



上海交通大学学位论文

# 面向有线/无线异构网络的 混合时钟同步方法

姓 名：陈相

学 号：119032910097

导 师：陈彩莲教授

学 院：电子信息与电气工程学院

学科/专业名称：控制工程

申请学位层次：工程硕士

2023年5月

**A Dissertation Submitted to  
Shanghai Jiao Tong University for Master/Doctoral Degree**

**Hybrid Clock Synchronization Method for  
Wired/Wireless Heterogeneous Networks**

Author: Xiang Chen  
Supervisor: Cailian Chen

School of Electronic Information and Electrical Engineering  
Shanghai Jiao Tong University  
Shanghai, P. R. China  
May 6th, 2023

## 上海交通大学 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全知晓本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

## 上海交通大学 学位论文使用授权书

本人同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。

本学位论文属于：

☐ 公开论文

☐ 内部论文，保密 ☐ 1年/☐ 2年/☐ 3年，过保密期后适用本授权书。

☐ 秘密论文，保密 年（不超过10年），过保密期后适用本授权书。

☐ 机密论文，保密 年（不超过20年），过保密期后适用本授权书。

（请在以上方框内选择打“√”）

学位论文作者签名：

指导教师签名：

日期： 年 月 日

日期： 年 月 日

## 摘 要

随着工业自动化和物联网技术的高速发展，分布式系统之间的高精度协同控制需求日益激增，通信网络的时钟同步是系统授时的依据，也是支持工业系统协同控制的基础。工业有线/无线网络环境异常复杂，工业现场电磁环境复杂，干扰、噪声和金属机械移动等造成无线信号多变；随着音视频等感知终端在现场的部署，工业网络相较于传统控制网络而言，需具备更强的传输能力，才能避免出现拥塞。近年来，5G技术和时间敏感网络（time-sensitive network, TSN）技术分别提供了新的灵活的无线和有线网络基础设施。5G-TSN时钟同步在异构网络中具有重要意义，可为各种应用提供高同步精度和低同步延迟。但同时由于节点数量和拓扑结构动态变化，使得新的有线/无线的异构网络时钟同步任务充满挑战。本文致力于针对工业现场级应用，设计出一种以5G-TSN为核心网络的混合时钟同步架构，并在该架构中实现低复杂度、高精度和强抗干扰能力的跨介质时钟同步，以满足现场日益增长的异构网络适用性、动态性、可扩展性等需求。论文的创新成果总结如下：

其一，本文提出了一种针对规模化有线/无线异构网络的混合时钟同步架构：基于时钟模型和时延模型，提出名为“网络同步性能指标（Network Synchronization Performance Index, *NSPI*）”这一综合评估指标，作为时钟同步性能的基准。并以此指导网络同步过程中的层级划分，以便整合异构网络。分层算法将问题建模为有向图，采用预处理方法进行处理，实现井然有序的时钟同步。完成分层后，可以根据最小生成树和分层信息分析网络的同步性能，计算各层之间的平均同步延迟与抖动，通过修改Kruskal或Prim算法中的权重函数调整搜索过程进行优化。混合架构同时也会按照周期进行校验更新，以应对大规模网络中节点参数和网络拓扑变化的问题。实验表明，该混合架构下的时钟同步相比普通规模化有线/无线异构网络收敛速度提高了一倍，同时平均误差也下降一倍。。

其二，针对5G网络动态复杂信道环境造成的多径衰落的问题，设计了自适应判决反馈均衡器（Adaptive Decision Feedback Equalizer, ADFE）。在5G-TSN网络中，为了提高同步精度，通常需要选择较高的子载波间隔（sub-carrier space, SCS）来实现高精度同步精度，过高的SCS会造成多径衰

落，从而使得同步稳定性降低。引入ADFE可以有效解决该问题，实验通过比较ADFE与普通均衡器的误码率信噪比曲线，说明了ADFE在5G-TSN网络中的优势，包括更快的收敛速度和更强的抗干扰性能。

其三，针对工业网络中5G-TSN这一有线/无线融合网络，本文进一步设计了

SCS分配优化与时间戳补偿技术，实现了其在规模化异构网络中的应用。针对现有5G与TSN融合同步方案中的累积同步误差问题，本文从SCS和时间戳两个角度出发进行了同步算法优化，通过合理调整SCS，在保证带宽利用率的情况下降低了传输延迟，同时通过补偿时间戳，进一步降低了误差的累积效应，解决了工业网络中多网桥应用场景下累积误差影响时钟同步进度的问题。实验表明，该同步方案在保证5G网络带宽利用率的前提下，实现了5G-TSN网络的高精度时间同步。

以上研究表明，基于混合架构的时钟同步拥有较高的同步精度和较强的稳定性，在无线/有线异构网络时钟同步中具有显著的优势，是异构网络时钟同步技术在工业网络的一次成功应用。

**关键词：**时钟同步，工业网络，时间敏感网络，5G，异构网络

## ABSTRACT

With the rapid development of industrial automation and Internet of Things technology, the demand for high-precision collaborative control between distributed systems is increasing, and the clock synchronization of communication networks is the basis for system timing, as well as the foundation for supporting collaborative control of industrial systems. Industrial wired / wireless network environment is exceptionally complex, the industrial site electromagnetic environment is complex, interference, noise and metal mechanical movement caused by wireless signal variability; with the deployment of audio and video and other sensing terminals in the field, the industrial network compared to the traditional control network, need to have stronger transmission capacity to avoid congestion. In recent years, industrial 5G technology and time-sensitive network (TSN) technology provide new flexible wireless and wired network infrastructure, respectively. 5G-TSN clock synchronization is important in heterogeneous networks to provide high synchronization accuracy and low synchronization delay for various applications. However, at the same time, the number of nodes and dynamic topology changes make the task of clock synchronization for new wired/wireless heterogeneous networks challenging. This paper is dedicated to industrial field-level applications and designs a hybrid clock synchronization architecture with industrial 5G-TSN as the core network, and implements cross-media clock synchronization with low complexity, high accuracy and strong anti-interference capability in this architecture to meet the growing demand for heterogeneous network applicability, dynamics and scalability in the field. The innovative results of the paper are summarized as follows:

First, this paper proposes a hybrid clock synchronization architecture for scaled wired/wireless heterogeneous networks: based on the clock model and delay model, the proposed "Network Synchronization Performance Index (*NSPI*)" as a benchmark for clock synchronization performance. It is used to guide the hierarchical partitioning of the network synchronization process in order to integrate heterogeneous networks. The layering algorithm models the problem as a directed

graph, which is processed using preprocessing methods to achieve well-ordered clock synchronization. After completing the layering, the synchronization performance of the network can be analyzed based on the minimum spanning tree and layering information, the average synchronization delay and jitter between the layers can be calculated, and the search process can be optimized by modifying the weight function in Kruskal or

Prim algorithms to adjust the search process. The hybrid architecture also performs checksum updates according to the cycle to cope with node parameters and network topology changes in large-scale networks. Experiments show that the clock synchronization under this hybrid architecture doubles the convergence speed compared to the normal scaled wired/wireless heterogeneous network, while the average error is also reduced by a factor of two.

Second, the Adaptive Decision Feedback Equalizer (ADFE) is designed to address the problem of multipath fading caused by the dynamic and complex channel environment of 5G networks. In 5G-TSN networks, in order to improve the synchronization accuracy, it is usually necessary to select a high carrier interval to achieve high precision synchronization accuracy, and too high a carrier interval will cause multipath fading, thus making the synchronization stability reduced. The introduction of ADFE can effectively solve this problem, and the experiments illustrate the advantages of ADFE in 5G-TSN networks, including faster convergence speed and stronger anti-interference performance, by comparing the BER signal-to-noise ratio curves of ADFE with those of ordinary equalizers.

Third, for industrial 5G-TSN, a wired/wireless converged network, this paper further designs carrier interval allocation optimization and timestamp compensation techniques to realize its application in scaled-up heterogeneous networks. For the cumulative synchronization error problem in the existing 5G and TSN converged synchronization scheme, this paper carries out the synchronization algorithm optimization from two perspectives of carrier interval and timestamp, and reduces the transmission delay while ensuring the bandwidth utilization by reasonably adjusting the carrier interval, and further reduces the cumula-

tive effect of the error by compensating the timestamp, which solves the problem of cumulative error under the application scenario of multiple bridges in industrial networks affects the clock synchronization progress in industrial networks. Experiments show that the synchronization scheme achieves high-precision time synchronization of 5G-TSN network under the premise of ensuring the bandwidth utilization of 5G network.

The above research surface, based on the hybrid architecture of the clock synchronization has a high synchronization accuracy and strong stability, in the wireless / wired heterogeneous network clock synchronization has significant advantages, is a successful application of heterogeneous network clock synchronization technology in the industrial network.

**Key words:** clock synchronization, industrial network, time sensitive network, 5G, heterogeneous network



# 目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT .....	III
第一章 绪论 .....	1
1.1 研究背景 .....	1
1.2 研究现状 .....	4
1.2.1 有线网络时钟同步 .....	4
1.2.2 无线网络时钟同步 .....	7
1.2.3 异构网络时钟同步设计 .....	8
1.3 本文的研究内容 .....	14
1.4 本章小结 .....	17
第二章 有线/无线网络混合时钟同步架构设计.....	18
2.1 时钟模型 .....	18
2.2 时延模型 .....	19
2.3 混合时钟同步架构设计 .....	21
2.4 初始化同步 .....	27
2.4.1 有线部分初始化同步 .....	27
2.4.2 无线部分初始化同步 .....	28
2.4.3 校验更新 .....	30
2.5 混合架构时钟同步评估指标 .....	32
2.6 性能优化方法 .....	33
2.7 分层算法仿真 .....	34
2.8 本章小结 .....	41
第三章 面向5G-TSN时钟同步的均衡器设计.....	42
3.1 多径衰落产生的原因 .....	42
3.2 多径衰落对5G网络时钟同步的影响 .....	42
3.3 5G网络均衡器设计 .....	44
3.3.1 线性均衡器 .....	44
3.3.2 判决反馈均衡器 .....	45

---

3.3.3	自适应均衡器 . . . . .	45
3.3.4	针对5G网络均衡器设计 . . . . .	46
3.3.5	ADFE设计流程 . . . . .	47
3.4	均衡器仿真 . . . . .	49
3.5	本章小结 . . . . .	55
<b>第四章</b>	<b>5G-TSN异构网络的时钟同步优化 . . . . .</b>	<b>56</b>
4.1	SCS优化问题构建 . . . . .	56
4.2	SCS优化仿真 . . . . .	57
4.3	时间戳补偿算法 . . . . .	58
4.4	时间戳补偿仿真 . . . . .	60
4.5	本章小节 . . . . .	63
<b>第五章</b>	<b>全文总结 . . . . .</b>	<b>64</b>
5.1	工作总结 . . . . .	64
5.2	研究课题展望 . . . . .	64
攻读学位期间学术论文和科研成果目录. . . . .		75
致 谢 . . . . .		76

## 本文插图索引

1.1 图	5
1.2 图	11
1.3 图	12
1.4 图	15
2.1 图	19
2.2 图	22
2.3 图	26
2.4 图	27
2.5 图	29
2.6 图	35
2.7 图	37
2.8 图	38
2.9 图	39
2.10 图	40
3.1 图	44
3.2 图	51
3.3 图	52
3.4 图	54
4.1 图	58
4.2 图	60
4.3 图	61
4.4 图	62
4.5 图	62

## 本文表格索引

1.1	目前主要的以太网协议 . . . . .	14
1.2	The current main Ethernet protocol . . . . .	14
1.3	目前主要的无线网协议 . . . . .	14
1.4	Current main wireless network protocols . . . . .	14
1.5	有线/无线网络同步方案性能总结 . . . . .	16
1.6	Performance of Wired/Wireless Network Synchronization Solution	16
4.1	不同SCS对应的同步误差 . . . . .	58
4.2	Synchronization error corresponding to different SCS . . . . .	58

## 第一章 绪论

### 1.1 研究背景

时钟同步是指在分布式系统和网络中,使得各个节点的时钟保持一致的过程。在这个过程中,各个节点通过相互之间的信息交换和调整,使得它们的时钟值尽量接近一个公共的参考时间<sup>[1]</sup>。时钟同步是一种关键技术,它确保分布式系统和网络中的各个节点能够协同工作,保持对时间的一致性。在许多应用领域中,例如通信网络、分布式计算和协同控制等,准确的时钟同步对于保障网络数据的有效传输和处理至关重要。从宏观角度来看,时钟同步在网络传输中具有以下重要性:

- 数据一致性:在分布式系统中,各个节点之间需要交换数据以完成特定任务。准确的时钟同步确保了节点之间数据的时序一致性,从而避免了因为时间不同步引起的数据错误或丢失。
- 事件排序:分布式系统中的事件需要按照正确的顺序进行处理,以确保系统的稳定性和正确性。时钟同步为事件提供了一个全局的时间参考,有助于对事件进行排序和调度。
- 协同控制:在一些实时应用场景中,例如无人机编队、智能电网等,多个设备需要协同工作,共同完成任务。时钟同步使得这些设备能够在相同的时间基准下进行协调,从而提高系统的整体性能。

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,分布式系统的应用变得至关重要<sup>[2]</sup>,作为分布式系统协作基础的时钟同步也越来越受到重视。同时,云计算和高速网络的兴起要求高度精确的时间同步<sup>[3]</sup>。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和频率振荡。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<sup>[4]</sup>。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 (Precise Time Protocol), 已被证明对时钟同步更有利<sup>[5]</sup>。

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<sup>[6]</sup>。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 $10\mu s$ 以上，再后来1588的时钟同步利用硬件时间戳，将精度提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的IEEE 802.1AS使用1588的同步方案，同时完全使用mac层进行信息交互，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ethernet中，利用“分布时钟”机制，可以实现小于 $1\mu s$ 的时钟同步精度<sup>[7]</sup>。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<sup>[8]</sup>。

TSN由于其高确定性网络而成为当前热门，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<sup>[9]</sup>。换言之，TSN本身收到有线网络的局限性，需要通过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。

而这就涉及到异构网络时钟同步的问题。事实上，异构网络时钟同步随着现在网络规模的增加也在变得越来越重要。有线和无线异构网络中时钟同步的重要性主要体现在以下几个方面：

- 系统协调性：在异构网络中，有线和无线节点共同组成一个大的系统。这些节点需要协同完成各种任务，如数据传输、计算和控制等。时钟同步能够确保各个节点在执行任务时具有相同的时间基准，从而提高整个系统的协调性和执行效率。
- 数据一致性：在许多应用场景中，如物联网、传感器网络和通信系统等，数据需要在不同的节点之间传递和处理。时钟同步可以保证各个节点在处理数据时具有一致的时间戳，从而确保数据在整个系统中的一致性。
- 时延测量与估计：在异构网络中，时延对于性能优化、拥塞控制和质量保证等方面具有重要作用。时钟同步使得各个节点能够准确地测量和估计时延，从而为网络优化提供可靠的依据。
- 故障诊断与恢复：时钟同步可以帮助异构网络中的节点快速定位和诊断故障，从而实现快速恢复。这对于保证网络稳定性和可靠性具有重要意义。

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，而对于工业网络中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。对于大规模异构网络时钟同步而言，不仅要面对有线网络时钟同步和无线网络时钟同步中的各种问题，还需要专门设计新的同步机制来保证同步精度。大规模异构网络的时钟同步要额外设计的原因及挑战主要体现在以下几个方面：

- 网络环境的差异：异构网络通常由有线和无线网络组成，它们在传输特性、信号传播和干扰等方面存在显著差异。这些差异导致传统的时钟同步方法在异构网络中可能无法实现高精度和稳定性的同步。根据[10],[11]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，从而严重影响同步性能。因此，针对这些差异，需要设计新的同步算法来解决这些问题。

- 同步精度和稳定性的要求：大规模异构网络中，时钟同步的精度和稳定性要求可能因应用场景和需求而异。例如，在某些实时应用和安全关键系统中，时钟同步的精度和稳定性要求可能更高。为了满足这些要求，需要开发新的时钟同步方法来应对这些挑战。
- 节点数量和拓扑结构的变化：大规模异构网络中的节点数量和拓扑结构可能随时发生变化。这种动态性对于时钟同步算法的设计提出了额外的挑战。因此，需要开发能够适应这些变化的时钟同步方法，以确保网络中的节点始终保持同步。
- 能耗和资源限制：在异构网络中，尤其是无线部分，节点可能受到能耗和资源限制的影响。这些限制要求时钟同步算法在实现高精度和稳定性的同时，还需具备低能耗和低资源占用的特点。因此，需要设计具有这些特性的新型时钟同步方法。
- 安全和鲁棒性挑战：大规模异构网络可能面临恶意攻击和节点故障等问题，这些问题可能影响到时钟同步的正确性和稳定性。因此，新的时钟同步方法需要具备较强的安全性和鲁棒性，以应对这些挑战。

## 1.2 研究现状

### 1.2.1 有线网络时钟同步

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TSN的同步方案，采用TSN中协议IEEE 802.1AS规定的时钟同步方案，此方案是根据IEEE 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<sup>[12]</sup>。IEEE 802.1AS 协议源自于1588v2(IEEE P1588 DM2.2)时钟同步协议，其原理如下：

**1588v2协议** 1588v2是目前最被广泛使用的精密时钟同步协议，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<sup>[13]</sup>。

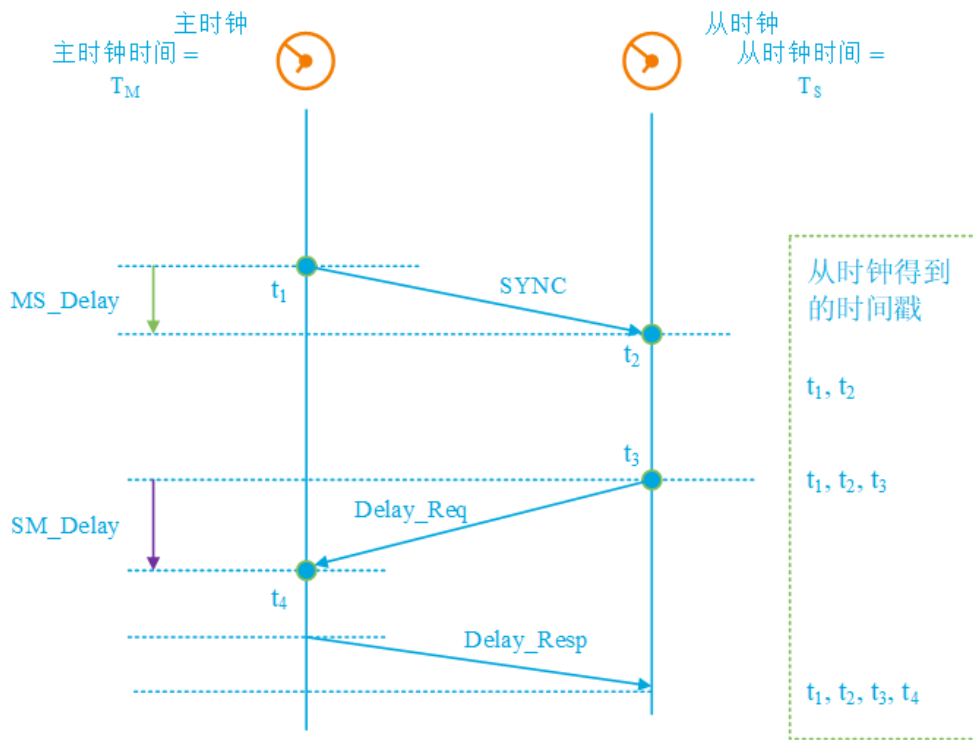


图 1.1 1588v2同步协议<sup>[14]</sup>

Fig 1.1 1588v2 synchronization protocol<sup>[14]</sup>

延时计算公式为

$$D = \frac{((t_2 - t_1) + (t_4 - t_3))}{2} \quad (1.1)$$

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。

**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。<sup>[15]</sup>

**针对1588v2的相关研究** 定时数据包中的延迟抖动（packet delay variation, PDV）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122.4  $\mu$ s。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<sup>[16],[17]</sup>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，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<sup>[18],[19]</sup>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<sup>[20],[21]</sup>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。

### 1.2.2 无线网络时钟同步

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[23]。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[24]。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。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[25]。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[26]。

针对传统的无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)中的聚类时钟同步在现实的应用问题, 文献<sup>[19]</sup>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。如果要想实现像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。

### 1.2.3 异构网络时钟同步设计

#### 1.2.3.1. 传统异构网络时钟同步研究现状

异构网络由多种不同类型的有线和无线网络组成, 时钟同步问题对于实现分布式系统协同工作具有重要意义<sup>[27]</sup>。关于异构网络的时钟同步, 有许多研究者做出了相关研究, 具体可以分为以下几个方面:

