖，现在TSN(Time Sensitive Network)的802.1AS使用1588的同步方案，同时完全使用mac层的信息交互，减少了各层级之间的延迟误差，将同步精度稳定在了纳秒级，在具体的工业网络场景中，例如在现有的工业控制网络ethercat中，利用“分布时钟”机制，可以实现小于1μs的时钟同步精度。[6]在无线领域，时钟同步由于无线情况下的能量约束，本身报文时间粒度不高，传输过程中的干扰，本身同步精度要求不高等问题，精度一直停留在微秒级别。但是在5G的应用场景例如载波聚合，多点协同中，同步精度则要求达到100ns级别[7]。

TSN由于其高确定性网络而由于成为当前热门，TSN作为时间敏感网络，拥有诸如Qbv等门控调度算法保护来保证时间敏感流的传输，现在做调度算法的有很多，但有一个假设前提：时钟同步是完美的，不存在同步误差和误差抖动；但是，在实际工业场景中假设不成立。TSN对于时钟同步的精度要求极高(ns级别)，目前的TSN的同步协议802.1AS，在可接受的误差范围内，有线网络可以提供高精度的时钟同步，但是当网络规模较大，跳数增多，背景流量增多时，同步精度会大幅下降，从而影响整个TSN的性能。[8]换言之，TSN本身收到有线网络的局限性，需要通过与无线异构来解决有线跳数过多的问题，且在工厂内部的复杂环境下，本身就可能存在的多种无线设备与有线设备异构的情况，仅仅通过保证TSN有线网络内部的高精度同步无法满足实际的应用场景。为将TSN和无线网络相互结合，需要进一步考虑异构网络下的时钟同步方法，可以通过双层网络架构来降低网络规模对于整个同步精度的影响，也就是TSN+无线解决方案，即上层GM(Grand Master)到基站采用有线TSN结构，下层采用无线网络来同步从节点，这种情况下，无线网络的高覆盖性，可以有效降低网络规模较大的情况下跳数对于同步精度的影响，为TSN提供了一个更加有实际意义的应用场景。

针对这种有线无线网络异构结构，这些年也有很多时钟同步方案被提出，用来解决异构网络的协同问题，不同的同步方法有着其适用的范围，而对于大规模无线网络节点的异构同步方案，目前没有比较好的同步解决方案。

**1.2 国内外研究现状**

为解决异构网络的同步问题，通常都会选择选择先优化有线网络同步精度，将其作为主时钟后再针对无线网络进行主从同步。

有线网络部分的时钟同步，目前精度最高的有线网络同步为时间敏感网络的同步方案，时间敏感网络(Time Sensitive Network),简称TSN，采用TSN中协议802.1AS规定的时钟同步方案，此此方案是根据1588时钟同步方案改进而来，采用主从式同步方法，主从节点之间通过交换时间戳进行上下行延迟进行测量，得到两节点之间的传输延迟，进一步得到时钟偏差。事实上，两节点之间的传输延迟由报文传播延迟，高斯噪声，不确定性延迟组成，后两者是造成时钟同步精度误差的主要原因。在有线网络中，由于较高的稳定性和较好的传输性能，这两部分一般选择忽略不计，即将上下行传输延迟作为对称延迟来进行处理。[8]

相比于有线情况的时钟同步，无线网络中的能量约束，以及节点之间的传输干扰，造成无线时钟同步的误差较大。高精度的无线时钟同步的研究目前主要针对WSN和5G。

如果是倾向于高精度的无线时钟同步方案，在同步方法上，更多是采用类似1588的上下报文测量传输延迟的同步方案，在网络结构上，更多是采用类似于聚类的网络结构。聚类网络结构时钟同步的出发角度有从能量的角度出发进行考虑的，也有单纯从精度的角度出发进行考虑的。精度的方面，Xiangli Jia和Yang Lu针对网络跳数对于同步精度的影响做了专门的分析，得出了聚类网络结构相对于传统多跳网络结构的优势[9]。Jie Wu，Liyi Zhang则在聚类网络的结构基础上，提出了通过计算共识时钟来进行同步的方案。从能量的角度出发进行考虑的聚类网络结构，更多是从聚类算法的角度进行研究[10]。Pengyi Jia提出通过时钟频率抖动的大小s来进行网络聚类，通过将性能较差的时钟节点聚类进行同步的方式，可以有效降低网络整体的时钟同步频，从而达到降低网络整体能耗的目的[11]。Parminder Kaur也在文章中提出可以通过就近原则的聚类方法，来降低所有节点间通信距离差的和，来达到降低能耗的目的[12]。

针对传统的WSN网络中的聚类时钟同步在现实的应用问题，文献 [13] 等人研究了这些聚类结构时钟同步在5G中的可行性，并提出了可能存在的挑战以及可能的解决方案。5G下的时钟同步，主要是通过BS来完成上层与下层网络之间的同步。但是目前用来传输时间信息的报文SIB16时间精度不高，这就造成了影响时间同步精度关键的时间戳精度不高，而且无线时钟同步方案的时间戳采用的是应用层的时间戳，应用层时间戳在产生过程中很可能会产生较大的非确定性延迟，例如排队延迟，这类延迟通常数量级较大，在传统时钟同步方案中由于产生概率较低，通常放弃对这部分延迟的建模，但是当网络规模增大时，这类延迟的产生概率也会随着增加，从而对时钟同步精度产生较大的影响。如果要实现像TSN的802.1AS一样的高精度时间同步，必须对这一类延迟进行建模补偿，从而才能使得无线网络和有线TSN时钟同步实现对接。

在很多研究中，无线网络只是作为一个性能较差的有线网络来进行建模，所谓的异构网络，仅仅只是两个性能不同的有线网络连接在一起，然而事实上，根据文献[14],[15]所述，无线网络和有线网络对接的过程中，之所以会产生较大的同步误差，很大原因是由于在上行回传的过程中，会产生较大的PDV(packet delay variation)，从而严重影响同步性能。众所周知，定时数据包中的PDV（即延迟抖动）是降低IEEE 1588系统中同步精度的主要因素。 PDV是由于交换集线器上的数据包排队而产生的。 例如，在具有快速以太网接口的交换集线器中，如果在时序数据包到达时仅一个最大传输单元（MTU）大小为1518字节的数据包位于缓冲区中，则排队延迟最多变化122.4μs。这显然会较大地影响同步性能，造成有线网络和无线网络部分的对接困难。即不能很好地实现5G和有线TSN的对接。

为了克服由于延迟抖动引起的同步性能的下降，已经广泛研究了各种同步过程。文献[16],[17]具有以太滤波方法或统计方法的反馈回路是一种基本机制。但是，反馈系数是根据经验确定的。因此，通常很难自适应地优化它们。因此，就稳定性和准确性而言，可能难以获得足够的同步性能。

