

项目编号： 1515

上海汽车工业科技发展基金会 项目中期报告

项目名称： 信息娱乐系统与驾驶辅助系统以太网总线研究

承担单位： 同济大学

合作单位： 泛亚汽车技术中心有限公司

负 责 人： 罗峰 （第一） 金栎 （第二）

通信地址： 上海市嘉定区曹安路 4800 号同济大学

联系电话： 021-69583892 手机： 13817053378

Email : luo_feng@tongji.edu.cn

起止年月： 2015 年 12 月 1 日至 2017 年 11 月 30 日

2016 年 11 月 02 日 订

目录

1	研究背景.....	5
1.1	研究背景.....	5
1.2	国内外研究现状.....	7
1.3	研究现状小结.....	9
1.4	本课题研究意义.....	10
1.5	主要参考文献.....	10
2	研究目标.....	14
2.1	研究目标.....	14
2.2	研究内容.....	14
3	技术方案.....	15
3.1	功能分析与定义.....	15
3.2	网络拓扑结构.....	15
3.3	通信协议制定.....	16
3.4	通信协议仿真.....	16
3.5	ECU 节点硬件设计.....	17
3.6	ECU 节点 TSN 协议栈软件开发.....	18
3.7	应用程序开发.....	19
3.8	交换机开发.....	19
3.9	主控节点 ECU 开发.....	19
3.10	ECU 节点测试.....	19
3.11	系统集成测试.....	20
4	硬件平台搭建.....	21
4.1	硬件需求.....	21
4.2	MPC5604E 核心板设计.....	22
4.2.1	核心板组成.....	22
4.2.2	核心板电路.....	23
4.3	交换机核心板设计.....	24
4.3.1	核心板组成.....	24
4.3.2	核心板电路.....	25
4.4	TJA1100 模块设计.....	25
4.4.1	TJA1100 模块组成.....	26
4.4.2	TJA1100 模块电路.....	26

4.4.3	TJA1100 接口电路设计	26
4.5	摄像头节点底板设计	28
4.5.1	摄像头选型-OV9655 FIFO	28
4.5.2	摄像头选型-OV5642	29
4.5.3	底板电路设计	30
4.6	音频节点设计	32
4.7	主控节点底板设计	33
4.7.1	LCD 屏显示	33
4.7.2	PC 显示	34
5	软件开发	36
5.1	软件构架	36
5.2	节点地址定义	36
5.3	应用层报文定义	36
5.4	802.1AS 协议数据单元	37
5.5	以太网驱动	38
5.6	节点交换机管理	39
5.7	摄像头节点开发	40
5.7.1	图像采集驱动	41
6	网络特性测试与分析	42
6.1	以太网速率测试	42
6.2	以太网链路延迟	43
6.3	交换机转发延迟	44
6.4	PTP 时钟频率调整	46
7	小结	48
7.1	网络规划	48
7.2	硬件设计	48
7.3	TSN 协议栈软件开发	48
8	下一步工作计划	49
8.1	冗余节点搭建	49
8.2	各 ECU 功能、以太网相关测试	49
8.3	驾驶辅助与信息娱乐系统软硬件集成	49
8.4	驾驶辅助、信息娱乐系统应用层软件开发	49
8.5	系统集成与测试	49
8.6	优化系统参数	49

8.7	完成最终测试，整理课题成果.....	49
-----	--------------------	----

1 研究背景

1.1 研究背景

随着汽车电子化、智能化、网络化的快速发展，车内电子系统规模和复杂性日益增强，其智能化系统如车道偏离警告、后置摄像头和主动避撞系统等的越来越普遍，驾驶辅助系统（ADAS，Advanced Driver Assistant System）及娱乐信息系统等功能大幅增加，对车载网络的高实时性、高带宽等需求也越来越大。因此，这就需要更高速及具备更高可靠性的通信网络。

当前典型的汽车网络总线系统包括 CAN（Controller Area Network）、LIN（Local Interconnect Network）、FlexRay、MOST（Media Oriented Systems Transport）等几种网络标准，与这些网络选项相比，汽车以太网有很大的优势，其中最关键的一个优势是传输速度更快，能够支持高数据带宽和高通信速率，非常适合汽车市场中的 ADAS 系统，车载娱乐、视像系统应用，并将最终取代 MOST，成为汽车智能与信息娱乐主干网络。

如图 1.1 所示，我们可以看到车载网络总线系统两个重要的发展趋势，一是 CAN 将无缝升级为 CAN FD (CAN with Flexible Data-Rate)，二是汽车以太网将会取代 MOST 等现有车载信息娱乐通信网络系统。