**基于网络协议的时钟同步算法** 在有线网络和无线网络之间进行时钟同步时, 研究者提出了多种改进算法, 通过优化报文传输和同步策略<sup>[28],[29]</sup>, 提高了异构网络时钟同步的准确性和稳定性, 这些研究中考考虑有线网络和无线网络的传输特性差异, 可以将时钟偏差建模为:

$$\delta t_{ij} = \alpha \cdot t_{ij}^{(w)} + (1 - \alpha) \cdot t_{ij}^{(l)} + \epsilon_{ij} \quad (1.2)$$

其中,  $\delta t_{ij}$  是节点  $i$  和节点  $j$  之间的时钟偏差,  $t_{ij}^{(w)}$  和  $t_{ij}^{(l)}$  分别表示无线网络和有线网络的时钟偏差,  $\alpha$  是权重系数,  $\epsilon_{ij}$  是测量误差。

**基于全球定位系统的时钟同步算法** 针对异构网络中有线网络和无线网络之间的时钟同步问题, 有研究者提出了基于GPS的时钟同步算法<sup>[30]</sup>。这些

研究中考考虑信号传播延时和节点硬件性能的影响，可以将节点的时钟偏差建模为：

$$\delta t_i = \beta \cdot (t_i^{(GPS)} - t_{ref}) + (1 - \beta) \cdot (t_i^{(net)} - t_{ref}) + \varepsilon_i \quad (1.3)$$

其中， $\delta t_i$  是节点  $i$  的时钟偏差， $t_i^{(GPS)}$  和  $t_i^{(net)}$  分别表示节点  $i$  从GPS和网络获得的时间信息， $t_{ref}$  是参考时间， $\beta$  是权重系数， $\varepsilon_i$  是测量误差。

**基于数据融合的时钟同步算法** 在异构网络中，有线网络和无线网络的时钟同步算法往往具有不同的同步精度和稳定性。为了充分地利用这些算法的优势，研究者提出了基于数据融合的时钟同步算法<sup>[31]</sup>。这类算法综合考虑多种时钟同步方法的结果，通过加权平均、卡尔曼滤波等数据融合技术，实现更高精度和稳定性的时钟同步。例如，卡尔曼滤波可以用于估计节点的时钟偏差：

$$\begin{cases} \hat{\delta t}_{i,k+1|k} = \hat{\delta t}_{i,k|k} + T_s \cdot \omega_{i,k}, \\ P_{i,k+1|k} = P_{i,k|k} + Q, \\ K_{i,k+1} = \frac{P_{i,k+1|k}}{P_{i,k+1|k} + R}, \\ \hat{\delta t}_{i,k+1|k+1} = \hat{\delta t}_{i,k+1|k} + K_{i,k+1} \cdot (y_{i,k+1} - \hat{\delta t}_{i,k+1|k}), \\ P_{i,k+1|k+1} = (1 - K_{i,k+1}) \cdot P_{i,k+1|k}. \end{cases} \quad (1.4)$$

其中， $\hat{\delta t}_{i,k|k}$  是节点  $i$  在时刻  $k$  的时钟偏差估计值， $T_s$  是采样时间间隔， $\omega_{i,k}$  是节点  $i$  的频率偏差， $P_{i,k|k}$  是估计误差的协方差， $Q$  是过程噪声协方差， $R$  是观测噪声协方差， $K_{i,k+1}$  是卡尔曼增益， $y_{i,k+1}$  是节点  $i$  在时刻  $k+1$  的观测值<sup>[32]</sup>。

**存在的问题** 现有的异构网络时钟同步研究在多个方面仍存在缺陷，特别是在大规模复杂异构网络环境下，这些缺陷可能会对时钟同步精度和稳定性产生较大影响。以下是几个主要缺陷：

**网络规模和复杂性：** 现有研究在大规模复杂异构网络中的适用性尚不明确。这些网络可能包括多种有线和无线通信技术，不同的传输特性和拓扑结构。大规模网络可能导致通信延迟和拥塞的增加，从而降低时钟同步

精度<sup>[33]</sup>。根据[10],[11]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,从而严重影响同步性能。此外,复杂网络环境可能会导致同步算法的收敛速度降低,增加能耗。

动态性和可扩展性:现有研究在处理网络动态变化方面仍具有局限性,如节点的加入与离开、拓扑变化、通信链路的稳定性等。这些动态变化可能导致同步过程中出现不稳定现象,从而影响时钟同步的准确性和稳定性<sup>[34]</sup>。此外,现有研究在可扩展性方面也存在一定问题,难以应对网络规模的快速增长。

安全性和鲁棒性:现有研究在时钟同步的安全性和鲁棒性方面仍有不足。恶意攻击、硬件故障和环境干扰等因素可能对时钟同步系统造成影响<sup>[35]</sup>。对于安全关键的应用场景,如智能电网、车联网等,时钟同步系统需要具备较强的抗攻击和抗干扰能力。

不同应用场景的特定需求:现有研究很难满足所有异构网络应用场景的特定需求。例如,一些应用场景可能对时钟同步精度、稳定性或能耗有较高要求,现有通用的同步方法可能无法满足这些需求<sup>[36]</sup>。

为了克服这些缺陷,未来的异构网络时钟同步研究需要在以下几个方面进行深入探讨:

- 开发针对大规模复杂异构网络的优化同步算法,以提高同步精度和稳定性。
- 设计具有动态自适应和可扩展性的同步策略,以适应网络的动态变化和规模扩展。

#### 1.2.3.2. 5G-TSN异构网络中的时钟同步问题研究现状

5G-TSN时钟同步在异构网络时钟同步中具有显著的重要性,因为它能够为各种应用场景提供更高的同步精度和更低的同步延迟。异构网络通常涉及多种不同的通信技术和设备,这些技术和设备之间的协同工作对精确的时钟同步具有至关重要的需求。5G技术作为一种先进的移动通信技术,具有高速率、低延迟、大连接数等特点,能够为实时性要求较高的应用提供良好的支持。而TSN作为一种基于以太网的时间敏感网络技术,旨在为实时和安全性要求较高的工业自动化系统提供可靠的通信基础。



结合5G和TSN技术，可以实现一种高效且可靠的时钟同步方案。这种方案能够充分利用两者的优势，例如5G的低延迟特性和TSN的确定性通信能力，从而在保证同步精度的同时降低同步延迟。同时，5G-TSN时钟同步方案还可以在多跳网络环境下有效地减小累积误差，提高同步精度，以满足工业自动化、智能交通、智能电网等领域对时钟同步的严格要求。

**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<sup>[37]</sup>。

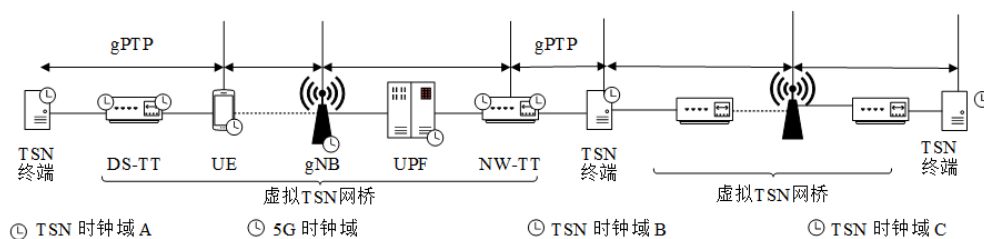


图 1.2 5G网桥  
Fig 1.2 5G bridge

**5G网络授时功能** 5G网络现有的时钟同步方案除了卫星授时外，在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<sup>[38]</sup>。

**5G广播同步** 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<sup>[39]</sup>。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 $\mu s$ 级。

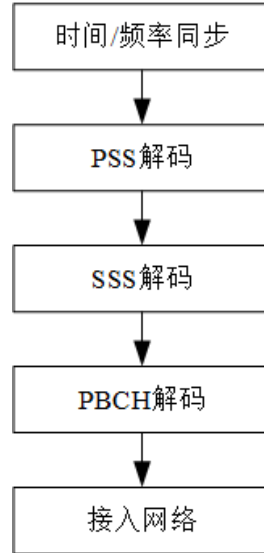


图 1.3 5G广播同步流程

Fig 1.3 5G broadcast synchronization process

**5G与TSN融合同步方案** 现有的5G协议中提供的方案为网桥方案<sup>[40]</sup>，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<sup>[41]</sup>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 [42]。研究[43]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, 研究[44]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, 显著降低了同步开销。对于 NW-TT 和 DS-TT, 有研究者[45]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[46]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。

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。

同时, 在工业控制系统中, 工业通信网络需要高可用性、高可靠性和低延时。然而, 传统的工业以太网系统是封闭的, 相互之间不兼容 (如表 1.1 所示)。为了提高实时能力, IEEE 802.1 TSN 标准被广泛认为是工业控制系统中专有技术的长期替代品。此外, 工业 4.0 和未来工厂需要以太网中的无线网络接入。尽管如此, 传统的无线网络面临着传输延迟大和距离短的问题 (如表 1.2 所示)。第五代 (5G) 移动/蜂窝技术, 旨在支持超可靠低延迟通信 (URLLC), 有望满足工业系统在无线领域的严格要求。因此, 5G 和 TSN 系统的综合运行对于实现工业网络的端到端确定性连接至关重要。文献[47]介绍了 5G-TSN 组合系统在工业现场的应用。时钟同步是 5G-TSN 集成的基础。3GPP 协议提出了一种基于 IEEE 802.1AS 的桥接器架构同步模式, 但没有明确指定具体的同步规则和算法细节[48]。之前的研究[49]分析了在同步架构中桥接器和 TSN 节点交接处可能存在的各种错误对同步算法的影响。研究[50]优化了 5G 桥内的同步数据包, 降低了通信开

表 1.1 目前主要的以太网协议  
表 1.2 The current main Ethernet protocol

协议名称	运作组织	代表厂家
EtherNet/IP	ODVA	Rockwell
PROFINET	PROFIBUS	Siemens
EtherCAT	EtherCAT Association	Bev
POWERLINK	EPSG	ABB
CC-LINK	CC-Link Association	Mitsubishi

表 1.3 目前主要的无线网协议  
表 1.4 Current main wireless network protocols

协议名称	传输延迟	传输距离
LTE	6ms	400-1000m
WIFI	6ms	100-200m
Zigbee	1-3ms	10-100m

销。另一项研究[51]引入了时钟域补偿技术，以估计5G定时消息的驻留时间。

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。同时，当前的研究仅考虑单个5G桥的最简单情况[52]，并不能满足在未来的工业和5G网络集成的智能工厂中，分布式多工业制造系统应用场景中，多个工业以太网通过5G网络协同工作(图1.4)的情况[53]。

### 1.3 本文的研究内容

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：

- 高精度同步：为了满足5G-TSN异构网络中各种设备和应用的严格时间同步要求，协同需求之一就是实现高精度的时钟同步。通过设计精确的同步算法，使得网络中的节点能够在微秒甚至纳秒级别的精度下同步时间。

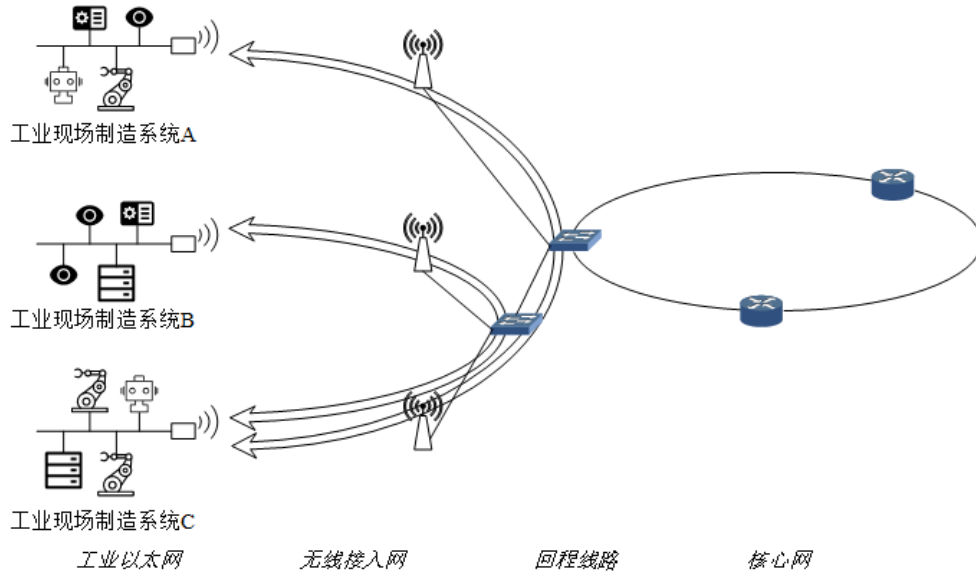


图 1.4 分布式多工业制造系统应用场景

Fig 1.4 Distributed multi-industrial manufacturing system application scenarios

- 低通信开销：考虑到5G-TSN网络的高带宽利用率和大量设备接入，降低通信开销成为另一个协同需求。这意味着需要设计高效的同步协议和算法，以减少同步过程中的数据传输量和频率，从而降低网络拥塞和能耗。
- 大规模网络适应性：由于5G-TSN网络规模庞大且设备类型复杂，协同需求还包括实现良好的大规模网络适应性。这要求同步算法能够灵活应对网络拓扑变化、设备增减和其他动态情况，确保在各种场景下都能保持稳定的同步性能。

根据现有的5G-TSN网络的同步需求，本文整理了现有的各种同步方案在各方面的性能，如表1.3所示。

从表1.3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

表 1.5 有线/无线网络同步方案性能总结

表 1.6 Performance of Wired/Wireless Network Synchronization Solution

同步方案	同步精度	通信开销	针对大规模网络的适应性
1588v2	高	大	不具备
广播同步	低	小	具备
5G网桥	低	小	不具备
改良的网桥同步	高	中	不具备

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，本文提出了一种具有有线骨干网络和多个较小无线岛的混合架构同步方案，以实现有线无线网络节点之间的多节点协同调度。该方案与现有的异构网络时钟同步方案的主要区别在于，一来无线部分应满足与有线部分相同的同步要求，二来简化无线部分同步步骤，降低无线部分的通信开销，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。本文的主要贡献如下：

- 提出了一种针对规模化有线/无线异构网络的混合时钟同步架构，引入 $NSPI$ 作为综合评估指标，并通过分层算法和修改Kruskal或Prim算法中的权重函数实现优化。实验结果显示，该混合架构在收敛速度和平均误差上有显著提高。
- 针对5G网络中多径衰落问题，设计了ADFE。实验表明，ADFE的应用使得5G-TSN网络时钟同步过程具有更快的收敛速度和更强的抗干扰性能，有效提高了同步稳定性。
- 针对工业网络中5G-TSN有线/无线融合网络，提出了SCS分配优化与时间戳补偿技术。同步算法优化降低了传输延迟，同时通过补偿时间戳降低误差的累积效应，实现了5G-TSN网络的高精度时间同步，有效解决了多网桥应用场景下的累积误差问题。

## 1.4 本章小结

本章介绍了时钟同步在分布式系统和网络中的重要性，并对有线和无线时钟同步技术的发展和进行了探讨。有线网络时钟同步方面，介绍了IEEE 802.1AS协议；无线网络时钟同步方面，介绍了各类用聚类算法。针对有线/无线异构网络时钟同步，介绍了基于网络协议、GPS以及数据融合的时钟同步算法。然而，现有研究在大规模复杂异构网络中的适用性、动态性和可扩展性、安全性和鲁棒性以及满足不同应用场景的特定需求等方面仍存在缺陷。5G和TSN技术在异构网络中的时钟同步显得至关重要，因为它为各种应用场景提供更高的同步精度和更低的同步延迟。结合两者可以实现高效且可靠的时钟同步方案。然而，实现低复杂度和高精度的跨域时钟同步仍然是一个难题。现有解决方案往往存在精度较低或计算过于复杂，同步效率较低的情况。针对有线和无线异构网络中的时钟同步问题，提出了一种以5G-TSN为核心网络的混合架构时钟同步解决方案。

## 第二章 有线/无线网络混合时钟同步架构设计

本章节将详细介绍时钟模型，时延模型，并以此进行混合同步架构的设计，以及同步方案的设计，同步方案包括，有线网络初始化，无线网络初始化，和校验更新。

### 2.1 时钟模型

工业网络的复杂性会影响设备时钟的晶体振荡器，导致初始时钟状态和变化率的偏差，造成时钟误差。因此，节点时钟表示为：

$$C_i(t) = (\alpha_i + \sigma_i)t + \beta_i + \delta_i \quad (2.1)$$

其中 $\alpha_i$ 和 $\beta_i$ 是估计的时变时钟偏移和参考时钟的恒定时钟偏移， $\sigma_i$ 和 $\delta_i$ 是频率估计和时间差的误差。理想情况下， $\alpha_i = 1$ ， $\beta_i = 0$ 。斜率的变化来自于时钟内部晶体振荡器的漂移，而初始状态的差异来自于网络初始化期间的误差。

在5G-TSN桥接结构中（如图1.2所示），5G和TSN网络运行在不同的时域。因此，对于目前5G-TSN网络的桥接结构，TSN时域的时钟模型可以表示为：

$$C_{TSN}(t) = (\alpha_{TSN} + \sigma_{TSN})t + \beta_{TSN} + \delta_{TSN} \quad (2.2)$$

类似地，5G部分的时钟模型写成：

$$C_{5G}(t) = (\alpha_{5G} + \sigma_{5G})t + \beta_{5G} + \delta_{5G} \quad (2.3)$$

其中 $\alpha_{TSN}$ 和 $\sigma_{TSN}$ 代表有线侧的频率同步校正估计值和误差， $\beta_{TSN}$ 和 $\delta_{TSN}$ 代表有线侧的时间偏差同步校正估计值和误差。同样， $\alpha_{5G}$ 和 $\sigma_{5G}$ 代表无线侧的频率同步校正估计值和误差，而 $\beta_{5G}$ 和 $\delta_{5G}$ 代表无线侧的时偏同步校正估计值和误差。

假设同步误差 $\sigma_{TSN}$ 和 $\delta_{TSN}$ 远小于5G网络的 $\sigma_{5G}$ 和 $\delta_{5G}$ 。通常情况下，5G网络的同步精度是微秒级的，而TSN网络的同步精度是纳秒级的。当只有一个网桥时，这些误差通常是可以接受的，但在网络中有多个网桥的情况下，

误差的累积会大大影响时钟同步（如图2.1所示）。这些时间戳误差通过影响时钟同步期间的延迟测量而影响同步的准确性。因此，为了减少误差，本文需要对延迟进行建模和分析。

## 2.2 时延模型

在同步过程中，节点之间的延迟是影响同步精度的重要因素。在网桥结构中，5G网桥是由所有5G无线节点中转信号组成的。因此，5G网络内部节点之间的传输延迟决定了网络桥的传输延迟，从而影响两端TSN设备的时钟同步精度。因此，延迟的模型是：

$$D = D_d + D_r \quad (2.4)$$

其中 $D_d$ 是确定性延迟，主要由可以测量或消除的传输延迟组成。 $D_r$ 是随机延迟，主要由传播延迟抖动和累积误差组成。虽然传播延迟抖动可以定期测量以减少其对同步精度的影响，但累积误差对大规模网络的时钟同步精度有很大影响。为了分析累积误差的具体影响，有必要对排队延迟进行建模。5G网络的内部同步模式如图2.1所示，5G无线节点通过接收基站的同

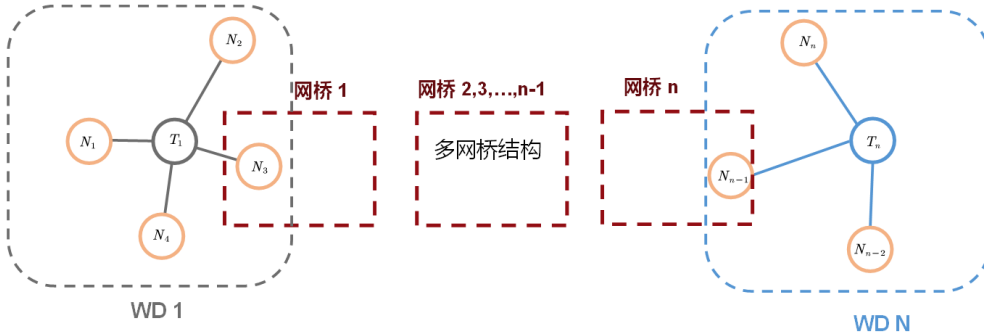


图 2.1 多网桥场景下的5G内部同步模式

Fig 2.1 5G internal synchronization mode in multi-bridge scenario

步信息进行同步。当多个节点同时与同一个基站同步时，会出现排队延迟。为了计算排队时延的预期值，首先计算由分批到达交换机的非时钟同步流量产生的队列，通过计算队列的生成函数得到队列的预期值。然后，分析背景流量存在下的时钟同步流量的队列延迟，以获得队列的预期长度。背