文献[18],[19]为了减轻由于延迟抖动引起的同步精度下降，提出了一种使用探测数据包进行排队估计的方法。采用探测数据包的目的是估计定时数据包中延迟抖动的发生，并且 过滤出具有时延抖动的数据包。这种方法可以有效测出当前的实际网络排队延迟大小，但是过程过于繁琐，且容易造成新增流量过多，能耗增大的问题。

文献[20],[21]指出诸如IEEE 1588精确时间协议和网络时间协议之类的时序协议要求对时间服务器（主服务器）与客户端（从属服务器）之间的通信路径延迟进行精确测量，以提供精确的时序同步。然后，使用这样的假设来估计客户站点上的准确时间，该假设是由于通过网络的物理传播时间引起的前向和后向延迟相等，或者它们之间的任何差异都是预先校准的。除了物理链路延迟之外，由于路径上的交换/路由设备，定时数据包还会遇到队列引起的延迟。将排队延迟归于非对称延迟中，并针对齐设计了补偿算法。但是其补偿算法依然依赖每次测量得到的数据，对于时钟同步来说过于繁琐。

文献[22]指出基于经典双向消息交换方案的IEEE 1588是用于分组交换网络的流行时钟同步协议。由于数据包交换网络中存在随机排队延迟，因此时钟偏斜和与已交换同步数据包时间戳之间的偏移的联合恢复可以视为统计估计问题。在前向主从路径与反向从主路径的确定性路径延迟之间可能存在未知性的情况下，IEEE 1588的时钟偏斜和偏移估计问题来自不正确的建模或网络攻击。首先，假设多个主从通信路径的可用性以及对描述随机排队延迟的概率密度函数的全面了解，该文章针对IEEE 1588的时钟偏斜和偏移估计方案，针对均方估计误差开发了下限。通过混合高斯随机变量来近似随机排队延迟的概率密度函数，该文章提出了一种鲁棒的迭代时钟偏斜和偏移估计方案，该方案采用空间交替广义期望最大化（SAGE）算法来学习所有未知参数。数值结果表明，所开发的鲁棒方案显示出接近下限的均方估计误差。这篇文章通过引入高斯混合分布来对排队延迟建模来达到了更好的时钟偏差估计，但整个计算过程过于复杂，传输开销较大。

实际应用过程中，由于5G网络低延迟，高精度的特性，是最有可能成为未来无线TSN载体的通信协议。目前针对5G和TSN融合的问题，3GPP协议和各通信厂商给出的解决方案为5G网桥。通过CNC对5G网络分配网桥的角色，并在有线无线交接处的协议转换器记录时间戳来计算5G网络内部的驻留时间，从而实现5G网络两端的TSN有线设备满足同步要求。但是该方案并不能满足未来无线TSN设备的同步需求，因为其并没有解决无线网络内部的累积同步误差问题，会使得同步精度偏低。

综上所述，目前5G网络对于时钟同步虽然提出了具体的要求，但是还缺乏具体的解决方案，尤其是对于未来高精度的无线时钟同步应用场景，例如以5G为媒介的大规模的无线TSN网络，现有的解决方案往往存在精度较低或者计算过于复杂，同步效率较低的情况。

参考文献 Reference：

1. J. Lin, W. Yu, N. Zhang, X. Yang, H. Zhang and W. Zhao, "A survey on Internet of Things: Architecture enabling technologies security and privacy and applications", IEEE Internet Things J., vol. 4, pp. 1125-1142, Oct. 2017.
2. K.-C. Chen and S.-Y. Lien, "Machine-to-machine communications: Technologies and challenges", Ad Hoc Netw., vol. 18, pp. 3-23, Jul. 2014.
3. N. J. Gomes, P. Sehier, H. Thomas, P. Chanclou, B. Li, D. Munch, et al., "Boosting 5G through Ethernet: How evolved fronthaul can take next-generation mobile to the next level", IEEE Veh. Technol. Mag., vol. 13, no. 1, pp. 74-84, Mar. 2018.
4. J. Han and D.-K. Jeong, "A practical implementation of IEEE 1588–2008 transparent clock for distributed measurement and control systems", IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 59, no. 2, pp. 433-439, Feb. 2010.
5. T. Ahmed, S. Rahman, M. Tornatore, K. Kim and B. Mukherjee, "A survey on high-precision time synchronization techniques for optical datacenter networks and a zero-overhead microsecond-accuracy solution", Photonic Netw. Commun., vol. 36, no. 1, pp. 56-67, 2018.
6. Z. Idrees et al., "IEEE 1588 for Clock Synchronization in Industrial IoT and Related Applications: A Review on Contributing Technologies, Protocols and Enhancement Methodologies," in IEEE Access, vol. 8, pp. 155660-155678, 2020
7. D. Jakoveti´c, J. Xavier, and J. M. Moura, “Fast distributed gradient methods,” IEEE Trans. Autom. Control, vol. 59, no. 5, pp. 1131–1146, 2014.
8. "IEEE Standard for Local and metropolitan area networks-- Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications in Bridged Local Area Networks-- Corrigendum 2: Technical and Editorial Corrections," in IEEE Std 802.1AS-2011/Cor 2-2015 (Corrigendum to IEEE Std 802.1AS-2011) , vol., no., pp.1-13, 29
9. X. Jia, Y. Lu, X. Wei and W. Tao, "Improved Time Synchronization Algorithm for Wireless Sensor Networks based on Clustering," 2019 IEEE 8th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC), Chongqing, China, 2019, pp. 1211-1215
10. J. Wu, L. Zhang, Y. Bai and Y. Sun, "Cluster-Based Consensus Time Synchronization for Wireless Sensor Networks," in IEEE Sensors Journal, vol. 15, no. 3, pp. 1404-1413
11. P. Jia, X. Wang and K. Zheng, "Distributed Clock Synchronization Based on Intelligent Clustering in Local Area Industrial IoT Systems," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 16, no. 6, pp. 3697-3707
12. P. Kaur and Abhilasha, "An energy efficient time synchronization protocol for Wireless Sensor Networks using clustering," 2015 IEEE Power, Communication and Information Technology Conference (PCITC), Bhubaneswar, India, 2015, pp. 671-674
13. S. Lee, S. Lee and C. Hong, "An Accuracy Enhanced IEEE 1588 Synchronization Protocol for Dynamically Changing and Asymmetric Wireless Links," in IEEE Communications Letters, vol. 16, no. 2, pp. 190-192, February 2012
14. Z. Chaloupka, N. Alsindi and J. Aweya, "Clock Synchronization Over Communication Paths With Queue-Induced Delay Asymmetries," in IEEE Communications Letters, vol. 18, no. 9, pp. 1551-1554, Sept. 2014
15. S. Johannessen, "Time synchronization in a local area network," in IEEE Control Systems Magazine, vol. 24, no. 2, pp. 61-69, April 2004
16. T. Murakami and Y. Horiuchi, "Improvement of synchronization accuracy in IEEE 1588 using a queuing estimation method," 2009 International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication, Brescia, Italy, 2009, pp. 1-5
17. R. Subrahmanyan, "Implementation Considerations for IEEE 1588v2 Applications in Telecommunications," 2007 IEEE International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication, Vienna, Austria, 2007, pp. 148-154,
18. N. Simanic, R. Exel, P. Loschmidt, T. Bigler and N. Kero, "Compensation of asymmetrical latency for Ethernet clock synchronization", Proc. IEEE Symp. Precision Clock Synchronization Meas., pp. 19-24, 2011.
19. S. Lee, S. Lee and C. Hong, "An accuracy enhanced IEEE 1588 synchronization protocol for dynamically changing and asymmetric wireless links", IEEE Commun. Lett., vol. 16, no. 2, pp. 190-192, Feb. 2012.
20. Z. Chaloupka, N. Alsindi and J. Aweya, "Efficient and precise simulation model of synchronization clocks in packet networks", Proc. IEEE CAMAD, pp. 79-83, 2013.
21. A. K. Karthik and R. S. Blum, “Optimum full information, unlimited