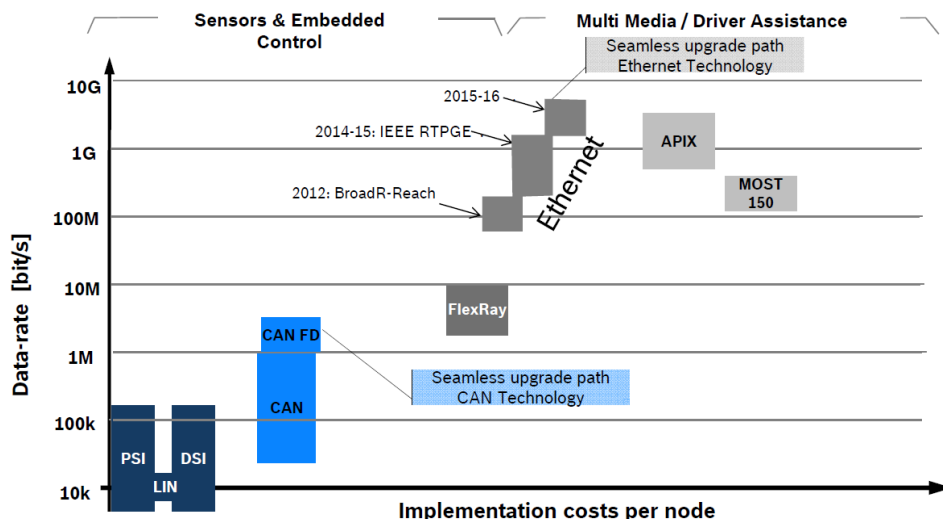


图 1.1 车载网络发展趋势

图 1.2 显示了汽车以太网发展应用的趋势。2008 年以太网开始用于汽车故障诊断；2011 年发布了国际标准 ISO 13400 “道路车辆--基于互联网协议的诊断

1.2 国内外研究现状

2011 年，博通和其他 8 个公司共同创立了开放联盟（Open Alliance），旨在推进以博通面向车载以太网开发的传输技术“BroadR-Reach”为基础的物理层应用，并确保互联性。如今，已有包括丰田、大众及沃尔沃在内的 250 余家企业加盟了 Open Alliance。

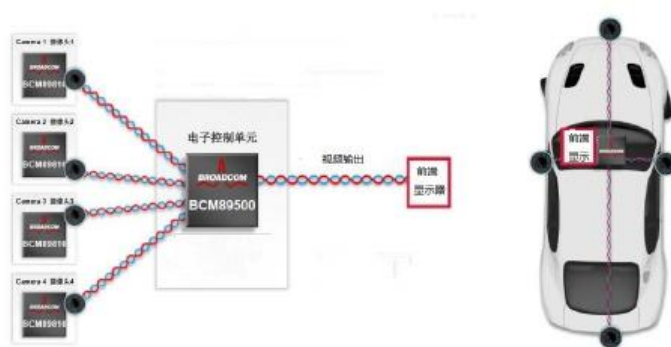


图 1.4 Open Alliance

在各个联盟为推进车载以太网标准化的同时，国内外各个整车厂以及零部件供应商也在大力研发车载以太网，计划广泛运用车载以太网，实现各种各样的应用和功能。其中包括安全系统、驾驶员信息系统、高级驾驶员辅助系统（ADAS）和娱乐系统。

目前，汽车以太网的相关标准包括以太网标准（IEEE 802.3）、时间触发以太网标准（SAE AS6802）、音视频桥接标准（AVB, Ethernet Audio/Video Bridging）和时间敏感网络标准（TSN, Time Sensitive Networking）。

以太网音视频桥接技术（AVB）遵循 IEEE 802 标准，其在传统以太网络的基础上，通过保障带宽（Bandwidth），限制延迟（Latency）和精确时钟同步（Time synchronization），提供完美的服务质量（Quality of Service，简称 QoS），以支持各种基于音频、视频的网络多媒体应用。Ethernet AVB 关注于增强传统以太网的实时音视频性能，同时又保持了 100% 向后兼容传统以太网。