景流量的计算采用了非抢占式的考虑，这更符合实际情况。对非时钟同步流量队列和时钟同步流量队列都进行了建模，并利用排队理论对马尔可夫链进行建模和求解。根据马尔可夫链列出的稳态方程为：

$$\begin{aligned} p_i(\lambda + i\mu) &= \sum_{j=0}^i p_j \lambda a_{i-j} + p_{i+1}(i+1)\mu; 0 \leq i < m \\ p_i(\lambda + m\mu) &= \sum_{j=0}^i p_j \lambda a_{i-j} + p_{i+1}m\mu; m \leq i \end{aligned} \quad (2.5)$$

其中 $p_i$ 是 $i$ 数据包在队列中的概率， $m$ 是队列的最大值， $\lambda$ 是总的数据包到达率， $\mu$ 是数据包处理率， $a$ 是数据包到达数量的分布。而 $c = \mu/\lambda$ 。本文假设当 $k$ 数据包到达基站时，有 $v$ 非时钟同步的数据包。可以有三种情况：

- 1:  $v < m, k < m - v, \text{QueueLength} = 0$ 。
- 2:  $v < m, k > m - v, \text{QueueLength} = k + v - m$ 。
- 3:  $v > m, \text{QueueLength} = k$ 。

基于这三种情况，排队延迟的期望值可以通过求解马尔科夫链和用全概率公式求和来获得。

$$\begin{aligned} L_q &= P_0 \sum_{i=0}^m (k - m + i) \frac{(\lambda/\mu)^i}{i!} + P_0 \frac{k - m}{m!} \frac{\rho^m}{v!(1 - \rho^m)} \\ \rho &= \frac{\lambda}{\mu} \end{aligned} \quad (2.6)$$

根据5G协议标准3GPP TS 22.104对大规模应用场景的要求，当服务区域在10到20 $km^2$ 之间时，单个时域的同步节点的上限为100<sup>[54]</sup>。通过这些条件代入排队延迟模型，可以得到排队延迟小于250ns。鉴于所要求的同步精度为1 $\mu s$ ，随机排队延迟对同步精度的影响可以忽略不计，只有固定延迟影响同步精度。因此，本文对工业网络的时间戳补偿只关注这些条件下固定延迟对时钟同步的影响。



### 2.3 混合时钟同步架构设计

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2.4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。上层核心网络部分由5G-TSN节点组成，下层网络由各种工业以太网和无线传感器组成。上层核心网络建立高精度5G-TSN时钟同步后，架构内会选取边界节点，下层网络将作为从时钟，根据自己的同步需求与边界节点进行同步。

为了将异构网络中混乱的网络分层整合起来，本文提出了一种基于混合同步架构的同步方法。最上层主干网络是5G-TSN，中下层包括各种网络，如工业以太网、Wi-Fi、Zigbee、LoRaWAN、Bluetooth等。在整合这些网络时，需要参考前面得到的参数。为了更加具体地根据时钟稳定性、排队延迟，与当前主时钟同步误差等因素进行划分，并设计一个综合指标来评估不同区域网络属于哪个层级。这样，本文可以更精确地将具有相似特性的网络划分到同一层级，以便采用合适的同步策略和优化方法。针对这个需求，本文可以引入 $NSPI$ 作为综合评估指标。

$NSPI$  可以综合考虑时钟稳定性、排队延迟，并为每个区域网络分配一个 $NSPI$ 值，再设置一个变量 $D_k$ 用来表示第 $k$ 次分层算法迭代时该层所有节点到主时钟的同步误差之和。本文可以根据 $NSPI$ 值的范围来确定网络属于哪个层级，并通过不断迭代 $D_k$ 搜索最适合该层级的主时钟。例如，设定不同层级对应的 $NSPI$ 值范围如下：

- m1层级： $NSPI$ 值在A1-A2范围内
- m2层级： $NSPI$ 值在B1-B2范围内
- ...
- mn层级： $NSPI$ 值在Z1-Z2范围内

根据本文的分层目的，本文希望确保网络能够根据同步精度需求以及各自的性能特点井然有序地进行时钟同步。为了避免低精度要求但性能较差的网络被分到高层级，本文可以对 $NSPI$ 值计算公式进行进一步改进。可

以考虑将 $SPW$ 因子用于调整各项参数的权重，而不是直接乘以 $NSPI$ 值。新的 $NSPI$ 值计算公式如下：

$$NSPI = (W_1 * SPW * \delta) + (W_2 * (1 - SPW) * (n * \beta * (1 + p) / \mu)) \quad (2.7)$$

这里，当 $SPW$ 越接近1时， $\delta$ 项（时钟稳定性）的权重增加，而排队延迟项 $(n * \beta * (1 + p) / \mu)$ 的权重减小。这样，具有高同步精度需求的网络将更加注重时钟稳定性。相反，当 $SPW$ 越接近0时，排队延迟项的权重增加，而时钟稳定性项的权重减小。这样，具有低同步精度需求的网络将更加注重处理能力和网络规模。通过调整 $SPW$ 的值，本文可以确保网络根据其同步精度需求和性能特点进行分层，从而实现复杂异构网络的井然有序时钟同步。在实际应用中，可以根据不同网络的同步精度需求和性能特点，对混合同步架构进行进一步优化。分层过程如图2.2所示：

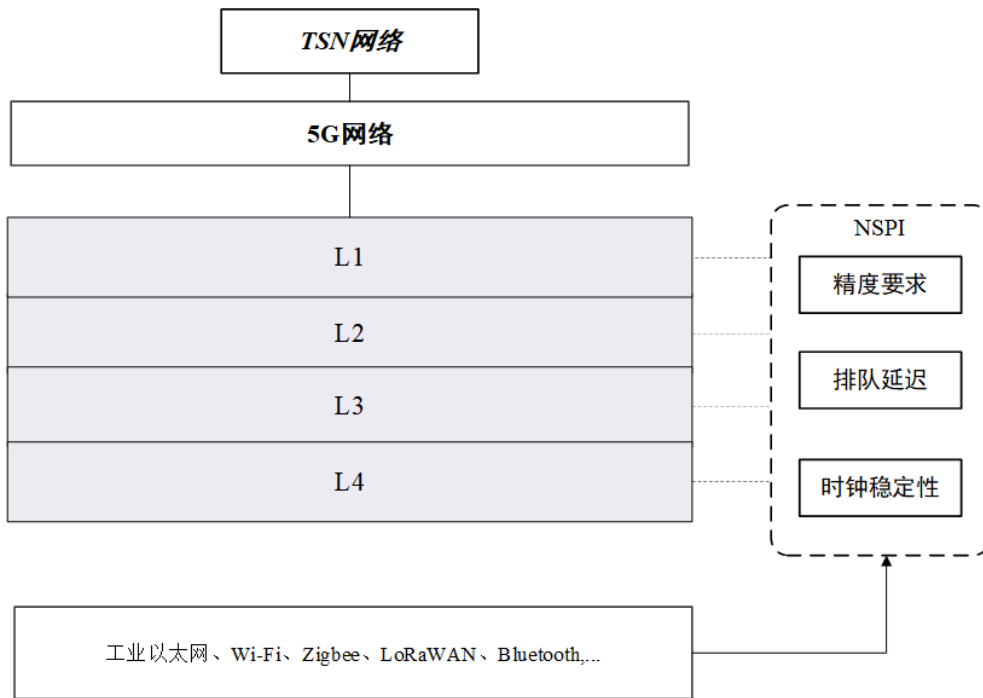


图 2.2 混合架构分层过程  
Fig 2.2 Hybrid architecture layering process

另外在分层过程中，需要注意不能改变原有网络拓扑结构中的连接关系，分层的本质是通过链路选择来使得每一层的网络能选择最优的同步对

象。整体分层算法如算法1所示，下面将详细阐述分层算法的流程：

---

**Algorithm 1** 同步分层算法

---

- 1: 输入：有向图  $G = (V, E)$
  - 2: 输出：分层后的网络拓扑
  - 3: **预处理** 对图  $G = (V, E)$  进行预处理
  - 4: **构建最小生成树** 使用 Kruskal 或 Prim 算法构建最小生成树
  - 5: **分层** 对最小生成树进行深度优先搜索（DFS）或广度优先搜索（BFS）以分层
  - 6: 初始化  $D_k = \infty$
  - 7: **while**  $D_k \geq D_T$  **do**
  - 8:   **分析与优化** 计算  $D_k$ ，优化分层结构
  - 9: **end while**
  - 10: 返回分层后的网络拓扑
- 

本文可以将问题建模为一个有向图  $G = (V, E)$ ，其中  $V$  表示网络节点集合， $E$  表示节点之间的连接，然后采用下述方法进行：

**预处理** 对图  $G = (V, E)$  进行预处理，其中  $V$  是节点集合， $E$  是边集合。本文将同步性能指标（例如，传播延迟  $d$ 、抖动  $j$  等）作为边的权重。对于边  $(u, v) \in E$ ，本文可以定义权重函数  $w(u, v) = \alpha d(u, v) + \beta j(u, v)$ ，其中  $\alpha$  和  $\beta$  是权重系数。

**构建最小生成树** 使用 Kruskal 或 Prim 算法从顶层 TSN 节点开始构建一个最小生成树。假设  $V_T \subseteq V$  是顶层 TSN 节点集合，本文可以从任意顶层节点  $r \in V_T$  开始构建最小生成树。对于 Kruskal 算法，本文需要对所有边按权重排序，即对于任意边  $(u, v), (u', v') \in E$ ，有  $w(u, v) \leq w(u', v')$ 。然后，从最小权重边开始，依次添加边到生成树中，直到所有节点都被连接。在添加边的过程中，本文需要确保不会产生环。对于 Prim 算法，本文从根节点  $r$  开始，每次添加距离当前生成树最近的边，直到所有节点都被连接。

**分层** 从最小生成树的根（即顶层 TSN 节点）开始，进行深度优先搜索（DFS）或广度优先搜索（BFS）。在遍历过程中，根据节点在树中的深度和  $NSPI$  值为其分配层级。设  $L(v)$  是节点  $v$  的层级，则有  $L(r) = 1$ 。对于节点  $u$  的邻接节点  $v$ ，有  $L(v) = L(u) + 1$ 。

**分析与优化** 根据生成的最小生成树和分层信息，分析网络的同步性能。本文可以计算各层的平均同步延迟  $\bar{d}$  和抖动  $\bar{j}$ ，通过  $\bar{d}$  和  $\bar{j}$  得到该层级第  $k$  次分层算法迭代的同步误差之和  $D_k$ ：

$$\begin{cases} \bar{d} = \frac{1}{|E'|} \sum_{(u,v) \in E'} d(u,v), \\ \bar{j} = \frac{1}{|E'|} \sum_{(u,v) \in E'} j(u,v) D_k = w_1 \bar{d} + w_2 \bar{j} \end{cases} \quad (2.8)$$

其中  $E'$  是最小生成树的边集合。如果  $D_k$  不满足同步精度要求，则再次迭代，进一步优化分层结构，例如调整阈值  $T$  或添加额外的约束条件，通过修改权重函数  $w(u,v)$  和调整搜索过程来实现。

通过这种方法，本文可以在满足同步精度要求的情况下，将原始的拓扑结构分层，使得每个节点只能通过一条路径向上同步到合适的层级，从而减少同步过程中的混乱。详细分析如下：本文假设本文有一个网络拓扑图  $G(V,E)$ ，其中  $V$  表示节点集合， $E$  表示边集合。本文定义出错概率  $P(e)$  为一条边  $e$  的出错概率。为简化问题，本文假设所有边的出错概率相同，即  $P(e) = p (0 < p < 1)$ 。

令  $d(u,v)$  表示节点  $u$  和  $v$  之间的最短路径长度。在网络同步过程中，信息沿着边从一个节点传播到另一个节点。给定一条从节点  $u$  到节点  $v$  的路径  $P(u,v)$ ，本文可以计算这条路径的可靠性  $R(P(u,v))$ 。如果路径  $P(u,v)$  包含  $k$  条边，则  $R(P(u,v))$  表示  $k$  条边都没有出错的概率，即：

$$R(P(u,v)) = (1-p)^{d(u,v)} \quad (2.9)$$

在分层结构中，节点之间的同步路径被限制在相邻层次之间。设分层后的网络拓扑为  $G'(V,E')$ 。本文定义两个网络的可靠性分别为：

$$R(G) = \sum_{u,v \in V} R(P(u,v)) \quad (2.10)$$

$$R(G') = \sum_{u,v \in V} R(P'(u,v)) \quad (2.11)$$

本文的目标是证明  $R(G') \geq R(G)$ 。为了简化问题，本文可以考虑节点

对 $(u, v)$ 之间的可靠性差异 $\Delta R(u, v) = R(P'(u, v)) - R(P(u, v))$ 。如果对于所有节点对 $(u, v)$ ，本文都有 $\Delta R(u, v) \geq 0$ ，那么本文就可以得出结论 $R(G') \geq R(G)$ 。

$$\Delta R(u, v) = (1 - p)^{d'(u, v)} - (1 - p)^{d(u, v)} \quad (2.12)$$

其中， $d'(u, v)$ 表示分层后节点 $u$ 和 $v$ 之间的最短路径长度。

由于分层结构限制了同步路径仅在相邻层次之间，本文可以推测 $d'(u, v) \leq d(u, v)$ 。如果这一推测成立，那么对于所有节点对 $(u, v)$ ，本文有：

$$\Delta R(u, v) = (1 - p)^{d'(u, v)} - (1 - p)^{d(u, v)} \geq 0 \quad (2.13)$$

从而可以证明 $R(G') \geq R(G)$ 。总之，分层后的网络结构有以下优势：

- 提高同步效率：在分层结构中，每个节点都有明确的同步路径，可以减少同步过程中的冗余和冲突，提高同步效率。
- 降低同步延迟和抖动：分层结构可以使得每个节点在同步过程中遵循最短路径，从而降低总体的同步延迟和抖动。
- 易于管理和优化：分层结构使得网络变得更加清晰和简洁，便于分析和优化网络性能。例如，本文可以针对不同层级的节点采取不同的同步策略，以适应不同场景和需求。

总之，通过引入图论和搜索算法，本文可以将原始的网络拓扑分层，使得每个节点在同步过程中遵循唯一路径，从而提高同步效率和降低同步延迟与抖动。这种方法可以广泛应用于具有多个节点和复杂连接关系的网络系统，为实现高效、稳定的网络同步提供了一种有效的解决方案。

在完成分层后，网络结构将会如图2.4所示。此时网络可以分为上层的核心网络与下层的其他网络。上层的核心网络中为5G网络与TSN网络，下层网络内部将根据规则氛围若干层级，按照低层级向高层级的规则进行同步。同步周期可以如图2.3所示：

如图2.3所示，每个层级之间的一个工作周期周期包括同步周期与一个校验更新周期。在同步周期内下层将会与上层进行时间戳交互并完成参数计算。由于下层网络与上层网络非对称同步的特性，尤其是对于下层中的

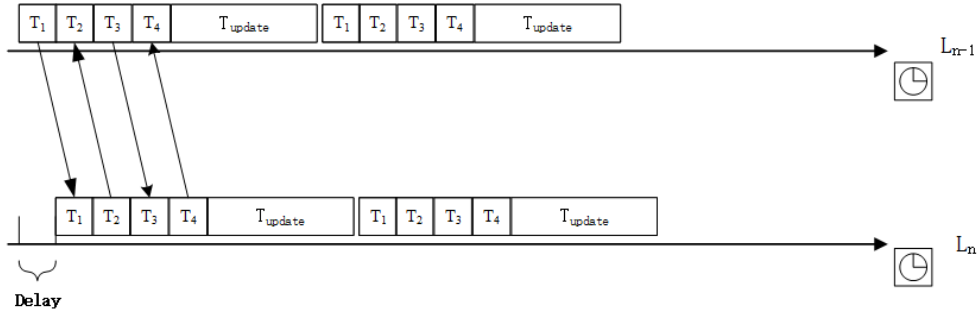


图 2.3 混合同步架构同步周期

Fig 2.3 Hybrid Synchronization Architecture Synchronization Period

无线传感器网络，其节点对于时间戳计算中涉及到的浮点数计算精度不足，因此在同步过程中，涉及到边界补偿的时间戳的计算都将在核心网络进行，然后通过下行链路传输到下层网络，可以有效利用核心网络中TSN节点的计算资源，提高同步效率，同时也是为了提升整个异构网络的同步精度。而在校验更新周期内网络将对拓扑结构，时钟参数进行校验，以防止外界因素影响时钟同步精度。该架构将基于工业以太网网络的不同岛屿区域制定为相应的时域模型。5G网络作为这些有线岛屿之间的桥梁。在3GPP中，在集成的5G和TSN系统中考虑了两个主要的时钟模型用于时间同步，这两个模型都符合IEEE 802.1 AS标准。这些模型包括边界时钟和透明时钟[55]。

在边界时钟中，5G无线接入网（RAN）可以直接访问TSN主时钟，通过自己的信令和程序向用户设备（UE）提供定时信息。UE根据周期性信息来同步TSN设备。相比之下，透明时钟解决方案通过交换PTP信息实现时间同步。在TSN主控台和TSN设备之间的任何中间5G或TSN实体将通过实体中的新PTP消息更新时间。

5G网络作为透明时钟，而有线网络作为边界节点。5G RAN可以直接访问TSN主时间，可以通过直接连接TSN主时钟或通过支持PTP的底层传输网络，这可以减少5G网络中TSN时间戳的传输开销。

为了满足假设和通信协议，每个网桥的无线节点数量不应超过100。当节点数量超过这个数字时，将建立一个新的边界节点来分割网络桥。图2.4显示了整体架构图。

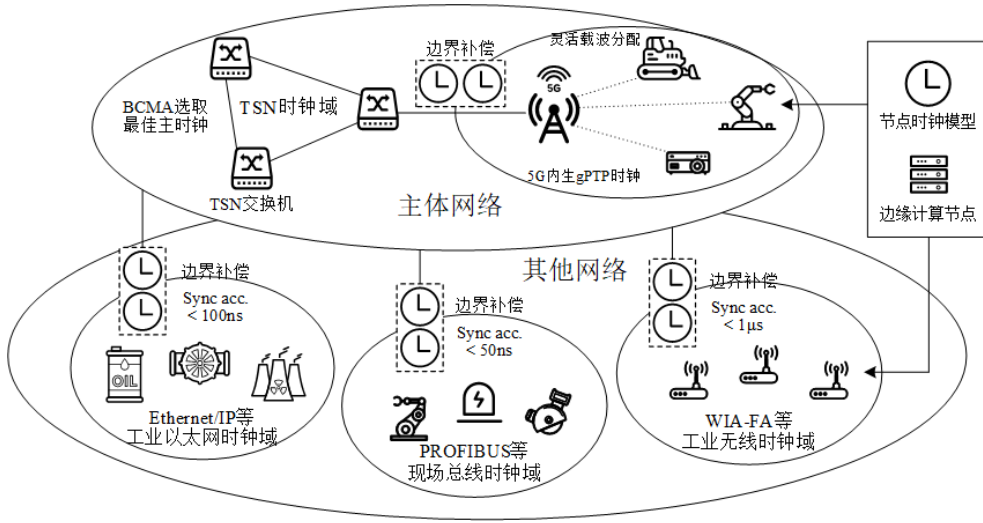


图 2.4 混合同步架构  
Fig 2.4 Hybrid Synchronization Architecture

## 2.4 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，每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。

### 2.4.1 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定义了两类的时间感知系统(TAS)，它们是时间感知终端站(TAE)和时间感知桥(TAB)。TAS可以是附属实体或主实体。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)内所有附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(1.1)的IEEE 1588v2协议中的方式进行计算：

$$D = \frac{((t_2 - t_1) + (t_4 - t_3))}{2} \quad (2.14)$$

#### 2.4.2 无线部分初始化同步

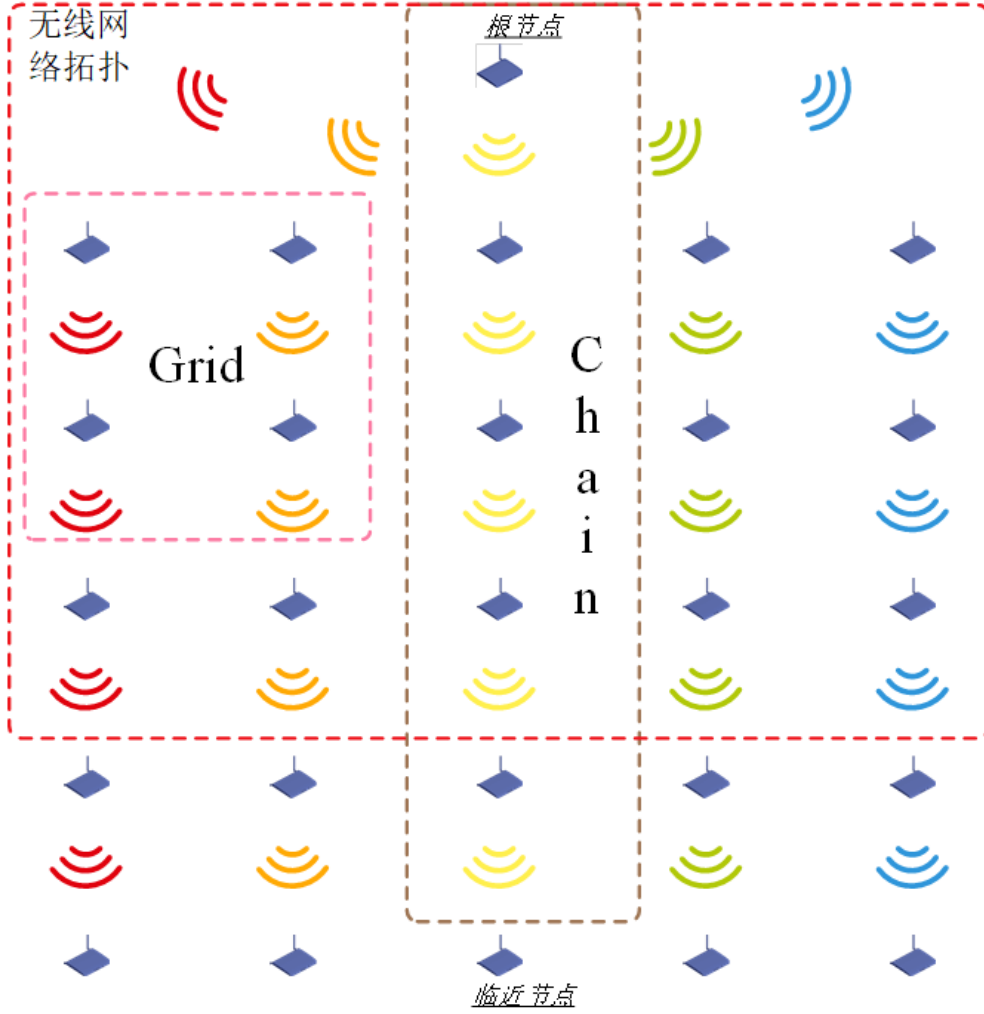
为了实现有线部分的同步，本文采用了gPTP同步方案，因此混合架构中的无线网络部分可以视为gPTP中的一个单独的时域存在，而基站则作为其GM而存在，广播同步则完成了无线部分的同步。当时间戳通过透明时钟时，5G网桥内的同步精度会影响时间计算的精度。为了同步5G-TSN网桥内的多跳大规模无线网络节点的时钟，本文首先需要确定每个节点的层次结构，这也是定位每个无线节点的基础。