complexity, invariant, and minimax clock skew and offset estimators for IEEE 1588,” IEEE Trans. Commun., vol. 67, no. 5, pp. 3624–3637

1. May 2019.A. K. Karthik and R. S. Blum, "Robust Clock Skew and Offset Estimation for IEEE 1588 in the Presence of Unexpected Deterministic Path Delay Asymmetries," in IEEE Transactions on Communications, vol. 68, no. 8, pp. 5102-5119, Aug. 2020
2. 课题研究目标、主要研究内容和拟解决的关键问题。 Research objectives, main contents and key issues to be solved.

**2.1 研究内容**

研究内容一共可分为下面几个方面：

1.通过对时延模型和时钟模型进行分析，从而建立同步架构。

2.分析该同步架构下的时钟同步误差来源，进行补偿。

3.通过仿真分别实现单跳和多跳情况下的同步误差对比。

* + - 1. **时钟模型与时延模型：**

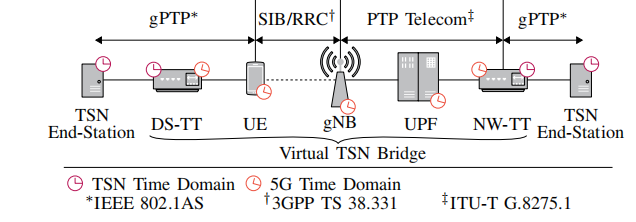
1. **时钟模型**

对于集成5G和TSN系统中的时间同步，3GPP中考虑了两种主要的时钟模型。这些时钟模型符合IEEE 802.1AS标准，描述如下。边界时钟–在边界时钟解决方案中，5G无线电接入网络（RAN）可直接接入TSN主时钟。5G RAN通过自己的信令和程序向用户设备（UE）提供定时信息。UE基于定时信息同步TSN设备。透明时钟–在透明时钟解决方案中，时间同步是通过交换PTP消息实现的。TSN主控台和TSN设备之间的任何中间5G或TSN实体都会更新PTP消息以更正在实体中花费的时间。

本研究考虑了用于集成5G和TSN系统中空中时间同步的边界时钟模型，如图一所示。5G RAN可以直接访问TSN大师级时间。这可以通过与TSN主时钟直接连接或通过支持PTP的底层传输网络实现。同时也考虑另一种情况，即gNB根据传输网络上的IEEE 802.1AS消息与位于核心网络中的用户平面功能（UPF）互连，与TSN主控时间同步。

采用该模型同步的原因主要出发点在于减少通信开销，所有同步信息在5G时域内部均打包为报文，在两个边界时钟处再解包为同步需要的Sync报文和Followup报文。

因此，每一个5G两端的TSN时域时钟



Figure

1. **时延模型**

这部分基于马尔可夫链理论，对该时钟模型下的队内排队延迟进行推导，并以此为依据对网络拓扑进行优化。为达到这一目标，主要思路如下，首先，计算批量到达的非时钟同步流量在交换机处产生的队列，通过计算级数的母函数，得到级数的期望值，随后，分析在背景流量情况下的时钟同步流队列延迟，通过对所有可能的背景流量占用队列情况进行全概率求和，来得到队列长度的期望。针对背景流量的计算，采用的是非抢占式的考虑，更符合实际情况。

首先，对非时钟同步流量队列和时钟同步流量队列建模，通过排队论去进行建模，求解马尔可夫链，队列最大值为m，包到达速率为λ，包处理速率为μ，a为到达的包的数量的分布，根据马尔可夫链列得的稳态方程为：



其中 

令：



将上面两式两边同时乘以并求和可以得到：



进一步化简可以得到：



又因为p(1)=1，利用洛比塔法则可以得到



进一步将p(1)代入之间的求和公式中，可得p1，p2...p(m-1)均可求解。最后对p(x)进行求导可得：



其中a为a(x)的期望，σ为a(x)分布的方差。

随后再对时钟同步流进行建模，仅对每次时钟同步流到达时队列分析，考虑的是非抢占式传输，TSN抢占机制来源于 802.3br，有线网络协议，无线网络中不支持。

有以下三种情况：

情况1：系统内有v个非时钟同步流包，v<m，到达k个包，k<m-v，最好的情况，不需要排队，平均等待时间0

情况2：系统内有v个包，v<m，到达k个包，k>v-m，次优的情况，队列内为k+v-m个包，平均队列长度L1

情况3：系统内有v个包，v>m，到达k个包，队列内k个包，平均队列长度L2（节点数量多的时候最有可能的情况），利用全概率公式



最后求和化简可以得到：



即队列长度与cluster内的节点数量k和非时钟同步流的频率λ正相关。以此推导为依据对cluster内节点数量进行优化。优化流程如下：

* + - 1. 同步架构设计

为解决异构网络的同步问题，通常都会选择选择先优化有线网络同步精度，将其作为主时钟后再针对无线网络进行主从同步。

有线网络部分的时钟同步，目前精度最高的有线网络同步为时间敏感网络的同步方案，时间敏感网络(Time Sensitive Network),简称TSN，采用TSN中协议802.1AS规定的时钟同步方案，此此方案是根据1588时钟同步方案改进而来，采用主从式同步方法，主从节点之间通过交换时间戳进行上下行延迟进行测量，得到两节点之间的传输延迟，进一步得到时钟偏差。事实上，两节点之间的传输延迟由报文传播延迟，高斯噪声，不确定性延迟组成，后两者是造成时钟同步精度误差的主要原因。在有线网络中，由于较高的稳定性和较好的传输性能，这两部分一般选择忽略不计，即将上下行传输延迟作为对称延迟来进行处理。[8]