AVB 由多份协议组成，内容由 IEEE 相关工作组维护，框架如图 1.5 所示：

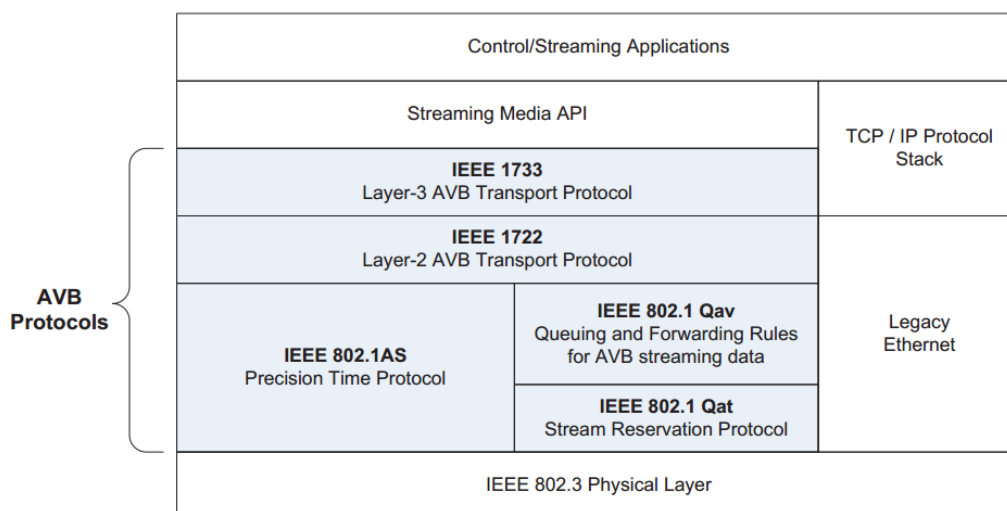


图 1.5 AVB 协议架构

AVB 协议发布后，在实际应用中发现依然存在局限，例如时间同步的非对称性，网络冗余特性等，因此各个规范依然在更新。在 2012 年 11 月，AVB 正式开始向 TSN 过渡 (<http://www.ieee802.org/1/pages/tsn.html>), 并对其中规范进行更新，当前大部分规范还处于草稿版阶段。

旧版协议名称	新版协议名称
IEEE Std 802.1AS-2011	IEEE 802.1ASbt(草稿)
IEEE Std 802.1Qat-2010	IEEE P802.1Qcc
IEEE Std 802.1Qav-2010	IEEE P802.1Qbu
	IEEE P802.1Qbv

其中部分改进如图 1.6 所示，分别是时间增强同步、无缝冗余和调度通信：

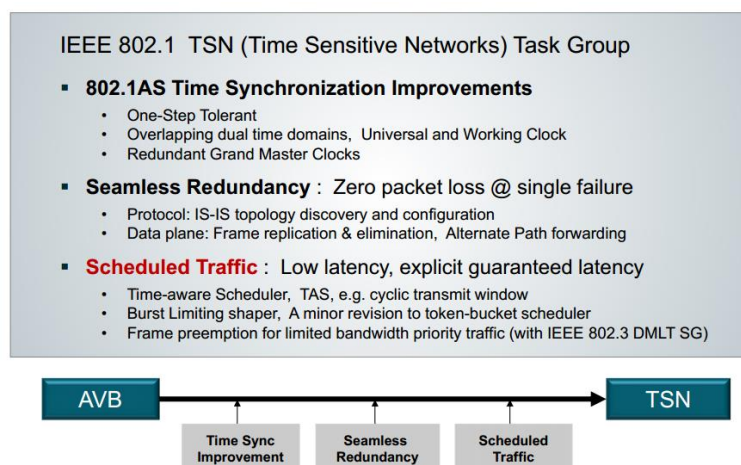


图 1.6 TSN 相对于 AVB 的改进部分

a) 增强时间同步：例如对于 IEEE 1588，同步过程中假设了发送和接收延时相同，而实际上对于光纤来说，发送和接收采用不同的物理链路，会导致 RX 和 TX 过程中延迟的不对称行。

b) 无缝冗余：通过无缝冗余技术，网络不会因为单点损坏而失效，因而可用于安全相关的应用。

c) 调度通信：为了满足调度通信和非调度通信以及本身产生冲突，需要从普通通信里分离出调度通信，并且调度该时隙下触发的事件以及保证精确的调度。

上述功能采用 TAS（Time Aware Shaper）来实现。TAS 基于时间固定发送队列，为了控制发送时隙，所有队列通过同一个 TAS 直接或间接控制。TAS 能建立完全独立的时隙通道，避免调度通信和非调度通信冲突。

1.3 研究现状小结

车载以太网未来将展现出两个发展趋势：一是传输速度将会更快。2020 年支持 1 千兆网络速率的产品将会得到应用。随着安全互联汽车的兴起以及随之而来的超高数据传输需求，以太网的普及步伐不断加快。未来汽车中的各子系统数量不断增长，这些系统需要 1Gb/s 的网络连接速度。

其次，随着汽车智能化的快速发展，汽车电子电气架构规划也将重新设计规划。车载以太网因其具有兼容性和可扩展性，灵活性和可裁剪性强，可支持多种系统和设备，具有很强的融合能力和开放的架构，未来有望成为将多种车内网络整合为一体的车内骨干网络，如图 1.7 所示。