根节点以 $k = 0$ 的计数发起同步消息，接收节点将计数设为 $k + 1$ ，并将包含 $k + 1$ 的广播同步消息发送到下一级，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，如图2.5所示。

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。为了在保持同步精度的同时最大限度地减少能耗和降低计算复杂度，本文针对TSN+5G网络的非对称网络时钟同步特性，采用了反同步的机制[56]。时间戳转换涉及浮点除法，由于TSN拥有更多的计算资源，所以需要在TSN端进行。

具体来说，5G节点会定期向两端的边缘节点的TSN开关发起同步请求消息。从属时钟通过几个中间时钟接收来自主时钟的参考时间戳 $G$ ，并记录本地时间 $L$ ，然后将其发送给TSN节点。TSN节点执行一个线性回归过程，通过交换几个时间戳来估计频率差和时钟偏差。中间转发节点被视为一个透明的时钟。无线部分整体的初始化阶段的同步算法2所示。



图 2.5 广播同步<sup>[57]</sup>Fig 2.5 Broadcast Synchronization<sup>[57]</sup>

最后，每个无线节点的校正时间被建模为：

$$\hat{L} = L \left( 1 + \frac{\hat{\alpha}}{f_0} \right) - \hat{\beta} + \left[ \frac{G_0 - L_0}{T_c} \right] T_c \quad (2.15)$$

其中 $\hat{\alpha}$ 代表频率差的估计， $\hat{\beta}$ 是时钟偏差的估计。 $\left[ \frac{G_0 - L_0}{T_c} \right] T_c$ 这一项表示从5G网络节点到TSN节点的传输延迟， $T_c$ 是5G网络的时隙，是5G-TSN时钟同步期间通过估计传输延迟可以达到的精度上限。这构成了后续同步精度优化方案的基础。

**Algorithm 2** 无线网络初始化阶段的时钟同步流程

---

**Require:** GM发送的时间戳,  $T_m^1$  and  $T_m^2, \dots, T_m^n$ ; 本地节点S记录的时间戳,  $T_s^1$  and  $T_s^2, \dots, T_s^n$ ; 中央控制系统(CNC)下发的同步精度需求,  $prec$ ;

**Ensure:** 本地的修正时间,  $L'$ ;

```

1: while  $time \in T_{begin}$  do
2:   while  $time = nt_{slot}, n = 1, 2 \dots$  do
3:     if  $prec \geq 500ns$  then
4:       GM 和无线从节点交换信息, 从节点得到  $T_s^1$  和  $T_s^2$ ;
5:       S 计算修正量  $\Delta = [(T_s^1 - T_m^1) - (T_m^2 - T_s^2)]/2$ ;
6:     else
7:       GM 和无线从节点交换信息, 从节点得到  $T_m^1$  and  $T_m^2, \dots, T_m^n$ , 通过
       本地线性回归得到偏差和频率的估计值  $\sigma$  和  $\omega$ 
8:       S 计算修正量  $\hat{L} = L(1 + \frac{\hat{\omega}}{f_0}) - \hat{\beta} + [\frac{G_0 - L_0}{T_{slot}}]T_{slot}$ 
9:     end if
10:    S 将层级和修正量参数返回至CNC, 等待下一步操作;
11:  end while
12: end while
13: return  $T'_{SM}$ .

```

---

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。

### 2.4.3 校验更新

在完成累积误差补偿后, 混合架构已经完成了有线部分和无线部分的分时域同步。在初始化同步阶段之后, CNC确定了网络拓扑结构以及各节点的层级。然而, 工业现场中可能出现的设备节点变动, 使得网络拓扑可能随时改变。因此, 混合架构需要定期对网络参数进行更新和校验。更新校验的整体算法如算法3所示。首先, 进行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无需进行更新, 因为网络拓展没有破坏它们原有的主从关系链。原有的网络拓扑同步规则将保留, 以节省传输资源。

**Algorithm 3** 校验更新算法**Require:** 原有网络拓扑, 网络参数, 节点信息**Ensure:** 更新后的网络参数

- 1: 初始化新增局域网络
- 2: **for** 每个新增节点  $j$  **do**
- 3:   选择最近的无线节点作为局域主时钟
- 4:   采A用同步优化规则对节点  $j$  进行同步
- 5: **end for**
- 6: 计算中间结果  $M_{ij} = \{(\Delta f_{ij}, \Delta t_{ij})\}$
- 7: **for** 每个需要进行全局校验的节点  $j$  **do**
- 8:   更新频偏:  $f_j^{new} = f_j + \sum_i \Delta f_{ij}$
- 9:   更新时偏:  $t_j^{new} = t_j + \sum_i \Delta t_{ij}$
- 10: **end for**
- 11: 返回更新后的网络参数

对于新增的网络节点, 本文需要更新其本地校验。设新增的无线终端节点集合为  $N_{new}$ , 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, 与就近的无线节点  $n_i$  进行同步。设对接的无线节点  $n_i$  为之前混合架构中的高精度有线主时钟, 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。

接下来进行全局校验的生成。设节点  $n_j$  的频偏和时偏估计值为  $f_j$  和  $t_j$ 。当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 (例如,  $|f_j - f_i| > \epsilon_f$  或  $|t_j - t_i| > \epsilon_t$ , 其中  $\epsilon_f$  和  $\epsilon_t$  是给定的阈值), 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。

全局校验更新需要从其他节点中获取数据, 会产生较大的传输开销。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, 生成一些中间结果  $M_{ij}$ , 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。

具体而言, 中间结果  $M_{ij}$  可以通过在局部范围内计算频偏和时偏的累

积变化而生成。对于每个节点  $n_i$ ，本文可以计算其与邻近节点  $n_j$  的频偏和时偏变化  $\Delta f_{ij}$  和  $\Delta t_{ij}$ 。在这种情况下，中间结果  $M_{ij}$  可以表示为：

$$M_{ij} = \{(\Delta f_{ij}, \Delta t_{ij})\} \quad (2.16)$$

当需要进行全局校验更新时，只需将  $M_{ij}$  传输至出现同步问题的节点  $n_j$ 。节点  $n_j$  可以使用这些中间结果来计算新的频偏和时偏估计值：

$$\begin{cases} f_j^{new} = f_j + \sum_i \Delta f_{ij}, \\ t_j^{new} = t_j + \sum_i \Delta t_{ij} \end{cases} \quad (2.17)$$

## 2.5 混合架构时钟同步评估指标

在混合时钟同步完成后，需要对同步效果进行评估，以便根据结果修改同步策略。在异构网络时钟同步领域，主要关注以下几个评价指标<sup>[58]</sup>：

**同步精度** 指网络节点之间的时钟偏差，通常使用均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)来度量，定义为：

$$D_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\delta t_i - \delta t_{ref})^2} \quad (2.18)$$

其中， $N$  是网络节点数量， $\delta t_i$  是节点  $i$  的时钟偏差， $\delta t_{ref}$  是参考时钟偏差。

**同步稳定性** 指网络节点时钟偏差随时间的变化情况，主要反映时钟同步系统的抗干扰能力。通常使用最大时间间隔误差 (Maximum Time Interval Error, MTIE) 来度量，定义为：

$$T_{MTIE}(\tau) = \max_{0 \leq t \leq T-\tau} \left\{ \max_{t \leq t' \leq t+\tau} \delta t_{t'} - \min_{t \leq t' \leq t+\tau} \delta t_{t'} \right\} \quad (2.19)$$

其中， $\tau$  是观察时间间隔， $T$  是总观察时间， $\delta t_{t'}$  是时刻  $t'$  的时钟偏差。

**收敛速度** 指网络节点时钟同步过程中，达到稳定状态所需的时间，通常使用同步迭代次数来度量。设第  $k$  次迭代后的同步误差为  $E_k$ ，同步误差的收敛速度可以定义为：

$$v_{\text{Convergence}} = \min \{k \in \mathbb{N} : |E_k - E_{k-1}| < \varepsilon\} \quad (2.20)$$

其中， $\varepsilon$  是给定的收敛阈值。

**能耗** 指时钟同步过程中消耗的能源，主要关注无线网络节点的通信和计算能耗。能耗可以定义为：

$$E_{\text{total}} = E_{\text{comm}} + E_{\text{comp}} \quad (2.21)$$

其中， $E_{\text{comm}}$  和  $E_{\text{comp}}$  分别表示通信能耗和计算能耗。

## 2.6 性能优化方法

为了提高异构网络时钟同步的性能，研究者提出了多种优化方法：

- **优化报文传输策略**：通过调整报文传输的时间间隔、优先级等参数，降低网络拥塞和延时波动对时钟同步的影响<sup>[59]</sup>。例如，可以使用分散优先级的报文传输策略，将报文按照优先级划分为不同的队列，优先传输高优先级的报文，从而降低时钟同步误差。
- **自适应同步算法**：根据网络状况和节点性能动态调整同步策略，提高同步精度和稳定性<sup>[60]</sup>。例如，可以设计一个自适应权重系数的同步算法，通过实时监测网络负载和节点状态，动态调整有线网络和无线网络时钟同步结果的权重，实现更高精度的时钟同步。

$$\alpha_{k+1} = \alpha_k + \gamma \cdot \frac{\partial D_{\text{RMSE}}}{\partial \alpha}(\delta t_{ij}^{(w)}, \delta t_{ij}^{(l)}, \alpha_k) \quad (2.22)$$

其中， $\alpha_{k+1}$  和  $\alpha_k$  分别表示第  $k+1$  次和第  $k$  次迭代的权重系数， $\gamma$  是学习率， $\frac{\partial D_{\text{RMSE}}}{\partial \alpha}$  是关于权重系数的同步误差梯度。

- 优化时钟同步过程中的能源消耗：为了降低能耗，可以采取调整报文传输策略、减少计算量等措施<sup>[61]</sup>。例如，在无线网络节点中，可以根据节点的剩余能量动态调整时钟同步的频率，降低能耗。
- 针对不同应用场景的定制化同步策略：根据异构网络中不同应用场景的特点，设计针对性的时钟同步解决方案，提高同步性能和实用性。例如，在工业物联网场景中，可以利用工业控制器提供的确定性通信机制，实现高精度和低延时的时钟同步<sup>[62]</sup>。

## 2.7 分层算法仿真

首先需要对第二章提出的混合架构分层算法进行仿真，在这一小节中，本文着重介绍了混合架构中的分层算法，并进行了相应的仿真实验来验证其有效性。该分层算法将问题建模为有向图，并采用预处理方法对图进行处理，实现了有序的时钟同步。通过对比实验说明分层算法在时钟同步性能方面的作用。

具体地，本文进行了同步效率、收敛速度和同步精度的评估。同步效率指网络中节点之间的同步延迟和抖动，通过降低抖动可以有效提高网络的整体同步效率。收敛速度方面，越快的收敛速度意味着分层算法能够更快地将网络中节点的时钟同步到稳定状态。同步精度方面，本文对比了分层前后的同步精度。

先通过一个简单的实例来说明原理，再进行大规模复杂网络的仿真实验。实例分层前拓扑如图2.6所示。

在这个实例中，本文为每个参数赋予具体的数值。例如，本文可以假设以下参数值：

- 时钟偏差 ( $\Delta T$ ) 和频率偏差 ( $\Delta f$ ):
  1. 节点A:  $\Delta T_A = 1\text{ns}$ ,  $\Delta f_A = 0.1\text{ppm}$
  2. 节点B:  $\Delta T_B = 2\text{ns}$ ,  $\Delta f_B = 0.2\text{ppm}$
  3. 节点C:  $\Delta T_C = 3\text{ns}$ ,  $\Delta f_C = 0.15\text{ppm}$
- 确定性延迟 ( $L_{ij}^D$ ) 和随机延迟 ( $L_{ij}^R$ ):

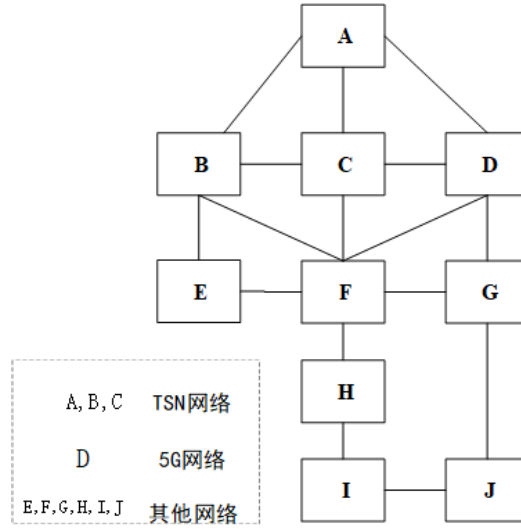


图 2.6 分层前的网络拓扑  
Fig 2.6 Network topology before layering

1. 连接AB:  $L_{AB}^D = 10\text{ns}, L_{AB}^R = 2\text{ns}$
  2. 连接AC:  $L_{AC}^D = 15\text{ns}, L_{AC}^R = 3\text{ns}$
  3. 连接BC:  $L_{BC}^D = 12\text{ns}, L_{BC}^R = 2.5\text{ns}$
  4. 连接AD:  $L_{AD}^D = 20\text{ns}, L_{AD}^R = 4\text{ns}$
- 到达率 ( $\lambda_D$ ) 和排队等待时间 ( $W_D$ ):
    1. 节点D:  $\lambda_D = 100\text{packets/s}, W_D = 1\text{ms}$
  - 同步误差 ( $E_{ij}$ ):
    1. 节点A和E之间:  $E_{AE} = 5\text{ns}$
    2. 节点A和F之间:  $E_{AF} = 7\text{ns}$
    3. 节点B和G之间:  $E_{BG} = 6\text{ns}$
  - NSPI的权重:
    1.  $W1 = 0.4$
    2.  $W2 = 0.3$

3.  $W3 = 0.3$ 

根据这些参数值，本文可以计算出每个节点的 $NSPI$ 值，并进行分层，对于大规模网络，分层的本质就是一种聚类算法，具体的步骤如下：构建时钟模型：为顶层TSN节点A、B、C，5G节点D，以及其他网络节点E、F、G、H、I、J构建综合时钟模型。对于每个节点，本文需要考虑其时钟偏差（ $\Delta T$ ）和频率偏差（ $\Delta f$ ）。例如，节点A的时钟模型可以表示为 $T_A(t) = t + \Delta T_A + \Delta f_A \cdot t$ 。

延迟建模与分析：为每对相邻节点之间的连接分析确定性延迟和随机延迟。例如，为连接AB、AC、BC、AD、BD、CD、DE、DF、DG等建立延迟模型。本文可以使用公式 $L_{ij} = L_{ij}^D + L_{ij}^R$ 表示节点i和j之间的总延迟，其中 $L_{ij}^D$ 表示确定性延迟， $L_{ij}^R$ 表示随机延迟。

排队延迟计算：对于5G节点D，本文可以使用Little公式计算其与其他节点（如E、F、G）同步时产生的排队延迟。设 $N_D$ 为节点D的排队长度， $\lambda_D$ 为到达率， $W_D$ 为排队等待时间，则有 $N_D = \lambda_D \cdot W_D$ 。

评估同步误差：在这个拓扑中，本文需要分析从顶层TSN节点A、B、C到底层节点I、J的累积同步误差。设 $E_{ij}$ 为节点i和j之间的同步误差，则同步误差可表示为 $E_{total} = \sum_{i,j} E_{ij}$ 。

混合同步架构的建立与优化：根据 $NSPI$ 的计算结果，本文可以确定每个节点所属的层级。使用公式2.7计算每个节点的 $NSPI$ 值。分层后的拓扑结构如图2.7所示，该算法在不改变原有拓扑连接的基础实现了网络分层，即A、B、C、D为第一层，共同构成核心网，E、F、G为第二层，H、I、J为第三层。



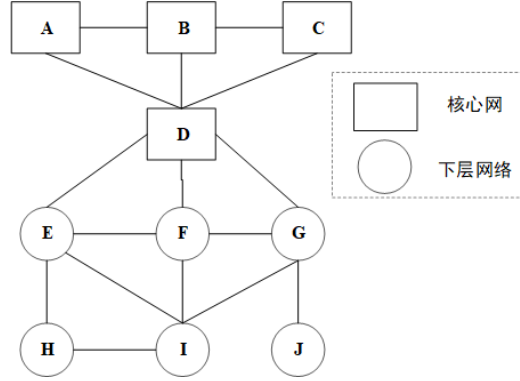


图 2.7 分层后的网络拓扑  
Fig 2.7 Network topology after layering

再完成简单实例后，将会对大规模复制网络节点进行分层仿真，为了说明大规模网络中的分层算法效果，本文针对以下参数进行仿真设置

1. 节点数量： $N = 10000$
2. 空间范围： $X = [0, 100], Y = [0, 100], Z = [0, 100]$
3. 层级数量： $L = 4$
4. 分层算法：分层算法采用的是本文前面提到的基于聚类的方法，即对 $(x, y, z)$ 坐标进行聚类分析，将节点划分到不同的层次。
5. 路径选择概率：在分层前，每个节点从所有其他节点中随机选择一个节点进行通信，因此路径选择概率为 $\frac{1}{N-1}$ 。分层后，节点只与同一层内的其他节点通信，假设每层的节点数量为 $N_i$ ，则路径选择概率为 $\frac{1}{N_i-1}$ 。
6. 网络冲突参数：在分层前，本文可以计算整个网络的平均路径选择概率为 $P_{\text{avg}} = \frac{1}{N-1}$ 。因此，任意两个节点之间的通信路径重合的概率为 $P_{\text{overlap}} = P_{\text{avg}}^2$ 。分层后，不同层之间的通信路径不会重合，因此可以降低网络冲突。
7. 时延参数：在分层前，本文可以假设所有节点之间的通信时延为均匀分布的随机变量，其范围为 $[T_{\min}, T_{\max}]$ 。分层后，由于节点之间的

通信距离减小, 本文可以假设通信时延的范围缩小为 $[T'_{\min}, T'_{\max}]$ , 其中 $T'_{\min} \geq T_{\min}, T'_{\max} \leq T_{\max}$ 。