相比于有线情况的时钟同步，无线网络中的能量约束，以及节点之间的传输干扰，造成无线时钟同步的误差较大。高精度的无线时钟同步的研究目前主要针对WSN和5G。

如果是倾向于高精度的无线时钟同步方案，在同步方法上，更多是采用类似1588的上下报文测量传输延迟的同步方案，在网络结构上，更多是采用类似于聚类的网络结构。聚类网络结构时钟同步的出发角度有从能量的角度出发进行考虑的，也有单纯从精度的角度出发进行考虑的。精度的方面，Xiangli Jia和Yang Lu针对网络跳数对于同步精度的影响做了专门的分析，得出了聚类网络结构相对于传统多跳网络结构的优势[9]。Jie Wu，Liyi Zhang则在聚类网络的结构基础上，提出了通过计算共识时钟来进行同步的方案。从能量的角度出发进行考虑的聚类网络结构，更多是从聚类算法的角度进行研究[10]。Pengyi Jia提出通过时钟频率抖动的大小s来进行网络聚类，通过将性能较差的时钟节点聚类进行同步的方式，可以有效降低网络整体的时钟同步频，从而达到降低网络整体能耗的目的[11]。Parminder Kaur也在文章中提出可以通过就近原则的聚类方法，来降低所有节点间通信距离差的和，来达到降低能耗的目的[12]。

针对传统的WSN网络中的聚类时钟同步在现实的应用问题，文献 [13] 等人研究了这些聚类结构时钟同步在5G中的可行性，并提出了可能存在的挑战以及可能的解决方案。5G下的时钟同步，主要是通过BS来完成上层与下层网络之间的同步。但是目前用来传输时间信息的报文SIB16时间精度不高，这就造成了影响时间同步精度关键的时间戳精度不高，而且无线时钟同步方案的时间戳采用的是应用层的时间戳，应用层时间戳在产生过程中很可能会产生较大的非确定性延迟，例如排队延迟，这类延迟通常数量级较大，在传统时钟同步方案中由于产生概率较低，通常放弃对这部分延迟的建模，但是当网络规模增大时，这类延迟的产生概率也会随着增加，从而对时钟同步精度产生较大的影响。如果要实现像TSN的802.1AS一样的高精度时间同步，必须对这一类延迟进行建模补偿，从而才能使得无线网络和有线TSN时钟同步实现对接。

在很多研究中，无线网络只是作为一个性能较差的有线网络来进行建模，所谓的异构网络，仅仅只是两个性能不同的有线网络连接在一起，然而事实上，根据文献[14],[15]所述，无线网络和有线网络对接的过程中，之所以会产生较大的同步误差，很大原因是由于在上行回传的过程中，会产生较大的PDV(packet delay variation)，从而严重影响同步性能。众所周知，定时数据包中的PDV（即延迟抖动）是降低IEEE 1588系统中同步精度的主要因素。 PDV是由于交换集线器上的数据包排队而产生的。 例如，在具有快速以太网接口的交换集线器中，如果在时序数据包到达时仅一个最大传输单元（MTU）大小为1518字节的数据包位于缓冲区中，则排队延迟最多变化122.4μs。这显然会较大地影响同步性能，造成有线网络和无线网络部分的对接困难。即不能很好地实现5G和有线TSN的对接。

为了克服由于延迟抖动引起的同步性能的下降，已经广泛研究了各种同步过程。文献[16],[17]具有以太滤波方法或统计方法的反馈回路是一种基本机制。但是，反馈系数是根据经验确定的。因此，通常很难自适应地优化它们。因此，就稳定性和准确性而言，可能难以获得足够的同步性能。

文献[18],[19]为了减轻由于延迟抖动引起的同步精度下降，提出了一种使用探测数据包进行排队估计的方法。采用探测数据包的目的是估计定时数据包中延迟抖动的发生，并且 过滤出具有时延抖动的数据包。这种方法可以有效测出当前的实际网络排队延迟大小，但是过程过于繁琐，且容易造成新增流量过多，能耗增大的问题。

文献[20],[21]指出诸如IEEE 1588精确时间协议和网络时间协议之类的时序协议要求对时间服务器（主服务器）与客户端（从属服务器）之间的通信路径延迟进行精确测量，以提供精确的时序同步。然后，使用这样的假设来估计客户站点上的准确时间，该假设是由于通过网络的物理传播时间引起的前向和后向延迟相等，或者它们之间的任何差异都是预先校准的。除了物理链路延迟之外，由于路径上的交换/路由设备，定时数据包还会遇到队列引起的延迟。将排队延迟归于非对称延迟中，并针对齐设计了补偿算法。但是其补偿算法依然依赖每次测量得到的数据，对于时钟同步来说过于繁琐。

文献[22]指出基于经典双向消息交换方案的IEEE 1588是用于分组交换网络的流行时钟同步协议。由于数据包交换网络中存在随机排队延迟，因此时钟偏斜和与已交换同步数据包时间戳之间的偏移的联合恢复可以视为统计估计问题。在前向主从路径与反向从主路径的确定性路径延迟之间可能存在未知性的情况下，IEEE 1588的时钟偏斜和偏移估计问题来自不正确的建模或网络攻击。首先，假设多个主从通信路径的可用性以及对描述随机排队延迟的概率密度函数的全面了解，该文章针对IEEE 1588的时钟偏斜和偏移估计方案，针对均方估计误差开发了下限。通过混合高斯随机变量来近似随机排队延迟的概率密度函数，该文章提出了一种鲁棒的迭代时钟偏斜和偏移估计方案，该方案采用空间交替广义期望最大化（SAGE）算法来学习所有未知参数。数值结果表明，所开发的鲁棒方案显示出接近下限的均方估计误差。这篇文章通过引入高斯混合分布来对排队延迟建模来达到了更好的时钟偏差估计，但整个计算过程过于复杂，传输开销较大。

实际应用过程中，由于5G网络低延迟，高精度的特性，是最有可能成为未来无线TSN载体的通信协议。目前针对5G和TSN融合的问题，3GPP协议和各通信厂商给出的解决方案为5G网桥。通过CNC对5G网络分配网桥的角色，并在有线无线交接处的协议转换器记录时间戳来计算5G网络内部的驻留时间，从而实现5G网络两端的TSN有线设备满足同步要求。但是该方案并不能满足未来无线TSN设备的同步需求，因为其并没有解决无线网络内部的累积同步误差问题，会使得同步精度偏低。