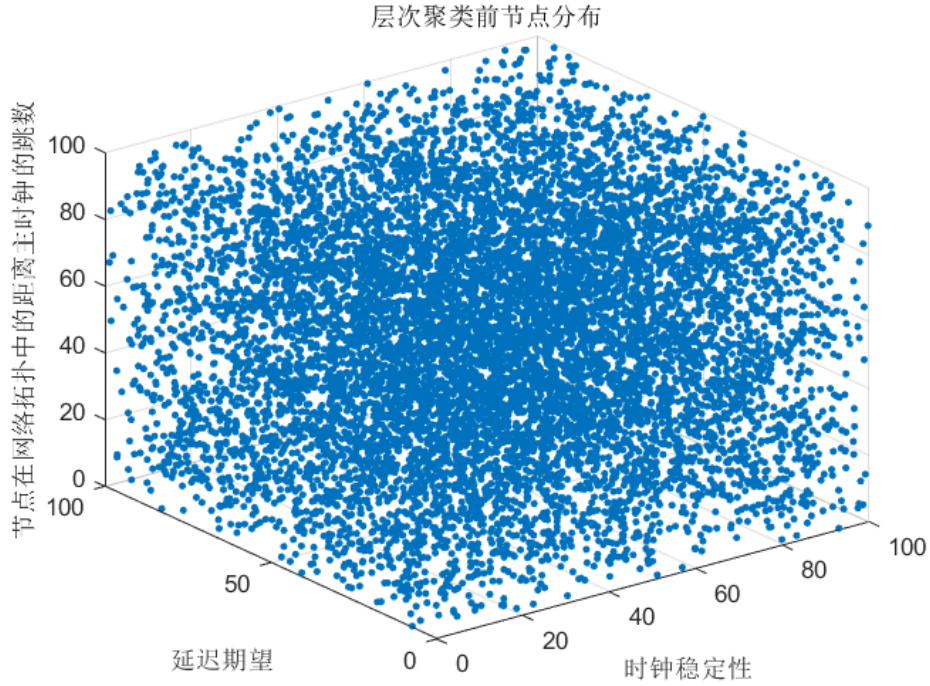


图 2.8 大规模网络分层前分布图

Fig 2.8 Distribution of large-scale network before layering

图2.8展示了分层前的节点分布示意图。在这个图中, x轴、y轴和z轴分别代表了节点三个关键属性: 时钟稳定性 (Clock Stability, CS)、延迟期望 (Latency Expectation, LE) 以及节点在网络拓扑中的距离主时钟的跳数 (Synchronization Hierarchy Level, SHL)。时钟稳定性和延迟期望是衡量节点时钟性能的两个重要指标, 它们对于同步系统的准确性和稳定性至关重要。

为了对节点进行评估并进行适当的分层, 首先需要计算每个节点的 $NSPI$ 。 $NSPI$ 是一个综合指标, 它综合考虑了时钟稳定性和延迟期望, 以便对节点的同步性能进行量化评估。通过计算每个节点的 $NSPI$ 值, 可以在同步系统对节点进行排序, 从而确定节点在分层拓扑中的相对位置。

在确定了节点的 $NSPI$ 值后，接下来需要采用一种分层聚类算法来对节点进行分层。分层聚类算法的目标是将具有相似性能（即具有相近 $NSPI$ 值）的节点聚集到同一层级上。在执行此过程时，算法应尽量保证累计误差最小化，以确保同步系统的准确性和稳定性。

图2.9为本文提供了一个关于节点分布的直观表示，通过对节点时钟稳定性、延迟期望以及在拓扑中的位置进行量化分析，本文可以使用 $NSPI$ 值和分层聚类算法来对节点进行分层，从而实现同步系统的优化。在优化过程中，需要充分考虑最小化累计误差的约束，以确保整个同步系统具有高度的准确性和稳定性。。

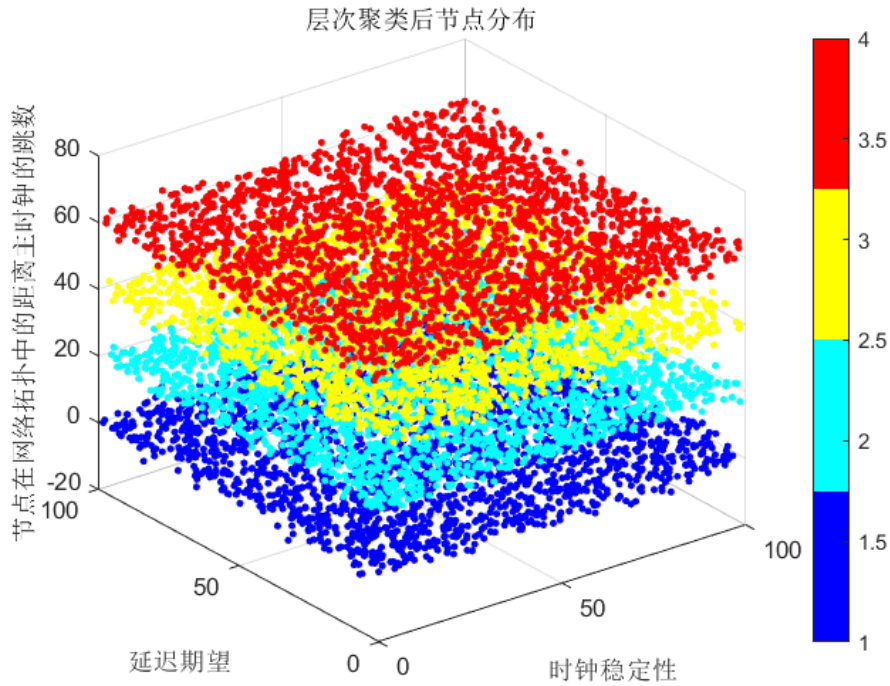


图 2.9 大规模网络分层后分布图

Fig 2.9 Distribution of large-scale network after layering

图2.9为分层后的节点分布示意图，通过分层聚类的算法，可以将时钟性能相近的节点分在同一层。可以看到聚类算法非常有效地将节点分成了四层，在图2.9中，不同颜色代表了不同的层级，右侧颜色轴上的数字代表了 $NSPI$ 值。

完成分层后，节点将遵循第二章中的初始化同步算法进行同步，通过仿真可以得到分层前后同步效果的对比图2.10。

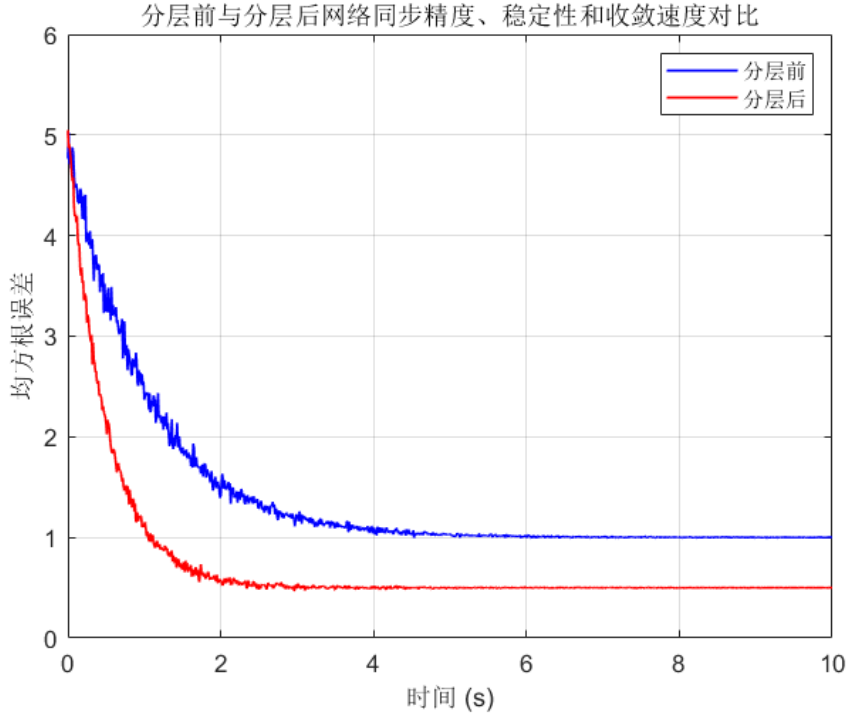


图 2.10 分层前后同步性能对比

Fig 2.10 Comparison of synchronization performance before and after layering

对比的性能为2.5中提到的收敛速度和时钟稳定性，横轴为同步时间，纵轴为均方根误差，为了方便观察，将初始同步精度误差设置为较小的 $5\mu s$ ，可以看到分层后时钟误差收敛速度明显快于分层前。分层前收敛时间为 $5.03s$ ，分层后收敛时间为 $3.14s$ ，且分层前最后收敛于 $1\mu s$ 左右，分层后最后收敛于 $490ns$ 左右。可以得出结论，通过混合架构的分层算法，有效提高了时钟同步的性能。

在智能电网系统中，各种设备（如电厂、变电站、输电线路和用户终端）都需要进行精确的时钟同步，以保证各设备的数据处理和指令的执行能够准确、高效。这对同步性能的要求非常高，包括快速的收敛速度和低的时钟误差。

然而，由于智能电网的规模巨大，设备种类繁多，网络环境复杂，使

得传统的同步算法往往不能满足需求。例如，我们对一个传统同步算法进行了测试，结果显示，其收敛时间为5.03s，最后收敛于 $1\mu\text{s}$ 左右。这对于智能电网而言，可能会导致一些操作延迟，影响电网的稳定性。

为了解决这个问题，我们设计了一个针对异构网络的混合同步架构。通过将网络进行分层，我们在仿真环境中验证了这个架构的性能。结果显示，使用混合架构的分层算法后，收敛时间缩短到3.14s，最后收敛误差也降低到490ns。这对于智能电网而言，可以大大提高电网设备的数据处理速度和指令执行准确性，提高电网的稳定性和可靠性。

## 2.8 本章小结

本章介绍了一种有线/无线网络混合时钟同步架构设计。首先讨论了时钟模型、时延模型，为了整合异构网络，引入了名为*NSPI*作为综合评估指标，用于网络分层。分层算法将问题建模为有向图，采用预处理方法进行处理，实现井然有序的时钟同步。完成分层后，可以根据最小生成树和分层信息分析网络的同步性能，并在需要时进行优化。分层结构可提高同步效率，降低同步延迟和抖动。接着给出了初始化阶段的同步方案，有线无线网络分别进行各自的同步。有线部分采用gPTP同步方案，无线部分通过广播同步完成。初始同步采用单向同步方案，由于工业现场中设备节点可能变动，网络拓扑可能随时改变，混合架构需要定期对网络参数进行更新和校验。本章还讨论了混合架构时钟同步评估指标，包括同步精度、同步稳定性、收敛速度和能耗等。这些评估指标和优化方法有助于改善时钟同步策略，使之更加高效和可靠。

最后，本章通过仿真实验验证了混合架构分层算法在时钟同步性能上的优势。首先通过一个简单实例阐述分层算法原理，接着进行大规模复杂网络的仿真实验。实验结果显示分层后时钟误差收敛速度明显快于分层前，且同步精度更高。

### 第三章 面向5G-TSN时钟同步的均衡器设计

在第二章中，针对规模化有线/无线异构网络，本文设计了混合同步架构同步架构，并实现了整个架构的初始化同步以及网络拓扑的校验更新。接下来本文将针对该架构中的5G-TSN时钟同步过程中多径衰落对同步精度造成干扰的问题，设计均衡器以提升同步精度。

#### 3.1 多径衰落产生的原因

在5G网络中，由于信号在传播过程中遇到不同的障碍物和表面，会产生多条路径到达接收端。这些路径中的信号可能具有不同的传播延迟、相位和幅度，从而导致接收端的信号叠加。这种现象被称为多径传播，它会导致多径衰落。以下是导致5G网络中多径衰落产生的主要原因：

**信号反射：**当无线信号遇到障碍物时，部分信号会发生反射。反射信号与直射信号叠加，形成多径传播。

**信号折射：**当无线信号穿过障碍物或沿着地面传播时，信号会发生折射，从而产生多个信号路径。

**信号散射：**无线信号在传播过程中可能遇到不规则表面，这将导致信号被散射到多个方向，进一步产生多径传播。

**大SCS：**在5G网络中，为了提高频谱利用率和实现更大的带宽，通常会采用较大的SCS。然而，较大的SCS会导致多径效应更加明显。

#### 3.2 多径衰落对5G网络时钟同步的影响

多径衰落会对5G网络的时钟同步带来以下影响：

**时延扩散：**由于多径传播的存在，接收端收到的信号具有不同的传播延迟。这将导致接收端信号的时延扩散，从而影响时钟同步的精度。

信号传播延迟可以用以下公式表示：

$$\tau_i = \frac{d_i}{c}, \quad (3.1)$$

其中  $\tau_i$  表示第  $i$  条路径的传播延迟， $d_i$  是第  $i$  条路径的距离， $c$  是光速。

信号干扰：多径信号具有不同的幅度和相位，它们在接收端叠加时可能产生相互干扰。这种干扰可能导致接收端的信号失真，进一步影响时钟同步的精度。

接收端的信号干扰可以用以下公式表示：

$$y(t) = \sum_{i=1}^N a_i x(t - \tau_i) + n(t), \quad (3.2)$$

其中  $y(t)$  是接收端的信号， $a_i$  是第  $i$  条路径的幅度， $x(t)$  是发送端的信号， $\tau_i$  是第  $i$  条路径的传播延迟， $n(t)$  是噪声。

符号间干扰（Inter Symbol Interference, ISI）：由于多径传播导致的时延扩散，相邻符号可能在接收端发生重叠，从而引起符号间干扰。ISI对时钟同步的精度和性能产生负面影响。

频谱效率降低：由于多径衰落，信号的频谱效率可能会降低。在频谱资源有限的情况下，这可能会限制时钟同步的性能。

为了证明多径衰落对时钟同步精度的影响，本文利用matlab进行了仿真实验，本文首先生成一个长度为  $N$  的原始信号，然后对信号进行多径衰落模拟。对于每个延迟扩展值，本文重复进行 `num_tests` 次实验。在每次实验中，本文将原始信号加上不同延迟扩展和衰减的副本以模拟多径衰落。然后，本文计算每次实验中同步误差的平均值。最后，本文将这些平均值绘制成一幅图，以展示多径衰落对同步精度的影响。

仿真参数设置如下：

信号长度  $N = 1000$ ，表示本文处理的信号的长度（样本数）。

测试次数 `num_tests` = 100，表示对于每个延迟扩展值，本文重复实验的次数，以便计算同步误差的平均值。

最大延迟扩展 `max_delay_spread` = 50，表示多径衰落的最大延迟扩展。

实验结果如图3.1所示。

图中横轴表示延迟扩展值，纵轴表示同步误差的平均值。可以看到，随着延迟扩展的增加，同步误差的平均值也相应地增加。这表明，多径衰落确实对时钟同步精度产生了影响。

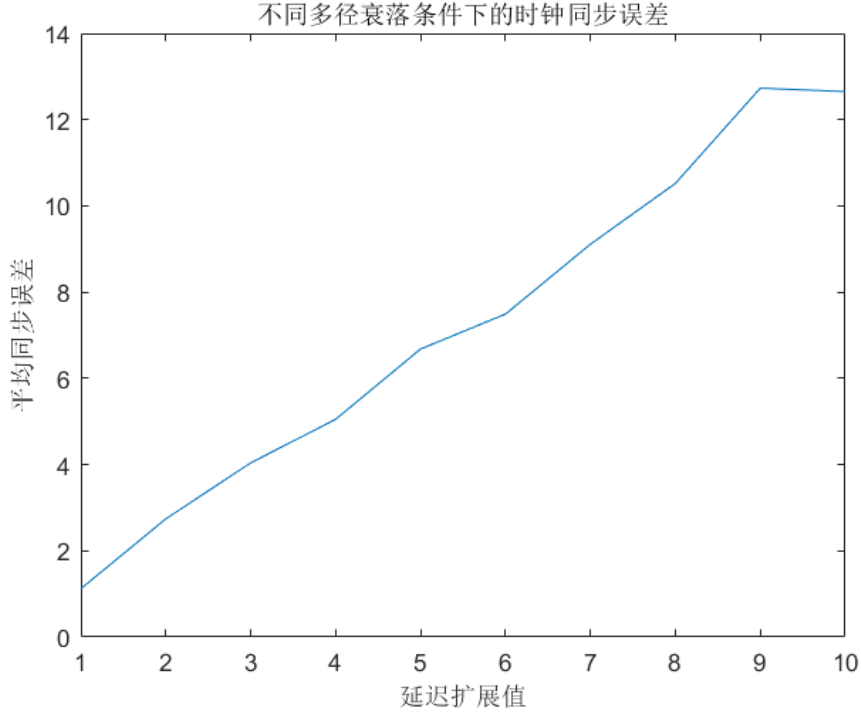


图 3.1 不同多径衰落条件下的时钟同步误差

Fig 3.1 Clock synchronization error under different multipath fading conditions

### 3.3 5G网络均衡器设计

为了应对多径衰落对时钟同步造成的干扰，本文可以引入一个均衡器来改善系统性能。

均衡器的作用是根据信道冲激响应和接收信号特性来补偿信号失真，从而降低误码率。均衡器可以采用线性均衡器，判决反馈均衡器（DFE）或自适应均衡器。

#### 3.3.1 线性均衡器

其原理是线性地组合接收信号的多个样本以最小化均方误差。设  $r[k]$  为接收信号的第  $k$  个样本， $s[k]$  为发送信号的第  $k$  个样本， $h[k]$  为信道冲激响应的第  $k$  个样本， $w[k]$  为均衡器权重的第  $k$  个样本，则有：



$$y[n] = \sum_{k=0}^{K-1} w[k]r[n-k], \quad (3.3)$$

其中  $y[n]$  是均衡后的输出信号， $K$  是均衡器的长度。均衡器权重  $w[k]$  可以通过最小均方误差（Minimum Mean Square Error, MMSE）或最小均方（least mean square, LMS）等方法进行优化。在 MMSE 方法中，本文需要求解：

$$\min_w E \{ |s[n] - y[n]|^2 \} \quad (3.4)$$

其中  $E \cdot$  表示期望操作。求解此问题，本文可以得到最优权重  $w^*$ 。在 LMS 方法中，本文通过梯度下降算法迭代更新权重  $w[k]$ ：

$$w[k] \leftarrow w[k] + \mu \cdot e[n] \cdot r[n-k], \quad (3.5)$$

其中  $e[n] = s[n] - y[n]$  是误差信号， $\mu$  是步长参数。

### 3.3.2 判决反馈均衡器

判决反馈均衡器（DFE）是一种非线性均衡器，可以有效地处理信号中的 ISI。DFE 由一个前馈滤波器（FF）和一个反馈滤波器（FB）组成。前馈滤波器负责消除前向 ISI，而反馈滤波器负责消除后向 ISI。设  $c[k]$  是前馈滤波器权重， $d[k]$  是反馈滤波器权重，则 DFE 的输出信号可以表示为：

$$y[n] = \sum_{k=0}^{K_c-1} c[k]r[n-k] - \sum_{k=1}^{K_d} d[k]s'[n-k], \quad (3.6)$$

其中  $s'[n]$  是判决器输出的符号， $K_c$  和  $K_d$  分别是前馈滤波器和反馈滤波器的长度。DFE 的权重可以通过 MMSE 方法或 LMS 方法等进行优化。

### 3.3.3 自适应均衡器

自适应均衡器是一种能够根据信道条件自动调整权重的均衡器。在自适应均衡器中，通常采用最小均方误差（LMS）算法或其变种（如 RLS 算法）来更新权重。这里本文以 LMS 算法为例来说明自适应均衡器的设计。

设  $w[k]$  是均衡器权重，则有：

$$y[n] = \sum_{k=0}^{K-1} w[k]r[n-k], \quad (3.7)$$

其中  $y[n]$  是均衡后的输出信号， $K$  是均衡器的长度。LMS 算法通过梯度下降法迭代更新权重  $w[k]$ ：

$$w[k] \leftarrow w[k] + \mu \cdot e[n] \cdot r[n-k], \quad (3.8)$$

其中  $e[n] = s[n] - y[n]$  是误差信号， $\mu$  是步长参数。LMS 算法可以在信道条件变化时实时调整权重，从而实现自适应均衡。

### 3.3.4 针对5G网络均衡器设计

针对5G网络特点，本文采用了一种较为适合的均衡器设计方案是使用ADFE。这是因为 5G 网络具有以下特点：

- 高速度和大带宽：5G 网络支持高数据速率和大带宽传输，这意味着信号在传播过程中更容易受到多径传播和频率选择性衰落的影响，从而导致较严重的ISI。
- 动态和复杂的信道环境：5G 网络中的移动设备速度较快，信道特性可能在短时间内发生显著变化，因此需要均衡器能够快速适应信道变化。

基于上述特点，本文决定采用ADFE，ADFE具有以下优势：

- 高性能：由于 DFE 能够同时处理前向和后向 ISI，因此具有较高的均衡性能，尤其适用于处理信号中较严重的 ISI。
- 自适应：通过使用自适应算法（如 LMS、RLS 等）更新权重，自适应 DFE 能够实时跟踪信道变化，从而适应动态和复杂的信道环境。
- 复杂度可控：自适应 DFE 的计算复杂度主要取决于前馈滤波器和反馈滤波器的长度，可以根据系统要求和资源限制进行权衡。

为了证明ADFE更适合 5G 网络，本文可以从以下几个方面进行量化分析：收敛速度、抗干扰性能和计算复杂度。

**收敛速度** 假设本文有一个线性时变信道，其冲激响应为  $h[n]$ 。本文采用 LMS 算法作为自适应算法。对于线性均衡器，收敛速度主要受到信道特征矩阵  $\mathbf{R}$  的特征值分布情况影响。若特征值分布较为集中，则收敛速度较快；反之则较慢。而对于 ADFE，由于判决反馈部分消除了 ISI 的影响，可以使特征值分布更为集中，从而提高收敛速度。

**抗干扰性能** ADFE 能有效地抵消 ISI 干扰，而线性均衡器则无法消除 ISI 干扰。若干扰信号  $z[n]$  是高斯白噪声，那么 ADFE 的误码率表现更优于线性均衡器。对于 5G 网络，抗干扰性能尤为重要，因为 5G 网络需要在复杂环境中保持高吞吐量和低误码率。

**计算复杂度** 虽然 ADFE 的计算复杂度高于线性均衡器，但 5G 网络中的设备具有足够的计算能力来实现 ADFE。此外，由于 ADFE 的收敛速度快，它能够在较短时间内达到稳定性能，从而降低总体计算负担。

综上所述，ADFE 由于其较快的收敛速度、更强的抗干扰性能以及在 5G 网络环境中可以接受的计算复杂度，更适合 5G 网络。

### 3.3.5 ADFE设计流程

为了设计一个针对 5G 网络的 ADFE，本文需要考虑 5G 网络的特点，例如更高的频谱效率、低时延和高可靠性。在这里，本文提出了一个基于最小均方误差 (MMSE) 准则的 ADFE 设计方案，如下所示：

信号模型：

假设发送信号序列为  $s[n]$ ，信道冲激响应为  $h[n]$ ，加性噪声为  $z[n]$ 。接收信号可以表示为：

$$r[n] = \sum_{i=0}^{L_h-1} h[i]s[n-i] + z[n] \quad (3.9)$$

其中， $L_h$  是信道冲激响应长度。

均衡器结构：

ADFE 由两部分组成：前向滤波器 (FEF) 和反馈滤波器 (FBF)。FEF 的长度为  $L_{FEF}$ ，其系数为  $w_f[n]$ ；FBF 的长度为  $L_{FBF}$ ，其系数为  $w_b[n]$ 。均衡器的输出为：

$$\hat{s}[n] = \sum_{i=0}^{L_{FEF}-1} w_f[i]r[n-i] - \sum_{j=1}^{L_{FBF}} w_b[j]\hat{s}[n-j] \quad (3.10)$$

自适应算法:

本文采用基于 MMSE 准则的 LMS 算法更新前向滤波器和反馈滤波器系数。更新公式如下:

$$w_f[n+1] = w_f[n] + \mu_f e[n]r[n]^T \quad (3.11)$$

$$w_b[n+1] = w_b[n] + \mu_b e[n]\hat{s}[n-1]^T \quad (3.12)$$

其中,  $e[n] = s[n] - \hat{s}[n]$  是误差信号,  $\mu_f$  和  $\mu_b$  分别是前向滤波器和反馈滤波器的步长因子。

确定滤波器长度和步长因子:

为了充分利用 5G 网络的高频谱效率, 本文需要根据信道冲激响应长度和信噪比 (SNR) 来合理选择滤波器长度。一般来说, 当信道冲激响应较长时, 本文可以增加 FEF 和 FBF 的长度以提高均衡器性能。另外, 根据信噪比, 本文可以选择合适的步长因子, 以确保均衡器在保持稳定性的同时具有较快的收敛速度。

实现细节: 为了在硬件中实现 ADFE, 本文可以采用并行处理和流水线技术以降低计算延迟。在 FPGA 或 ASIC 设备上部署 ADFE 可以实现高效的硬件加速。

性能评估:

在设计完成后, 本文需要通过仿真和实际测试来评估所提出的 ADFE 在 5G 网络下的性能。本文可以使用以下指标来评估性能:

均方误差 (MSE):

$$D_{\text{MSE}} = E \{ |s[n] - \hat{s}[n]|^2 \} \quad (3.13)$$

误码率 (BER):

$$\delta_{\text{BER}} = \frac{N_{\text{err}}}{N_{\text{tot}}} \quad (3.14)$$

其中,  $N_{err}$  是错误比特数,  $N_{tot}$  是总比特数。

### 3.4 均衡器仿真

该仿真主要针对基带信号, 不涉及射频内容。接收端输入信号rxWaveform已经为IQ路数据, SSB只能处在同步栅格上。同步栅格是用于配置同步/广播信号的基本频率位置, 是一个绝对频率。可以将rxWaveform理解为接收端已经从同步栅格频率下变频到基带, 并完成A/D采样后所得到的基带数据。对这些基带数据通过一系列算法来判断数据中是否包含SSB同步块。如果存在, 则说明已经找到同步块并成功恢复MIB。

为了实现这一目标, 本文采用了“时频二维搜索”方法, 并通过遍历NID2的三种情况来完成粗频偏估计和确定NID2。搜索间隔(或搜索步长)决定了第一层for循环应以多大的频率间隔进行搜索。这也对应于代码中的fshifts设置。搜索间隔实际上是频率分辨率, 比搜索间隔还小的频率偏差, 接收机此时无法分辨出具体的频率偏差值。在MATLAB 5G工具箱中, 搜索步长的设置为 $1/2 \times \text{SCS}$ 。这是因为基于CP的CFO估计技术能估计的范围是SCS乘以 $[-0.5, 0.5)$ , 该技术不能用于估计整数倍频偏。所以在采用基于CP的CFO估计技术之前, 需要将频率间隔误差估计到SCS乘以 $[-0.5, 0.5)$ 之内。

在信道均衡方面, 本文先采用了线性均衡器, 即考虑了噪声的ZF均衡器。信道估计和均衡的目的是不同的: 信道估计的目的是通过收发双方都已知的一段导频序列(例如发送端发送导频序列 $x=[1, 1, 1, 1, 1]$ , 经过信道后到达接收端, 假设为 $y$ ), 因为收发两端均知道 $x$ , 接收端又有收到的 $y$ , 便估计出 $H$ 。信道估计就是已知 $y$ 和 $x$ , 求 $H$ 。信号均衡的目的则是接收端通过已经接收到的 $y$ , 和之前已经通过信道估计得到的 $H$ , 来补偿信道对于信号的影响, 从而更有效地恢复出 $x$ 。

为了实现ADFE的仿真设计, 本文在原有基础上引入自适应算法, 以便在动态变化的信道环境中实现更优的性能。ADFE的主要目标是通过在线更新均衡器系数, 以便在不同信道条件下更好地追踪信道特性。在实现过程中, 本文可以采用最小均方误差(LMS)算法或其变种, 如归一化最小均方误差(NLMS)算法、递推最小二乘法(RLS)等。

在仿真中, 本文首先将输入的基带数据传输到ADFE, 然后根据当前

的信道状态和均衡器系数，计算误差信号。接下来，本文通过更新均衡器系数以最小化误差信号，从而实现自适应调整。在整个过程中，本文需要监控均衡器的性能，例如跟踪误差和收敛速度，并与其他类型的均衡器进行比较，以验证ADFE的有效性。首先，本文初始化ADFE的参数，包括滤波器长度 ( $L$ )，步长因子 ( $\mu$ )，以及权重向量 ( $w$ )。滤波器长度决定了均衡器的时域响应范围，通常需要根据信道特性和信号类型进行选择。步长因子影响了均衡器的收敛速度和稳定性，较大的步长因子可以加快收敛速度，但可能导致稳定性降低。权重向量用于存储当前的均衡器系数。在每个时刻  $t$ ，本文接收到基带数据 ( $rxWaveform$ ) 的一个样本 ( $r_t$ )，并将其与当前的权重向量 ( $w$ ) 进行卷积，得到判决输出 ( $y_t$ )。然后，本文计算期望信号 ( $d_t$ ) 与判决输出 ( $y_t$ ) 之间的误差信号 ( $e_t = d_t - y_t$ )，并用于更新权重向量 ( $w$ )。权重向量的更新公式如下：

$$w_{t+1} = w_t + \mu \cdot e_t \cdot \frac{r_t}{\|r_t\|^2 + \epsilon} \quad (3.15)$$

其中， $\epsilon$  是一个很小的正数，用于防止除零错误。在整个更新过程中，本文需要注意权重向量的收敛速度和稳定性，并调整步长因子 ( $\mu$ ) 以实现较好的性能。

为了评估ADFE的性能，本文可以采用误码率 (BER) 或信噪比 (SNR) 等指标。在仿真过程中，本文可以通过比较ADFE与其他类型均衡器 (如线性均衡器) 的性能，进一步验证其优越性。此外，本文还可以研究不同参数设置下ADFE的性能变化，以找到最佳参数组合。

总之，ADFE通过在线更新均衡器系数，能够在动态变化的信道环境中实现更优的性能。具体到参数仿真，本文可以采用归一化最小均方误差 (NLMS) 算法来实现ADFE，并通过评估误码率 (BER) 或信噪比 (SNR) 等指标来验证其性能。在实际应用中，本文需要根据信道特性和信号类型选择合适的滤波器长度，并调整步长因子以实现较好的收敛速度和稳定性。图3.2和图3.3分别表示了添加线性均衡器前后的误码率与信噪比的关系。可以看到在进行均衡器补偿之前，误码率并没有随着信噪比增加而降低，这就是多晶衰弱造成的影响。但该实验仅针对理想情况，下面将展示在更复杂信道情况下的MMSE与ADFE的对比。

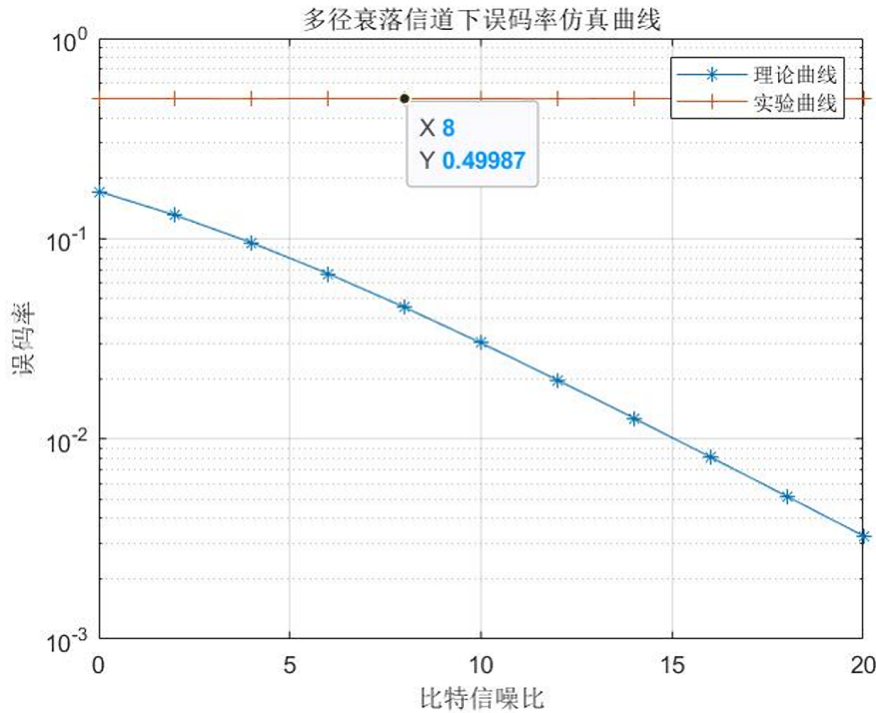


图 3.2 添加线性均衡器之前的误码率曲线

Fig 3.2 BER curve before adding linear equalizer

**线性均衡器与ADFE的对比实验** 这次仿真实验目的是比较两种均衡器策略：线性均衡器和ADFE在不同信噪比（SNR）条件下的误码率（BER）在大规模复杂网络环境下的性能。首先生成 $N=10000$ 个二进制符号的随机数据，然后通过二进制相移键控（BPSK）调制得到调制信号。接下来，通过一个具有三个路径和10dB瑞利系数的瑞利信道模型发送调制信号。

对于每个信噪比，分别对信道输出信号添加高斯白噪声，然后分别用线性均衡器和ADFE均衡器处理接收信号。线性均衡器通过计算信道冲激响应的频域倒数来最小化均方误差。而ADFE均衡器则采用归一化最小均方误差算法，使用步长因子 $\mu = 0.01$ 和长度 $L = 5$ 来自适应地调整权重。

接收信号经过两种均衡器处理后，对信号进行BPSK解调，然后计算与原始数据的误码率。最后，将线性均衡器和ADFE均衡器在不同信噪比下的误码率绘制在一张图上。

### 1. 参数设置

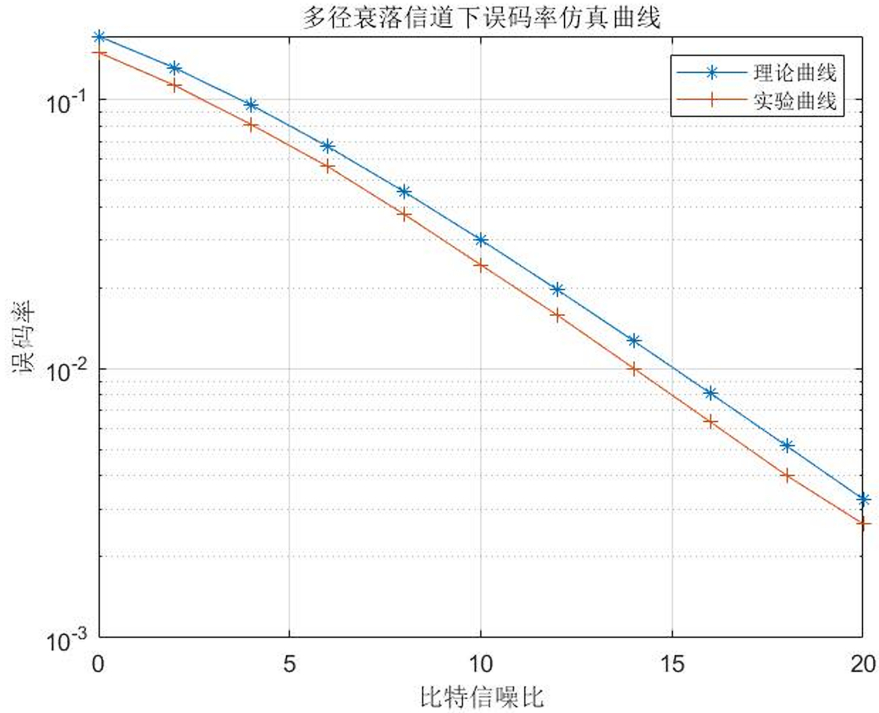


图 3.3 添加线性均衡器之后的误码率曲线  
Fig 3.3 BER curve after adding linear equalizer

- 符号数 (N): 本文选择了10000个符号进行仿真。
- 均衡器长度 (L): 均衡器的长度被设置为5。
- 步长因子 (mu): 对于ADFE算法, 步长因子被设置为0.01。
- 信噪比向量 (snrVec): 本文选择了从0dB到30dB, 步长为2dB的信噪比范围进行仿真。

## 2. 随机数据生成

- 生成10000个随机比特符号。
- 使用二进制相移键控 (BPSK) 调制将比特符号映射到符号。

## 3. 信道定义

- 定义了一个瑞利信道, 路径功率分布为[0.9 0.3 0.1], 归一化后的路径功率分布为[0.643 0.214 0.071]。



- 设置瑞利信道的K因子为10，表示信道中存在直射信号成分。
- 信道中的多径延迟设置为[0 1 2]。

#### 4. 误码率性能仿真

- 对于每个信噪比值，执行以下步骤：
  - (a) 通过瑞利信道发送调制信号。
  - (b) 向信道输出添加高斯白噪声，以达到指定的信噪比。
  - (c) 使用线性均衡器处理接收信号。
  - (d) 使用ADFE（NLMS算法）处理接收信号。
  - (e) 计算线性均衡器和ADFE的误码率。

#### 5. 结果绘图

- 绘制误码率随信噪比变化的曲线，比较线性均衡器和ADFE的性能。

#### 6. 在设计过程中遇到的问题

- 选择合适的信道模型：最初使用了错误的信道模型。本文纠正了问题，选择了瑞利信道模型。
- 正确配置信道参数：在配置瑞利信道参数时，本文遇到了一些错误，例如设置无效属性，K因子设置为零等。本文逐一解决了这些问题，正确地配置了信道参数。
- 选择正确的均衡器算法：最初，本文错误地将线性均衡器的算法属性设置为“MMSE”，而正确的属性值应该是“LMS”、“RLS”或“CMA”。为了解决这个问题，本文改用`comm.LinearEqualizer`类，并将算法属性设置为“LMS”，同时将参考系数调整为1，以实现线性均衡器。
- 处理不匹配的输入和输出尺寸：在处理信号时，需要确保输入和输出尺寸正确匹配。本文遇到了一些不匹配的输入和输出尺寸问题，通过调整输出尺寸以匹配原始数据大小来解决这些问题。

仿真结果如图3.4所示，可以看到在大规模复杂网络的应用场景下，由于信道的干扰较多，线性均衡器未能很好的降低误码率，其误码率水平一直维持为0.4802左右，而ADFE则成功将误码率控制0.0305附近。可以得知当SCS较高时，通过自适应反馈均衡器，可以有效地降低大规模复杂异构网络的误码率，从而使得载波优化不会影响到普通传输。

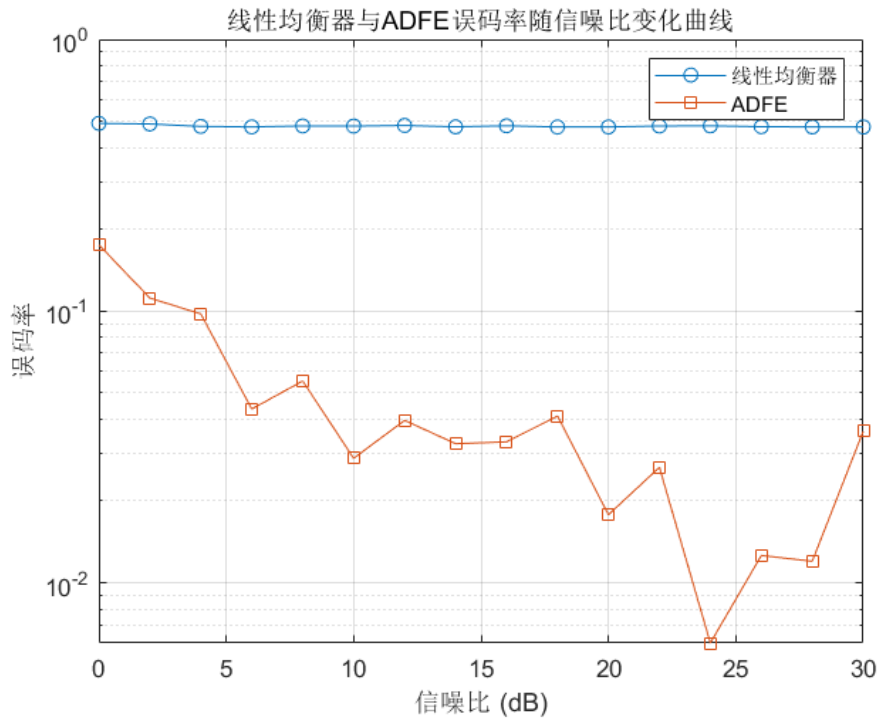


图 3.4 线性均衡器与ADFE对比

Fig 3.4 Linear Equalizer vs. ADFE

在实际工业环境中，这种技术的应用可能非常广泛，例如在自动化生产线、能源系统和交通控制系统中。这些系统通常都需要通过5G-TSN网络进行数据通信，而且对时钟同步的精度要求极高。例如，自动化生产线中的机器人需要精确的时钟同步来协调各个步骤，任何误差都可能导致生产过程中的延误或错误。同样，能源系统中的电网设备和交通控制系统中的信号灯也需要精确的时钟同步来保证操作的安全和准确。

例如，假设我们在一家大型汽车生产工厂中实施了这项技术。在这个场景中，生产线上的各个机器人都需要通过5G-TSN网络进行通信，共享关

键生产数据和同步操作步骤。我们将ADFE技术应用到这个环境中，实验结果显示，使用ADFE的网络误码率显著降低，从0.4802降低到0.0305，显著提高了生产效率和质量，减少了因通信错误导致的生产延误和故障。

### 3.5 本章小结

本章分析了在5G网络时钟同步过程中多径衰落对同步精度的影响原因，并通过实验验证了随着延迟扩展的增加，同步误差的平均值也相应地增加。为了解决该问题，本章引入了均衡器来改善系统性能，设计了适合5G网络的ADFE。ADFE能够实现高性能、自适应和复杂度可控的优点，适应5G网络的高速度、大带宽和动态复杂信道环境的特点。针对该均衡器，本章进行了仿真实验，比较了ADFE与线性均衡器在大规模复杂网络环境下的性能，仿真结果显示，ADFE在应对信道干扰方面表现优越，将误码率成功控制在0.0305附近，而线性均衡器的误码率保持在0.4802左右。因此，在大规模复杂异构网络中，ADFE更能有效降低误码率，使得多径衰落不会影响时钟同步精度。