综上所述，目前5G网络对于时钟同步虽然提出了具体的要求，但是还缺乏具体的解决方案，尤其是对于未来高精度的无线时钟同步应用场景，例如以5G为媒介的大规模的无线TSN网络，现有的解决方案往往存在精度较低或者计算过于复杂，同步效率较低的情况。

**2.2 研究目标**

本课题的研究目标主要集中在以下层面。

* **理论目标：**研究基于排队延迟估计的时钟同步机制设计与分析，对复杂背景流量下的时钟排队延迟进行建模，考虑为满足在背景流量下的时钟同步流提供尽可能小的排队延迟的网络聚类拓扑结构设计，并能从能耗，同步精度，同步速度等多个指标对同步机制进行准确刻画，凸显其整体优势；
* **技术目标：**设计完善的有线无线异构网络聚类拓扑的聚类流程，设计有线无线交接处交换机的排队延迟在线混合高斯分布估计算法设计，建立起有线无线异构网络情况下时钟同步机制，并通过交换机测试平台进行实际测试。

**2.3 拟解决的关键问题**

围绕上述研究内容，本课题拟解决的关键问题可被凝练为以下几点。

* **离线情况下的时钟时钟同步流队列延迟推导与聚类结构优化**

利用马尔可夫链的理论，对非时钟同步流进行建模，通过求解马尔科夫链，得到队列误差的期望值，并根据实际精度要求对每个cluster内的节点数量进行优化，使得排队延迟在误差允许的范围内。

* **在线情况下的时钟同步流队列延迟估计与聚类结构优化**

由于离线优化的情况下对非时钟同步流量一般采用泊松流进行建模，实际网络运行过程中网络流量往往会更加复杂，离线情况下的推导可能会使得排队延迟误差不在允许范围内，此时采用在线采集数据的方法对排队延迟进行混合高斯分布建模，并通过混合高斯分布模型队排队延迟进行进行进一步的补偿。

**基于马尔可夫链的排队延迟离线估计**

本课题基于马尔可夫链理论，对交换机内排队延迟进行推导，并以此为依据对网络拓扑进行优化。为达到这一目标，主要思路如下，首先，计算批量到达的非时钟同步流量在交换机处产生的队列，通过计算级数的母函数，得到级数的期望值，随后，分析在背景流量情况下的时钟同步流队列延迟，通过对所有可能的背景流量占用队列情况进行全概率求和，来得到队列长度的期望。针对背景流量的计算，采用的是非抢占式的考虑，更符合实际情况。

首先，对非时钟同步流量队列和时钟同步流量队列建模，通过排队论去进行建模，求解马尔可夫链，队列最大值为m，包到达速率为λ，包处理速率为μ，a为到达的包的数量的分布，根据马尔可夫链列得的稳态方程为：



其中 

令：



将上面两式两边同时乘以并求和可以得到：



进一步化简可以得到：



又因为p(1)=1，利用洛比塔法则可以得到



进一步将p(1)代入之间的求和公式中，可得p1，p2...p(m-1)均可求解。最后对p(x)进行求导可得：



其中a为a(x)的期望，σ为a(x)分布的方差。

随后再对时钟同步流进行建模，仅对每次时钟同步流到达时队列分析，考虑的是非抢占式传输，TSN抢占机制来源于 802.3br，有线网络协议，无线网络中不支持。

有以下三种情况：

情况1：系统内有v个非时钟同步流包，v<m，到达k个包，k<m-v，最好的情况，不需要排队，平均等待时间0

情况2：系统内有v个包，v<m，到达k个包，k>v-m，次优的情况，队列内为k+v-m个包，平均队列长度L1

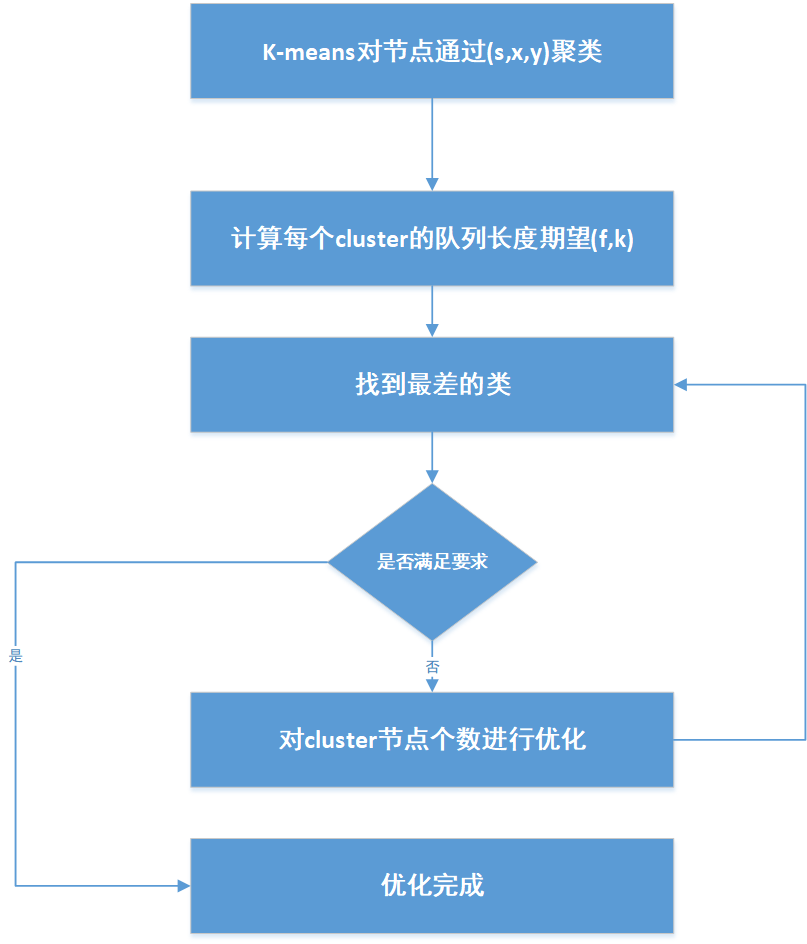
情况3：系统内有v个包，v>m，到达k个包，队列内k个包，平均队列长度L2（节点数量多的时候最有可能的情况），利用全概率公式