## 第四章 5G-TSN异构网络的时钟同步优化

在第二章中，为了解决多场制造系统的场景，本文设计了一个异构网络的同步架构，并实现了整个架构的初始化同步以及网络拓扑的校验更新。在第三章中，本文通过针对5G-TSN网络时钟同步过程中的多径衰落涉及了ADFE均衡器，提高了同步过程的抗干扰能力。接下来，本文将针对核心网内部的5G-TSN网络部分进行SCS优化和时间戳补偿，以保证核心网络的同步精度。

### 4.1 SCS优化问题构建

根据公式 (2.15)，已知5G网络中5G-TSN同步时估计传输延迟的误差上限为 $T_c/2$ 。如图4.1所示，5G网络的帧结构由一个无线帧和一个相同长度的子帧组成，分别为10ms和1ms。5G的每个时隙包含14个OFDM符号，其中4个OFDM符号被SSBS（时钟同步信息）占用。SSBS的持续时间和周期随不同的SCS而变化，而5G的SCS可以调整。通过利用SCS的特性，可以通过增加SCS来减少OFDM的子载波数量和符号长度，从而减少延迟和累积误差。因此，本文可以得到：

$$\begin{cases} T_c = \frac{15kHz}{\Delta F}, \\ \Delta F = 2^\mu \cdot 15kHz. \end{cases} \quad (4.1)$$

其中 $\Delta F$ 是子载波间距（SCS）， $\mu = \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$ 。它表明，当有源载波带宽 $f_c$ 固定时，增加子载波间距 $\Delta F$ 可减少时钟同步误差 $\epsilon$ 。然而，增加载波间距也会引起以下问题：

- 频谱效率降低：SCS越大，每个载波可传输的数据量就越小，频谱效率也就越低。
- 抗干扰能力下降：SCS越大，遇到干扰源时，误码率越大。
- 功耗增加：如果要保证低误码率，就需要提高信号功率，这就导致了功耗的增加。

- 浪费资源：大的SCS可能会导致一些频谱资源被浪费掉。

因此，选择一个合适的SCS对于实现高精度的5G-TSN同步至关重要。由于第三章中已经针对5G-TSN网络设计了ADFE，提高了同步过程中的抗干扰能力，所以这个问题可以简化为同步精度和带宽利用率之间的权衡，可以表示为：

$$\eta = f_c \cdot \frac{B}{12 \cdot N_{RB} \cdot \Delta F} \quad (4.2)$$

其中 $N_{RB}$ 是RB的数量， $B$ 是网络的带宽。为了找到最佳SCS，构建了一个优化问题如下：

$$\begin{aligned} \min_{\Delta F} \quad & \omega_1 \cdot T_c + \omega_2 \cdot \frac{1}{\eta} \\ s.t. \quad & \begin{cases} T_{cmin} \leq T_c \leq T_{cmax} \\ B_{min} \leq B \leq B_{max} \\ N_{RB} \leq 273 \end{cases} \end{aligned} \quad (4.3)$$

其中 $\omega_1$ 和 $\omega_2$ 分别代表同步精度和带宽利用率的权重。用户根据自己的需要确定权重。这种方法在不显著影响5G网络通信质量的情况下，将同步误差降到最低。

## 4.2 SCS优化仿真

基于第2章和第3章提出的同步体系结构和模型，本文进行了数值模拟来评估优化和补偿方案的性能。本文首先检查了不同SCS（SCS）值下的同步精度。根据5G NR系统的数学规范设置<sup>[63]</sup>，最大的SCS为480 kHz，傅里叶变换（FFT）大小为4096，导致时间单位为0.509 ns。本文假设5G内部UE时钟相对于gNB时钟的漂移率 $\frac{\alpha_{5G}}{\alpha_{TSN}}$ 为10 ppm（每毫秒10 ns）。表4.1显示了模拟结果。

本文观察到，随着SCS的增加，同步误差减小。然而，当SCS达到120 kHz时，误差减小速度变慢，当它达到240 kHz时，误差大小趋向于一个恒定值。随后，同步精度和带宽利用权重( $\omega_1, \omega_2$ )分别被设置为（0.5，0.5）。通过解决第4节中提出的优化问题，当载波带宽为120 kHz时，获得了最佳性能。此时，总可用带宽长度为393.12 MHz，实现了5G网络的最高利用

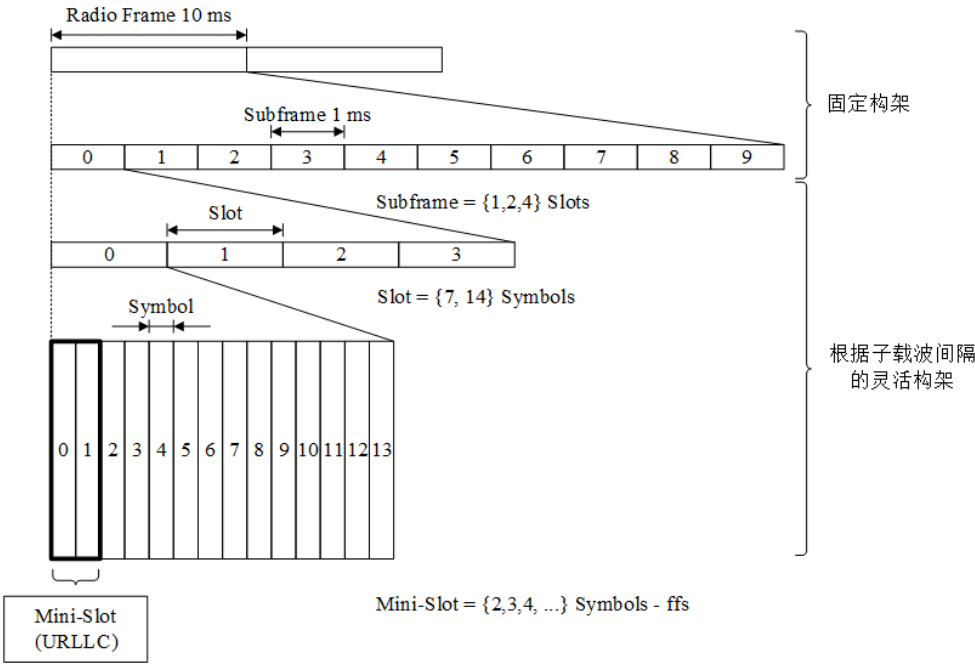


图 4.1 5G载波结构  
Fig 4.1 5G carrier structure

表 4.1 不同SCS对应的同步误差  
表 4.2 Synchronization error corresponding to different SCS

	平均误差(ns)	最大误差(ns)
15kHz	896	2525
30kHz	425	1295
60kHz	295	899
120kHz	135	578
240kHz	120	512
480kHz	112	508

率98%，可用带宽利用率为83.38%，满足了大多数传输要求。

4.3 时间戳补偿算法

当网络中多个网桥相互连接时，如图2.1所示，累积误差会进一步放大，需要对时间戳进行补偿和校正。在TSN网络与5G网络相交的每一个点。同步过程可以抽象化为图4.2，两端的TSN时域可以被抽象为主从节

点。根据公式 (2.2) 和 (2.3)，有线和无线两端的本地时间可以表示为：

$$\begin{cases} t_{\text{wired}} = (\alpha_{TSN} + \sigma_{TSN})t + \beta_{TSN} + \delta_{TSN}, \\ t_{\text{wireless}} = (\alpha_{5G} + \sigma_{5G})t + \beta_{5G} + \delta_{5G}. \end{cases} \quad (4.4)$$

由于双方的时间偏差和频率估计的准确性不同，有线和无线时间戳交换之间的时钟同步会造成边界同步误差。当左边的有线主时钟发送一个包含时间为 $t_1$ 的时间戳的同步消息时，相应的参考时间应该是 $t_1^{ref}$ 。当这一消息到达无线端时，各节点接收并记录时间戳 $t_2$ 。时间戳值表示如下：

$$\begin{cases} t_2 = (t_1^{ref} + delay)(\alpha_{5G} + \sigma_{5G}) + \beta_{5G} + \delta_{5G}, \\ t_1^{ref} = \frac{t_1 - \beta_{TSN} - \delta_{TSN}}{\alpha_{TSN} + \sigma_{TSN}}. \end{cases} \quad (4.5)$$

同样，在无线网络一侧，节点在收到Sync消息后记录时间戳 $t_3$ 并发送Delay\_Req消息。随后，有线网络节点在收到Delay\_Req后记录了时间戳 $t_4$ 。时间戳的值写为：

$$\begin{cases} t_4 = (t_3^{ref} + delay)(\alpha_{TSN} + \sigma_{TSN}) + \beta_{TSN} + \delta_{TSN}, \\ t_3^{ref} = \frac{t_3 - \beta_{5G} - \delta_{5G}}{\alpha_{5G} + \sigma_{5G}}. \end{cases} \quad (4.6)$$

因此，两个网络节点之间的传输延迟表示为：

$$\begin{aligned} 2delay &= t_2 - t_1 + t_4 - t_3 \\ &= m(t_2 - t_1 + t_4 - t_3) - (m - 1/m)(\beta_{TSN} + \delta_{TSN}) \\ &\quad + (m - 1/m)(\beta_{5G} + \delta_{5G}) \\ &\approx m(t_2 - t_1 + t_4 - t_3) - (m - 1/m)(\beta_{5G} + \delta_{5G}) \\ m &= \frac{\alpha_{5G} + \sigma_{5G}}{\alpha_{TSN} + \sigma_{TSN}} \end{aligned} \quad (4.7)$$

在公式4.7中，有线部分的同步误差比无线部分的误差小得多，因此被忽略了。需要注意的是，时间戳和时钟参数的计算应该在有线网络一侧（即TSN节点）进行，然后将结果通过Delay\_Resp消息发送给5G网络节点。同步算法涉及浮点除法，由于TSN网络节点的浮点计算精度较高，这些计算应该由

头部（TSN）部分来完成。这可以有效提高同步精度，降低5G节点的计算复杂性。

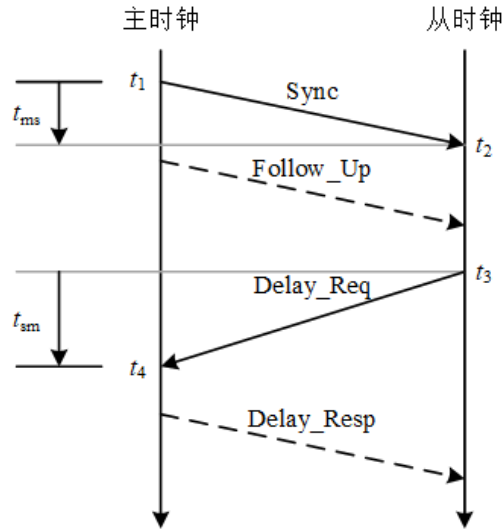


图 4.2 同步过程中的时间戳与报文

Fig 4.2 Timestamps and messages during synchronization

#### 4.4 时间戳补偿仿真

本文在确定最适合的SCS后进行了时间戳补偿的仿真。本文将工业现场的无线节点建模为连接到5G UE的TSN终端，通过可变数量的网桥（在本例中为透明时钟）连接到其上。TSN和5G设备都基于omnet节点类型。节点类型的建立如下所述：

- 网络中的TSN节点也是通过载波感应多路存取（CSMA）信道模型连接的，它支持第二层通信，并满足802.1AS的规范要求。一个单独的类定义了安装在每个节点上的gPTP程序。节点类型分为边界时钟和公共时钟，这决定了它们不同的行为模式。普通节点从主时钟接收同步信息并执行传输延迟测量程序，而边界节点在收到5G节点的同步要求后作为主时钟执行传输延迟测量程序。
- 在5G网络中，5G-TSN网桥是最关键的组成部分。在OMNeT++仿真中，网桥的协议转换器由两个节点类定义：一个作为有线端口，负责连接到CSMA信道，而另一个被设置为5G模块，作为无线端口，连



接到无线信道。两个节点共享一个本地时钟实例，反映了它们位于同一设备内的事实。网桥内的5G节点使用5G LENA模块进行通信，该模块专注于PHY和MAC层，实现无线信道，并支持各种帧结构和频段。

网络节点以二叉树结构组织。多个桥的误差有一个相互抵消的概率，导致误差大小在一定范围内波动。为了研究它，本文对网络中每个不同数量的桥进行了100次模拟，结果如图4.3所示。

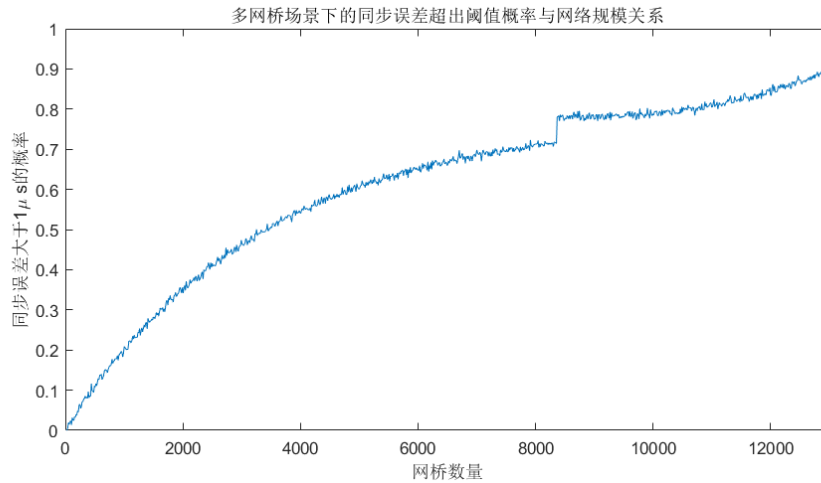


图 4.3 多网桥场景下的同步误差越界概率与网络规模关系

Fig 4.3 Relationship between synchronization error out-of-bounds probability and network scale in multi-bridge scenario

图4.3显示了同步误差大于 $1\mu s$ 的概率与网络规模之间的关系，网络规模由网络中的5G-TSN网桥数量表示。随着网络规模和网桥数量的增加，同步误差超过最低精度要求的概率也在增加。当网桥数量达到13000个时，同步误差超过 $1\mu s$ 的概率在90%以上。因此，本文应用算法进行时间戳补偿，补偿前后的结果比较如下：

图4.4说明，补偿后同步误差超过 $1\mu s$ 的概率大大降低，保持在20%以内。图4.5显示了补偿前后平均同步误差的变化。可以看出，当网络规模达到10,000或更大时，补偿前的平均同步误差达到约10微秒。然而，经过补偿后，平均同步误差被控制在900ns以内，有效地提高了使用集成5G和TSN的系统的同步精度。

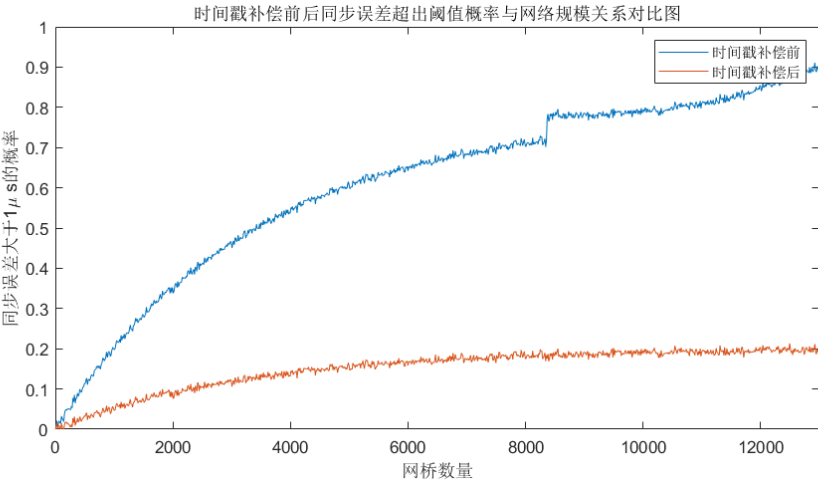


图 4.4 时间戳补偿前后同步误差超出阈值概率与网络规模关系对比图

Fig 4.4 Comparison chart of the relationship between the synchronization error exceeding the threshold probability and the network scale before and after timestamp compensation

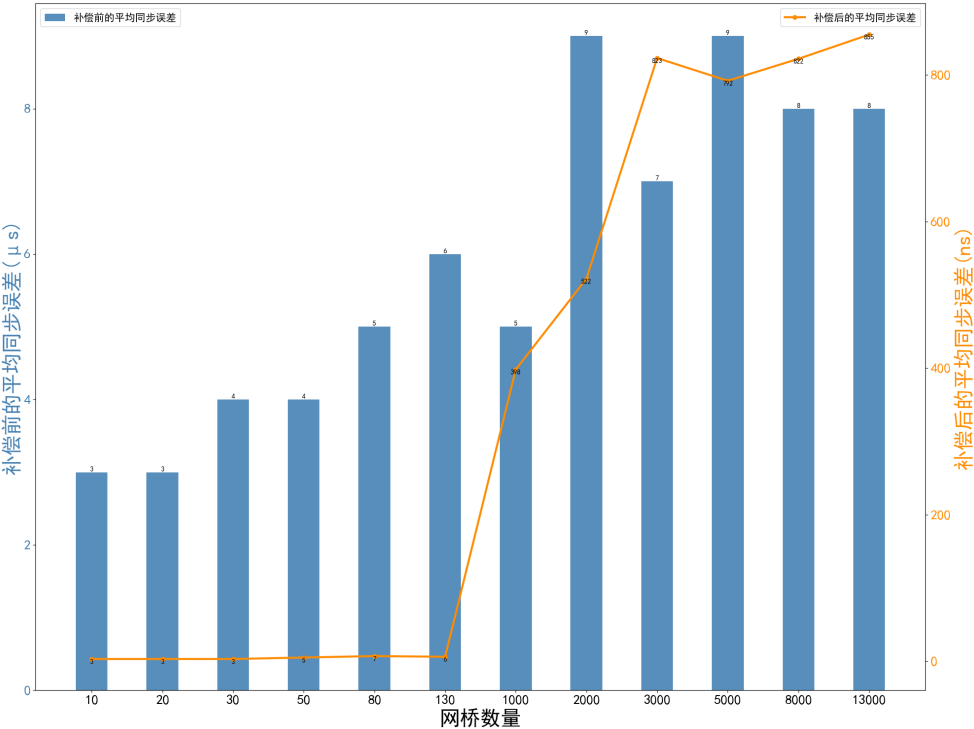


图 4.5 时间戳补偿前后平均同步误差与网络规模关系对比

Fig 4.5 Comparison of the relationship between the average synchronization error and the network scale before and after timestamp compensation

在一个智能交通系统中，信号灯、行车辅助系统、智能道路设备等都需要进行精确的时钟同步，以确保安全和高效的道路运营。例如，信号灯需要进行精确的时钟同步，以确保交叉路口的流量管理正确无误。同样，行车辅助系统需要进行精确的时钟同步，以提供实时的车辆位置和速度信息，以确保驾驶者的安全。

然而，在这种大规模的网络环境中，传统的同步方法可能无法满足这种高精度的要求。根据我们的测试，随着网络规模和网桥数量的增加，同步误差超过最低精度要求的概率也在增加。当网桥数量达到13000个时，同步误差超过 $1\mu s$ 的概率在90%以上。

为了解决这个问题，我们应用了载波间隔优化和累积误差补偿算法。测试结果显示，补偿后同步误差超过 $1\mu s$ 的概率大大降低，保持在20%以内。当网络规模达到10,000或更大时，补偿前的平均同步误差达到约10微秒。然而，经过补偿后，平均同步误差被控制在900ns以内。

这意味着，在实际的智能交通系统中，应用我们的算法可以显著提高时钟同步的精度，进一步提升交通流量管理的效率，提高行车辅助系统的精度，从而大大提高道路的安全性和效率。

## 4.5 本章小节

本章主要探讨了5G-TSN异构网络的混合时钟同步方法。首先针对核心网内部的5G-TSN网络部分，进行了SCS优化以解决同步精度和带宽利用率之间的trade-off问题，同时为了减小误码率。本章还阐述了针对大规模5G-TSN的时间戳补偿算法。当多个网桥相互连接时，需要对时间戳进行补偿和校正，以提高同步精度。

此外，本章还介绍了5G-TSN时钟同步优化仿真，分析了不同SCS（SCS）值下的同步精度。结果表明随着SCS增加，同步误差减小，通过构建优化问题，找到了在同步精度和带宽利用率之间取得平衡的SCS。另外，本节还介绍了时间戳补偿仿真，通过建立工业现场的无线节点模型，并以二叉树结构组织网络节点，评估了多网桥场景下的同步误差越界概率与网络规模关系。补偿后的结果显示，同步误差大幅降低，平均同步误差在900ns以内，有效提高了集成5G和TSN系统的同步精度。