最后求和化简可以得到：



即队列长度与cluster内的节点数量k和非时钟同步流的频率λ正相关。以此推导为依据对cluster内节点数量进行优化。优化流程如下：



根据上述流程，最终使得所有cluster的节点数量能满足队列延迟要求，至此，离线优化的部分结束。

**基于混合高斯分布的排队延迟在线估计**

本课题将考虑实际应用环境中背景流量的复杂性所带来的影响。由于离线优化时为了便于计算，对于非时钟同步流量采用泊松分布进行描述，但实际生活中，由于网络流量的复杂性，对于在线运行下的排队延迟有必要进行专门建模分析。采用混合高斯分布对排队延迟进行建模。这部分尚待进一步的研究，传统的混合高斯分布建模求解是很复杂的，需要大量数据大量时间进行求解，所产生的负荷较大，针对我们这种优先进行离线调度后的在线建模，或许有些地方可以进一步简化，有些较小的量或许可以约去，且不需要考虑频率造成的影响，可以有效降低复杂度。

**可行性分析**

围绕本课题的相关内容，已开展了大量前期调研和相关研究，对国内外整体研究现状有了较为全面的了解。在此基础上，针对同步算法设计、理论分析和实际验证等关键问题，制定了明确清晰的目标和具体可行的方案。且实验室内具有测试床平台，可以对最终效果进行测试。

5G+TSN融合设计与研究动机

本章将针对现有的异构网络中的5G网络网桥技术以及无线内部同步技术做出简要的介绍，并着重整理分析大规模异构网络节点跨区域协同操作的同步需求，并总结现有方案在大规模跨区协同操作下的问题，引出本文的研究动机。

5G网桥技术

由于5G网络低延迟，高精度的特性，是最有可能成为未来无线TSN载体的通信协议。目前针对5G和TSN融合的问题，3GPP协议和各通信厂商给出的解决方案为5G网桥。通过CNC对5G网络分配网桥的角色，并在有线无线交接处的协议转换器记录时间戳来计算5G网络内部的驻留时间，从而实现5G网络两端的TSN有线设备满足同步要求。

5G网络现有的时钟同步方案除了卫星授时外，再卫星信号差的应用场景下，会采用1588v2协议进行同步。对于终端设备，5G网络则通过自己定义的广播信息块9(SIB9)，以基站广播的方式实现终端之间的时钟同步。

1588v2协议

1588v2是目前最被广泛使用的精密时钟同步协议，全称为EEE P1588 DM2.2， Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems，简称为PTP(Precise Time Protocol)协议，其思路为通过记录时间戳计算网络中的延时误差进行修正，从而达到同步的目的，精度可达ns级。

1588v2支持三种时钟类型，普通时钟（Ordinary Clock，OC），边界时钟（Boundary Clock， BC），透明时钟（Transparent Clock，TC），其中5G网桥即利用了透明时钟的概念来实现对驻留时间的修正。

\paragraph{1588v2的局限性}

1588v2可支持高精度的相位同步，可满足5G同步需求。但是在实际应用中，，分组传输网络需要所有节点都支持PTP协议，组网较为复杂，网络的拥塞，时延，抖动，丢包都会影响时钟精度。更为重要的是，1588v2同步需要上下行链路的时延相等，否则就需要人工校准，这一点在项目实施中非常困难。

在进行接入终端的时钟同步时，5G网络拥有一套现有的协议流程。第一步为接收端和发射端在时间域和频率域的同步，并不在5G协议的规定范围内。常用方法为互相关检测和自相关检测，通过将接收信号和已知信号PSS作互相关检测检测已知信号的位置，或者对接受信号自身做自相关检测来检测循环前缀CP的位置，获得ofdm符号同步和检测同步信号所在的频率。

其核心思路即通过基站广播SIB数据包，使得在终端在接入小区的过程中实现一次同步，并在一段时间后进行周期性广播来进行校正以保证精度。

该方法相对1588v2的流程通信开销较小，但由于单向时延测量的原因，其精度只能达到μs级。

现有的5G协议中提供的方案为网桥方案，即利用了1588v2中的透明时钟概念。TSN交换机和用户UE都是与基站gnb进行同步，交换机再接入TSN有线网络。

当要开始进行TSN模式时，即有时间敏感流要通过5G进行传输时，就会通过降低时延来达到高精度的同步要求。

切换到TSN mode的时候需要控制信道，同步的时候为业务信道进行配合，相关信道：synchronization block(SS) physical broadcast channel(PBCH)

其中值得关注的信号和信道为PSS(primary synchronization signal)和SSS(secondary synchronization signal)。相较于有线网络中的同步，误码率即通信质量也会对同步精度造成影响。

现有的融合优化方案

对于5G-TSN融合网络，文献[23]提出将5G系统作为TSN桥接器，设计自适应模块来处理TSN协议和信息。 上述方案的优点是5G系统的参数和流程不会暴露给TSN网络。 5G Release 16 协议将上述提议纳入规范，并在 5G 系统的两个边缘引入了新的实体来提供 TSN 转换功能，即 UPF 层的 NW-TT 和终端侧的 DS-TT [24]。 [25] 分析了由 5G 和 TSN 网络组成的不同混合拓扑方案，具有不同的特性和用例。 基于此，[26] 提出了一种时钟同步技术，将单向消息机制和 IEEE 802.1AS 相结合，用于 5G-TSN 集成网络，显着降低了同步开销。 对于NW-TT和DS-TT，[27]分析了下行链路的时钟同步过程，提出了一种可以支持多个时钟域协同工作的设计方案。 但 5G 时钟域和 TSN 时钟域在同步过程和时序消息方面存在差异。 在5G-TSN融合网络中实现低复杂度和高精度的跨域时钟同步仍然是一个难题。针对该问题，文献[28]提出了一种5G-TSN融合网络中基于数据包中继的跨域时钟同步，可以联合估计端到端时钟频率偏移和相位偏移。但是该方案主要关注于基站和TSN设备之间的协调同步，对于无线网络内部的累积误差依然缺少处理。

\subsection{异构网络协同需求}

根据以上小节，本文总结了三点以5G-TSN为代表的异构网络协同需求：

全区域最低同步精度应达500ns，以满足未来无线TSN需求

应尽量避免双向同步和多次重传同步，以减少通信开销

应补偿无线节点内部的累积误差，以应对大规模无线网络节点场景

研究动机

从表2-3可以看出，现有的异构网络同步方案依然无法完全满足未来5G-TSN融合网络的同步需求。对于传统的1588v2同步而言,虽然具有高精度或者高拓展性的优点，并且机制简单，但其通信开销非常大，包括多次的收发解包，重传确认，校验和周期性重同步。而广播同步虽然拥有良好的可拓展性和较小的通信开销，但其同步精度无法满足TSN对于无线网络的精度需求。5G网桥方案虽然足以应对现有的部分应用场景，但其依然没有解决无线网络内部同步精度较低的问题，无法面向未来的无线TSN需求，改良后的方案则对于大规模的节点所产生的累积误差依然缺少处理。

综合现有的异构网络同步方案的性能和问题，本文提出了一种新型的混合架构同步方案，将大规模无线网络节点的累积误差纳入考虑范围内，以此最小化其对于同步精度的影响，从而达到高精度高效率的异构网络时钟同步，实现5G-TSN设备之间跨网络区域协同操作。

本章小结

在本章中，首先介绍了1588和广播同步的相关概念，引出了5G网桥同步的研究现状，并介绍了几种改良网桥同步，然后本文对异构网络同步进行了分析，总结了跨网络协同的各项需求。最后对比分析了现有的几种同步方案的性能，结合异构网络协同需求，引出了本文的研究动机，即需要考虑无线网络下的传输开销，最小化累积误差，以提升大规模网络节点场景下的异构网络同步性能。

混合同步架构

本章节将详细介绍混合同步架构的设计，从架构模型，累积误差，边界补偿三个方面入手，讲解如何提升在大规模异构网络的应用场景下的时钟同步精度，并给出详细例子加以说明。

由于5G网络所采用的OFDMA(Orthogonal Frequency Division Multiple Access)，即正交频分多址技术可以配置任意的载波间隔，且载波间隔会影响到时隙大小以及时延的大小，在本章节中，先暂时选用在实际应用场景下的最广泛使用的低载波间隔，即载波间隔取15Hz为例进行说明：

混合同步架构预览

混合同步架构是一种专门针对大规模异构网络场景设计的同步方法，在大规模的异构网络协同中有着良好的性能优化，能最小化传输开销，累积误差以及时序误差。如图3-5所示，混合同步架构由有线骨干网络和多个较小无线岛组成，其同步过程主要分为以下三个阶段：

初始化同步：}在此阶段，有线无线网络先分别进行各自的初始化同步。有线网络通过自带的802.1AS进行同步，无线网络则通过广播方式进行单向同步，其内容包括节点接入，拓扑确认，层级编号以及主从时钟定位。这些参数将被用于确定后续的同步操作，即累积误差补偿和边界补偿。后续阶段的误差补偿都是分层级完成的，没个层级都存在自己的主从时钟配对，配对方式由上文中的参数决定。

累积误差补偿

边界补偿

初始化同步

\subsubsection{有线部分初始化同步}

有线部分的初始化同步采取gptp同步方案，IEEE 802.1AS 规定了用于 TSN 网络中时间同步的 gPTP。 它定义了传播延迟测量以及频率和时间同步的机制。 gPTP 定义了两种类型的时间感知系统 (TAS)，它们是时间感知终端站 (TAE) 和时间感知桥 (TAB)。 TAS 可以是从属实体或主实体。 每个时域只有一个主实体。 此外，在 gPTP 范围内称为大师 (GM) 的主实体充当时间感知网络 (TAN) 内所有从属实体的参考时间源。 TAN 与一个或多个时域相关联。 因此，TAS 可以同时成为不同时域的成员。

时钟偏差补偿方案采用上文中的1588v2协议中的方式进行计算：

无线部分初始化同步

因此混合架构中的无线网络部分可以视为gptp中的一个单独的时域存在，而基站则作为其GM而存在。无线部分的初始化同步则通过广播同步完成，根节点将计数k=0嵌入同步报文广播发送，接收到的节点将计数k进行k+1设定为本地级别并向下一级发送包含k+1的广播同步报文。以此类推。直到所有节点都确定自己的级别，并从上至下依次进行同步。初始同步按照单向同步方案进行，收到广播的时钟根据解包内的时间戳信息和接收时间直接计算传输延时并对本地时钟进行校正。

由于无线部分存在不同的无线通信协议和协同场景，其对于同步精度的要求存在较大差异，例如wifi和wsn网络通常只需要精度达到μs级别即可，因此需要根据组网结构对无线网络中的不同需求创造不同的时域，从而避免通信开销的浪费。对于高精度需求的5G和无线TSN区域，通过成对同步方案进行同步，每次间隔为一个时隙。从时钟会接收到通过中间的若干个来自主时钟的参考时间戳G，并记录下本地时间L。若干组时间戳交换后通过线性回归得到频差和时钟偏差的估计值，并通过下面式子对本地时钟进行修正。

式中的$\sigma$和$o$为线性回归得到的频差和时钟偏差估计值，而公式后半部分则是延时的计算，延时计算最小单位为一个时隙的长度，所以最终测得值应确保为时隙长度的整数倍。时隙长度取决于本章节开头提到的载波间隔长度。

累积误差补偿

在完成初始化同步的阶段之后，混合架构已经完成了有线部分和无线部分的分时域同步，CNC已经确定了网络拓扑结构以及各节点的层级，可以进入累积误差补偿的阶段。

在本阶段中，首先需要在之前标记的高精度同步节点出进行时间戳修正，以确保他们的同步精度。根据2.1的介绍，在同步过程中GM与高精度5G节点之间的传输均被视为透明时钟处理，可以看作单跳累积误差，以此为模型进行修正。在时间戳修正的基础上，需要对时延进一步优化，这将关系到载波间隔的分配和无线传输中的选择性衰弱，从而直接影响到同步精度。

针对不同的精度需求，混合架构依然将采用不同的同步机制，以此来降低总体网络的传输开销。

时间戳修正

针对高精度的同步节点，将其与GM之间的部分均视为透明节点，中间部分的同步误差均视为该节点的同步误差，同时参考3.2中得到的与主时钟之间的线性回归频差和偏差估计进行计算。

其中$\alpha\_1,\sigma\_{1}$为有线侧的频率同步修正估计值与误差，$\alpha\_2,\sigma\_{2}$为无线侧的频率同步修正估计值与误差，$\beta\_1,\delta\_{1}$为有线侧的时偏同步修正估计值与误差，$\beta\_2,\delta\_{2}$为无线侧的时偏同步修正估计值与误差，t代表参考时钟的时间。由于两侧的时偏和频率估计存在精度差距，因此有线无线在进行时间戳交换的时钟同步时，会造成边界同步误差。

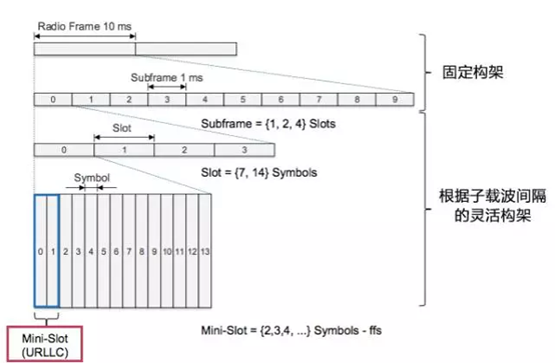
对于左侧有线主时钟而言，发送的sync报文包含$t\_1$时刻的时间戳，此时对应的参考时间应为$t=\frac{t\_{1}-\beta\_{1}-\delta\_{1}}{\alpha\_{1}+\sigma\_{1}}$,当此报文到达无线侧从时钟时，从时钟接收并记录时间戳$t\_2$,该时间戳的值应为$t\_{2}=\left(\frac{t\_{1}-\beta\_{1}-,其中delay即为从有线侧到无线侧的传输时间。