## 第五章 全文总结

### 5.1 工作总结

本课题研究时钟同步在有线和无线异构网络中的应用，针对现有研究在大规模异构网络中的适用性、动态性和可扩展性、安全性和鲁棒性等方面存在的缺陷，提出了一种基于5G-TSN核心网络的混合架构时钟同步解决方案。主要工作总结如下：

针对工业网络的复杂网络环境带来的时钟同步精度下降问题，设计了一种有线/无线网络混合时钟同步架构，引入NSPI作为综合评估指标，用于网络分层。采用预处理方法对有向图进行处理，实现井然有序的时钟同步，并提高同步效率，降低同步延迟和抖动。通过仿真实验验证了混合架构分层算法在时钟同步性能上的优势。实验结果显示分层后时钟误差收敛速度提升至两倍，平均同步误差也从 $1\mu s$ 下降至500ns。

针对5G-TSN网络中多径衰落的问题，设计了ADFE，提升5G-TSN同步过程中的抗干扰能力。仿真实验对比了ADFE与线性均衡器在大规模复杂网络环境下的性能。仿真结果显示，ADFE在应对信道干扰方面表现优越，将误码率成功控制在0.0305附近，而线性均衡器的误码率保持在0.4802左右。

针对5G-TSN网络同步过程中累计误差过大的问题，设计了载波优化和时间戳补偿方案。通过构建优化问题，找到了在同步精度和带宽利用率之间取得平衡的SCS，提升了同步精度。时间戳补偿仿真结果显示，同步误差大幅降低，平均同步误差在900ns以内，有效提高了集成5G和TSN系统的同步精度。

### 5.2 研究课题展望

尽管本文针对大规模复杂异构网络提出了一种有效的混合架构同步方法，但是仍有一些可以去挖掘和深入的研究方向：

1. 机器学习在同步算法优化中的应用：当前研究中的时钟同步算法尚未充分利用机器学习技术，如深度学习和强化学习等<sup>[64]</sup>。未来研究

可以探索利用机器学习方法，自动调整同步参数，以适应网络环境的变化，进一步提高同步精度和鲁棒性。例如，可以考虑采用卷积神经网络（CNN）或循环神经网络（RNN）对网络拓扑和时延特征进行建模，从而实现自适应的同步策略。此外，强化学习可以用于优化同步过程中的决策，例如选择合适的同步参考源或调整同步周期。

2. 多源信息融合在异构网络同步中的应用：在有线和无线异构网络中，来自不同传感器和通信链路的信息可以共同参与同步过程。未来研究可以探讨如何有效地融合这些多源信息，以提高整体网络的同步性能和鲁棒性。例如，可以采用贝叶斯滤波、卡尔曼滤波等融合算法对时钟偏差和时延测量值进行融合，进一步提高同步精度和稳定性。此外，还可以探索利用图神经网络（GNN）等方法，对异构网络中的多源信息进行有效整合，从而实现更加精确和可靠的时钟同步。在实际应用中，可以在不过分依赖GNSS等授时源的情况下，采用一些可应用信息源实施授时服务<sup>[65]</sup>。
3. 同步安全性和隐私保护：随着网络规模的扩大和应用场景的多样化，同步过程中的安全性和隐私保护问题日益突出<sup>[66]</sup>。未来研究可以关注同步算法在保障数据安全和隐私方面的表现，设计更加安全和可靠的同步方案，以应对潜在的安全威胁和隐私泄露风险。例如，可以研究基于密码学的安全同步方案，以实现在不泄露敏感信息的情况下进行同步。此外，利用区块链技术实现分布式的信任和安全同步机制，可以有效防止单点故障和恶意攻击，从而提高同步系统的安全性。

## 参考文献

- [1] H. Kopetz and W. Ochsenreiter, “Clock synchronization in distributed real-time systems,” *IEEE Transactions on Computers*, vol. 100, no. 8, pp. 933–940, 1987.
- [2] 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 of Things Journal*, vol. 4, no. 5, pp. 1125–1142, 2017.
- [3] K.-C. Chen and S.-Y. Lien, “Machine-to-machine communications: Technologies and challenges,” *Ad Hoc Networks*, vol. 18, pp. 3–23, 2014. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570870513000395>
- [4] N. J. Gomes, P. Sehier, H. Thomas, P. Chanclou, B. Li, D. Munch, P. Assimakopoulos, S. Dixit, and V. Jungnickel, “Boosting 5g through ethernet: How evolved fronthaul can take next-generation mobile to the next level,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 13, no. 1, pp. 74–84, 2018.
- [5] J. Han and D.-K. Jeong, “A practical implementation of ieee 1588-2008 transparent clock for distributed measurement and control systems,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 59, no. 2, pp. 433–439, 2010.
- [6] 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 Network Communications*, vol. 36, pp. 56–67, 2018.
- [7] Z. Idrees, J. Granados, Y. Sun, S. Latif, L. Gong, Z. Zou, and L. Zheng, “Ieee 1588 for clock synchronization in industrial iot and related applications: a review on contributing technologies, protocols and enhancement methodologies,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 155 660–155 678, 2020.

- 
- [8] D. Jakovetić, J. Xavier, and J. M. Moura, “Fast distributed gradient methods,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 59, no. 5, pp. 1131–1146, 2014.
- [9] I. S. Association *et al.*, “IEEE standard for local and metropolitan area networks—timing and synchronization for time-sensitive applications in bridged local area networks,” *IEEE Std*, vol. 802, 2011.
- [10] Z. Chaloupka, N. Alsindi, and J. Aweya, “Clock synchronization over communication paths with queue-induced delay asymmetries,” *IEEE Communications Letters*, vol. 18, no. 9, pp. 1551–1554, 2014.
- [11] S. Johannessen, “Time synchronization in a local area network,” *IEEE control systems Magazine*, vol. 24, no. 2, pp. 61–69, 2004.
- [12] M. D. J. Teener and G. M. Garner, “Overview and timing performance of ieee 802.1 as,” in *2008 IEEE International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication*. IEEE, 2008, pp. 49–53.
- [13] 华春阳, 尹刚, “IEEE 1588v2 的发展与应用,” *电信技术*, no. 7, pp. 85–87, 2011.
- [14] E. Shereen, F. Bitard, G. Dán, T. Sel, and S. Fries, “Next steps in security for time synchronization: Experiences from implementing ieee 1588 v2. 1,” in *2019 IEEE International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control, and Communication (ISPCS)*. IEEE, 2019, pp. 1–6.
- [15] 卢灵宣, “1588v2 不对称补偿方案探讨,” *邮电设计技术*, no. 9, pp. 64–67, 2012.
- [16] T. Murakami and Y. Horiuchi, “Improvement of synchronization accuracy in ieee 1588 using a queuing estimation method,” in *2009 International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication*. IEEE, 2009, pp. 1–5.

- 
- [17] R. Subrahmanyam, “Implementation considerations for ieee 1588v2 applications in telecommunications,” in *2007 IEEE International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication*. IEEE, 2007, pp. 148–154.
- [18] N. Simanic, R. Exel, P. Loschmidt, T. Bigler, and N. Kerö, “Compensation of asymmetrical latency for ethernet clock synchronization,” in *2011 IEEE International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication*. IEEE, 2011, pp. 19–24.
- [19] S. Lee, S. Lee, and C. Hong, “An accuracy enhanced ieee 1588 synchronization protocol for dynamically changing and asymmetric wireless links,” *IEEE Communications Letters*, vol. 16, no. 2, pp. 190–192, 2011.
- [20] Z. Chaloupka, N. Alsindi, and J. Aweya, “Efficient and precise simulation model of synchronization clocks in packet networks,” in *2013 IEEE 18th International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*. IEEE, 2013, pp. 79–83.
- [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 Transactions on Communications*, vol. 67, no. 5, pp. 3624–3637, 2019.
- [22] —, “Robust clock skew and offset estimation for ieee 1588 in the presence of unexpected deterministic path delay asymmetries,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 68, no. 8, pp. 5102–5119, 2020.
- [23] X. Jia, Y. Lu, X. Wei, and W. Tao, “Improved time synchronization algorithm for wireless sensor networks based on clustering,” in *2019 IEEE 8th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC)*. IEEE, 2019, pp. 1211–1215.



- 
- [24] J. Wu, L. Zhang, Y. Bai, and Y. Sun, "Cluster-based consensus time synchronization for wireless sensor networks," *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 3, pp. 1404–1413, 2014.
- [25] P. Jia, X. Wang, and K. Zheng, "Distributed clock synchronization based on intelligent clustering in local area industrial iot systems," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16, no. 6, pp. 3697–3707, 2019.
- [26] P. Kaur *et al.*, "An energy efficient time synchronization protocol for wireless sensor networks using clustering," in *2015 IEEE Power, Communication and Information Technology Conference (PCITC)*. IEEE, 2015, pp. 671–674.
- [27] D. Lopez-Perez, I. Guvenc, and X. Chu, "Mobility management challenges in 3gpp heterogeneous networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no. 12, pp. 70–78, 2012.
- [28] T. Kazaz, M. Coutino, G. J. Janssen, G. Leus, and A.-J. van der Veen, "Joint ranging and clock synchronization for dense heterogeneous iot networks," in *2018 52nd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*. IEEE, 2018, pp. 2169–2173.
- [29] S. Gu, X. Sun, Z. Yang, T. Huang, W. Xiang, and K. Yu, "Energy-aware coded caching strategy design with resource optimization for satellite-uav-vehicle-integrated networks," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 8, pp. 5799–5811, 2021.
- [30] H. Mehrpouyan, S. D. Blostein, and T. Svensson, "A new distributed approach for achieving clock synchronization in heterogeneous networks," in *2011 IEEE Global Telecommunications Conference-GLOBECOM 2011*. IEEE, 2011, pp. 1–5.
- [31] J. Anees, H.-C. Zhang, S. Baig, B. Guene Lougou, and T. G. Robert Bona, "Hesitant fuzzy entropy-based opportunistic clustering and data fusion al-

- gorithm for heterogeneous wireless sensor networks,” *Sensors*, vol. 20, no. 3, p. 913, 2020.
- [32] M. S. Grewal, A. P. Andrews, and C. G. Bartone, “Kalman filtering,” 2020.
- [33] S. Rinaldi, D. Della Giustina, P. Ferrari, A. Flammini, and E. Sisinni, “Time synchronization over heterogeneous network for smart grid application: Design and characterization of a real case,” *Ad Hoc Networks*, vol. 50, pp. 41–57, 2016.
- [34] T. Qiu, N. Chen, K. Li, D. Qiao, and Z. Fu, “Heterogeneous ad hoc networks: Architectures, advances and challenges,” *Ad Hoc Networks*, vol. 55, pp. 143–152, 2017.
- [35] S. Z. Khong, E. Lovisari, and A. Rantzer, “A unifying framework for robust synchronization of heterogeneous networks via integral quadratic constraints,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 61, no. 5, pp. 1297–1309, 2016.
- [36] A. Boukerche, R. W. Pazzi, and J. Feng, “An end-to-end virtual environment streaming technique for thin mobile devices over heterogeneous networks,” *Computer Communications*, vol. 31, no. 11, pp. 2716–2725, 2008.
- [37] A. Larrañaga, M. C. Lucas-Estañ, I. Martinez, I. Val, and J. Gozalvez, “Analysis of 5g-tsn integration to support industry 4.0,” in *2020 25th IEEE International conference on emerging technologies and factory automation (ETFA)*, vol. 1. IEEE, 2020, pp. 1111–1114.
- [38] M. Schüngel, S. Dietrich, D. Ginhör, S.-P. Chen, and M. Kuhn, “Optimized propagation delay compensation for an improved 5g ran synchronization,” in *IECON 2021–47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE, 2021, pp. 1–6.
- [39] M. Goodarzi, D. Cvetkovski, N. Maletic, J. Gutiérrez, and E. Grass, “Synchronization in 5g: a bayesian approach,” in *2020 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*. IEEE, 2020, pp. 194–199.

- 
- [40] K. Nikhileswar, K. Prabhu, and D. Cavalcanti, “Traffic steering in edge compute devices using express data path for 5g and tsn integration,” in *2022 IEEE 18th International Conference on Factory Communication Systems (WFCS)*. IEEE, 2022, pp. 1–6.
- [41] A. Nasrallah, A. S. Thyagaturu, Z. Alharbi, C. Wang, X. Shao, M. Reisslein, and H. ElBakoury, “Ultra-low latency (ull) networks: The ieee tsn and ietf detnet standards and related 5g ull research,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 1, pp. 88–145, 2018.
- [42] D. Wang and T. Sun, “Leveraging 5g tsn in v2x communication for cloud vehicle,” in *2020 IEEE International Conference on Edge Computing (EDGE)*. IEEE, 2020, pp. 106–110.
- [43] A. Neumann, L. Wisniewski, R. S. Ganesan, P. Rost, and J. Jasperneite, “Towards integration of industrial ethernet with 5g mobile networks,” in *2018 14th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS)*. IEEE, 2018, pp. 1–4.
- [44] Z. Chai, W. Liu, M. Li, and J. Lei, “Cross domain clock synchronization based on data packet relay in 5g-tsn integrated network,” in *2021 IEEE 4th International Conference on Electronics and Communication Engineering (ICECE)*. IEEE, 2021, pp. 141–145.
- [45] W. Lei, A. C. Soong, L. Jianghua, W. Yong, B. Classon, W. Xiao, D. Mazzaresse, Z. Yang, T. Saboorian, W. Lei *et al.*, “5g industrial iot,” *5G System Design: An End to End Perspective*, pp. 515–532, 2021.
- [46] M. Schüngel, “Time synchronization in converged wired and wireless communication networks for industrial real-time application,” Ph.D. dissertation, Hochschule Darmstadt, 2022.
- [47] Y. Zhang, Q. Xu, X. Guan, C. Chen, and M. Li, “Wireless/wired integrated transmission for industrial cyber-physical systems: risk-sensitive co-design

- of 5g and tsn protocols,” *Science China Information Sciences*, vol. 65, no. 1, p. 110204, 2022.
- [48] “System architecture for the 5g system(5gs) stage 2(release16) std.” 2020.
- [49] H. Shi, A. Aijaz, and N. Jiang, “Evaluating the performance of over-the-air time synchronization for 5g and tsn integration,” in *Proc. IEEE BlackSea-Com*, 2021, pp. 1–6.
- [50] M. Schüngel, S. Dietrich, D. Ginthör, S.-P. Chen, and M. Kuhn, “Single message distribution of timing information for time synchronization in converged wired and wireless networks,” in *Proc. IEEE ETFa*, vol. 1, 2020, pp. 286–293.
- [51] Z. Chai, W. Liu, M. Li, and J. Lei, “Cross domain clock synchronization based on data packet relay in 5g-tsn integrated network,” in *Proc. IEEE ICECE*, 2021, pp. 141–145.
- [52] T. Striffler and H. D. Schotten, “The 5g transparent clock: Synchronization errors in integrated 5g-tsn industrial networks,” in *Proc. IEEE INDIN*, 2021, pp. 1–6.
- [53] A. Neumann, L. Wisniewski, R. S. Ganesan, P. Rost, and J. Jasperneite, “Towards integration of industrial ethernet with 5g mobile networks,” in *Proc. IEEE WFCS*, 2018, pp. 1–4.
- [54] “Service requirements for cyber-physical control applications in vertical domains (3gpp ts 22.104 v18.3.0),” 2021-12.
- [55] D. Patel, J. Diachina, S. Ruffini, M. De Andrade, J. Sachs, and D. P. Venmani, “Time error analysis of 5g time synchronization solutions for time aware industrial networks,” in *Proc. IEEE ISPCS*, 2021, pp. 1–6.
- [56] X. Huan, K. S. Kim, S. Lee, E. G. Lim, and A. Marshall, “A beaconless asymmetric energy-efficient time synchronization scheme for resource-constrained multi-hop wireless sensor networks,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 68, no. 3, pp. 1716–1730, 2020.

- [57] N. Sangjumba, S. Gordon, and K. Kaemarungsi, “Analysis of adaptive multi-hop time synchronization in large wireless sensor networks,” in *2016 7th International Conference of Information and Communication Technology for Embedded Systems (IC-ICTES)*. IEEE, 2016, pp. 79–84.
- [58] Z. Chi, Y. Yao, T. Xie, X. Liu, Z. Huang, W. Wang, and T. Zhu, “Ear: Exploiting uncontrollable ambient rf signals in heterogeneous networks for gesture recognition,” in *Proceedings of the 16th ACM conference on embedded networked sensor systems*, 2018, pp. 237–249.
- [59] T. Mizrahi, “Slave diversity: Using multiple paths to improve the accuracy of clock synchronization protocols,” in *2012 IEEE International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication Proceedings*. IEEE, 2012, pp. 1–6.
- [60] A. L. Fradkov and A. Y. Markov, “Adaptive synchronization of chaotic systems based on speed gradient method and passification,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, vol. 44, no. 10, pp. 905–912, 1997.
- [61] B. Xue, Z. Li, P. Lei, Y. Wang, and X. Zou, “Wicsync: a wireless multi-node clock synchronization solution based on optimized uwb two-way clock synchronization protocol,” *Measurement*, vol. 183, p. 109760, 2021.
- [62] S. Gangakhedkar, H. Cao, A. R. Ali, K. Ganesan, M. Gharba, and J. Eichinger, “Use cases, requirements and challenges of 5g communication for industrial automation,” in *2018 IEEE international conference on communications workshops (icc workshops)*. IEEE, 2018, pp. 1–6.
- [63] E. U. T. R. Access, “Requirements for support of radio resource management (3gpp ts 36.133 version 12.6. 0 release 12),” *ETSI TS*, vol. 136, no. 133, p. V11, 2015.
- [64] 刘学超, 郭改枝, 潘亮, “基于机器学习方法的无线传感网络时钟同步算法,” *现代电子技术*, vol. 41, no. 5, pp. 65–68, 2018.

- [65] 李志杰, “多源信息融合中时间同步及信息分配研究,” Master’s thesis, 华中科技大学, 2018.
- [66] 黄九梅, 洪锡联, “网络时间同步及其安全性研究,” 中国科技信息, no. 16, pp. 97–98, 2008.

## 攻读学位期间学术论文和科研成果目录

- [1] Xiang Chen, Cailian Chen, Qimin Xu. Clock Synchronization Scheme for Integrated 5G and TSN Networks in Collaborative Manufacturing Systems// The 42nd Chinese Control Conference, Tianjin, 2023. (已录用)
- [2]陈彩莲,张延洲,许齐敏,徐磊,关新平,陈相, “一种时间敏感网络门控机制流量整形与路由规划调度方法”, 专利授权号: CN111740924B
- [3]许齐敏,俞运柱,陈彩莲,陈相,吴开杰,关新平, “一种面向时间敏感网络的高可靠时钟同步系统及方法”, 专利授权号: CN111585683B
- [4]陈相, 许齐敏, 陈彩莲, “一种针对规模化异构网络的混合架构时钟同步机制”, 已提交专利事务所

## 致 谢

在三年的研究生阶段即将告一段落之际，回顾我的求学历程，既有艰辛探险的挑战，也有探索后的欣喜瞬间，这些经历都让我成长不少。在此，我要向关心和支持我的亲人、导师、同窗表示衷心的感谢。

首先，我要感激我的父母。在我最迷茫的时候，我的父母给了我继续前进的动力，让我有了最坚强的后盾。在我延毕的期间，我一直害怕回家，即使过年也是在学校度过，因为我觉得自己学业不佳，对不起父母，回去会被责怪。但当我回到家中时，父母给了我真诚的鼓励，让我重新拾起了前进的勇气，不再逃避面前的困难。

其次，我要感激陈彩莲老师。陈彩莲老师的敏感学术思路和追求卓越的品质成为了我学习的楷模。进入实验室之后，陈老师一方面提供了优越的科研环境和先进的实验设施，另一方面耐心地引导我深入研究科学问题，鼓励我不断提升思考层次。在我学习遇到困难时，陈彩莲老师也给予了最大的帮助，在陈彩莲老师的指导下，我取得了科研成果。

非常感谢实验的许齐敏老师，徐磊师兄对我的监督和指导。许老师对科研的严谨态度给我留下了深刻的印象，也将使我终身受用。

感谢思政老师王敏。王敏老师一直在关心我的心理健康和毕业进展，一直在不停地鼓励我。当我向老师提出一些她管辖范围外的问题时，老师也都耐心地为引导并尽力帮我解决问题，从来没有过厌烦，她的耐心和尽职尽责是我以后为人的榜样。

也非常感谢卢宣兆，张延州以及实验室的所有同学们，你们的陪伴和友谊是我一生中珍贵的财富。

最后，我要感谢我自己。在过去的三年里，我努力地提高自己在各个方面的能力，勇敢地走出自己的舒适区，并积累了许多人生经验。在这个过程中，我遇到了很多困难，也有过许多沮丧的时刻，感谢我能一直坚持，没有放弃。希望在未来的岁月里，我能够一往无前，继续努力成为理想中的自己。