同理，当无线侧向有线侧发送同步请求需求的Delay\_req报文时，报文内的时间戳对应的参考时间应为,当此报文到达有线侧从时钟时，从时钟接收并记录时间戳,该时间戳的值应为中delay即为从无线侧到有线侧的传输时间。

实际应用中，在进行时钟同步时，对于传输时延通常采用对称化处理，由于上述提到的两侧精度的不同，实际上的传输时延应该为,其中无线部分的同步误差，因此式中的可忽略不计，因此对于传输时延的计算公式可以化简为,采用此公式修正传输延时的计算结果，可以在不需要反复多次交换时间戳的情况下，有效提升时间同步精度，增加时钟同步效率。

在进行时间戳修正后，时钟同步对于传输延迟的计算精度提高了，但是由于无线有线传输的不确定性，当传输延迟较大时，计算的误差也会增加，从而增加累积误差。同时，无线内部的时钟同步公式中，影响时间戳修正精度的关键因素即为时隙的大小，在5G传输中，时隙的大小与传输延迟也息息相关。综上，累积误差造成的影响取决于同步过程中时隙的大小，时隙决定了同步精度的精度上限，当节点数目增多时，同步延迟增大，时隙长度对累积误差的影响就更明显。

由于研究对象为以5G为载体的无线TSN网络，5G网络帧结构如下图所示：



5G中无线帧和子帧的长度是相同的，无线帧为10ms，子帧长度为1ms

5G中一个时隙包含的ofdm符号数量为14，不同的载波间隔下每个子帧包含的时隙数量不同

ssb(时钟同步报文)固定占有4个ofdm符号，所以不同的子载波间隔下ssb的持续时间和周期不同，5G子载波间隔是可调整的，例如，在实际应用中，5G协议有给出不同应用场景下推荐的子载波间隔参数集。

然而上述所给出的应用案例中，即使是时隙最小的情况，所对应的传输延迟也会达到ms级别，并不能达到无线TSN和有线TSN的精度需求，因此需要进一步进行优化。\\

由于5G网络子载波间隔的可分配这一特性，通过增大子载波间隔来减少子载波数量，减少ofdm的符号长度，从而降低时延，减少累积误差。

在大致的传输环境一定的情况下，相干带宽是相同的，子载波间隔(即子载波带宽)越大，子载波数量越少，每个子载波的带宽越大，产生频率选择性衰弱的可能性越高(信号带宽大于相干性带宽时才会发生)。 因此在仿真时需要先满足时延需求再利用均衡器进行补偿，保证同步精度。

校验更新

在完成累积误差补偿后，混合架构需要对网络参数进行更新。首先是对于网络拓扑的校验更新。原有的网络节点在后续的网络拓展中不需要进行任何更新，因为网络拓展没有打破他们原有的主从关系链。原有的网络拓扑同步规则将会保留，以节省传输资源，因此需要更新的就是新增的网络节点的本地校验，由于新增的无线终端节点分布的不确定性，如果直接取与有线主时钟的主从关系，势必要从其他的原有节点中取得原有的网络参数值，从而带来更多的跨机传输开销，因此选择将其作为一个新增的局域网络，和就近的无线节点进行同步，即将该对接的无线节点视为之前混合架构中的高精度有线主时钟，并采用之前的同步优化规则对新增节点进行同步，这样可以有效节省计算开销，并且由于原有无线节点已经进行过累积误差优化，这样所带来的误差在可接受的范围内。\\

接下来进行的全局校验的生成。由于原有拓扑网络节点的离线或故障，或者当同步精度漂移较大时，则需要对原有架构参数进行更新，重新计算频偏和时偏的估计值。每次全局校验更新都需要从其他节点中获取数据，会产生极大的传输开销，而且这部分的更新校验是不可避免的。

为了降低全局校验更新带来的跨节点传输开销，混合架构可以在结构内优先进行数据的计算，生成一些中间的结果，最后只将这些中间结果传输至出现同步问题需要进行全局校验的节点。这些中间结果能够代替原始数据完成校验的运算，保证了校验更新的正确性，并且相较于原始数据，中间结果能够将多个数据块运算成一个数据块，节省了跨节点传输的开销。

更新校验的整体算法如下

本章小结

本章介绍了本文所提出的混合同步架构，并详细介绍了混合同步架构的三个同步阶段，包括计算频偏和时偏估计值，达成初步时钟一致的初始化同步阶段，针对异构网络中的累积误差进行的补偿阶段，以及最后完成校验更新保证同步可靠性的校验更新阶段。

第二章中提到的异构网络同步需求，混合同步架构完美地满足了这些需求。

混合架构达到了高精度的无线TSN网络同步需求。

混合架构实现了最小网络传输开销，因为逐层同步只会从原有节点至新增节点。

混合架构解决了异构网络传输时延不一致的问题。

混合架构保证了最小的更新校验量，因为校验链被尽量地保留，从而减少了需要更新的校验块个数。

1. **课题的创新点 Novelties of the proposed topic.**

本课题的创新点集中在以下几方面。

* 基于现实TSN+5G的需求，提出有线和无线网络异构情况下的时钟同步问题，并给出利于这种情况的双层网络拓扑结构。
* 对于无线网络部分的聚类建模，并不只是单纯看作性能较差的有线网络同步，而是考虑到无线网络的能耗约束，并将能耗和精度联合考虑。
* 在无线网络与有线网络对接的过程中，针对存在的上行回传产生的排队延迟问题，不采用传统的每次同步单次测量排队延迟的方法，而是通过数学建模得到当前交换机内排队延迟期望，直接对网络结构和同步周期进行优化，从而达到提高同步精度的目的。
* 采用离线和在线优化结合的方法，避免了离线方法的不准确和在线方法的低速，实现快速的高精度的时钟同步。

1. **计划进度、预期成果 Research schedule, and expected outcomes**

**5.1 计划进度**



**5.2 预期研究成果**

通过本课题，将通过在线估计和有线估计相结合的方法去有效控制异构网络下的时钟同步的排队延迟，并计划通过实验室测试床进行验证。将争取在国内外会议上展示相关研究成果，以扩大影响范围。

**本人承诺：报告中的内容真实无误，若有不实，愿承担相应的责任和后果。** **I hereby declare and confirm that the details provided in this Form are valid and accurate.** **If anything untruthful found, I will bear the corresponding liabilities and consequences.**

**学生签字/Signature of Student： 陈相 日期/Date：** 2022-11-22