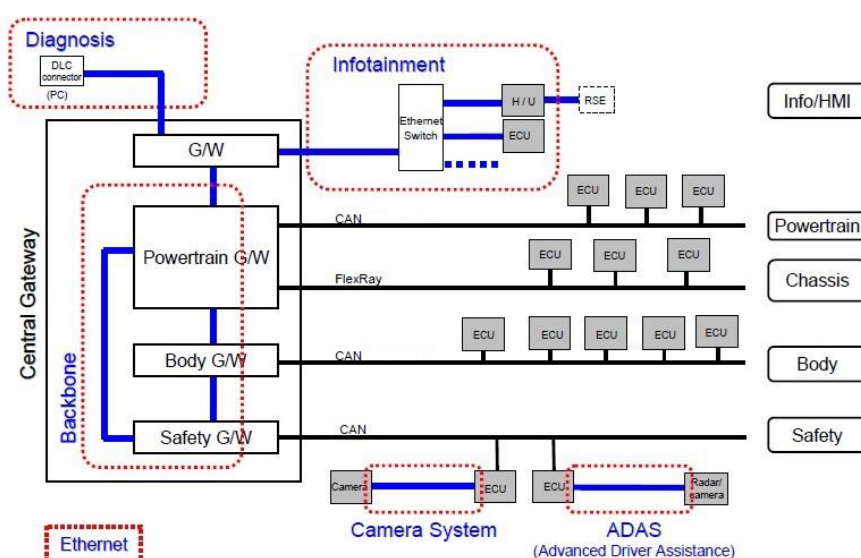


图 1.7 车载以太网作为骨干网络

1.4 本课题研究意义

本课题研究目的是通过对车载以太网和 Ethernet-TSN 技术的研究和开发，将其应用于驾驶辅助系统与信息娱乐系统。通过对车载以太网的技术研发和测试验证，掌握汽车以太网特别是 TSN 实现的基本原理和关键技术，开发适用于汽车的 Ethernet-TSN 协议栈及应用软件，确认技术可行性，并依据测试结果优化网络构架及网络参数，以实现驾驶辅助与信息娱乐系统的稳定，可靠运行。

通过该课题的研究，将使泛亚汽车技术中心全面了解和掌握车载以太网的应用技术，对上汽在车载以太网研发方面提供技术积累和实际经验，以便在该技术领域赶上国际同行发展的脚步，在未来的应用中掌握技术话语权，为研发具有自主知识产权的车载以太网产品及建立相关行业和国家标准打下坚实的基础。因此该课题的研发具有重要的意义。

1.5 主要参考文献

- [1] Stephan Sommer, RACE: A Centralized Platform Computer Based Architecture for Automotive Applications, 2013 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC), 2013
- [2] Königseder, Thomas, Automotive Ethernet, cambridge university press, 2015
- [3] OPEN Alliance, BroadR-Reach Ethernet Technology, [Online] <http://www.opensig.org/about/about-open/>
- [4] R. Bruckmeier, “Ethernet for automotive applications,” in Freescale Technol. Forum, 2010. [Online]. Available: <https://www.yumpu.com/en/document/view/21046604/ethernet-for-automotive-applicationsfreescale>
- [5] Shane Tuohy, Intra-Vehicle Networks: A Review, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015
- [6] S. Carlson, Reduced Twisted Pair Gigabit Ethernet (RTPGE) Group, 2012.[Online]. Available: <http://www.ieee802.org/3/RTPGE/>
- [7] ISO 13400, “Road vehicles — Diagnostic communication over Internet Protocol (DoIP),” 2012.
- [8] Jinsoo Lee, Extended communication interface for remote vehicle diagnosis using Internet Protocol, 2013 19th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC), 2013
- [9] SAE - AS-2D Time Triggered Systems and Architecture

- Committee, “Time-Triggered Ethernet (AS 6802),” 2009. [Online]. Available: <http://www.sae.org>
- [10] IEEE Audio/Video Bridging Task Group, [Online] <http://www.ieee802.org/1/pages/avbridges.html>
- [11] IEEE Time-Sensitive Networking Task Group, [Online] <http://www.ieee802.org/1/pages/tsn.html>
- [12] IEEE Std, Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications in Bridged Local Area Networks, 2011
- [13] IEEE Std, Virtual Bridged Local Area Networks Amendment 14: Stream Reservation Protocol (SRP), 2010
- [14] IEEE Std, Amendment 12: Forwarding and Queuing Enhancements for Time-Sensitive Streams, 2009
- [15] IEEE Time-Sensitive Networking Task Group. [Online]. Available: <http://www.ieee802.org/1/pages/tsn.html>
- [16] IEEE Std, DRAFT IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications P802.1AS-Rev/D1.0, 2015
- [17] IEEE Std, Bridges and Bridged Networks Amendment: Stream Reservation Protocol (SRP) Enhancements and Performance Improvements P802.1Qcc/D0.5, 2015
- [18] IEEE Std, Draft Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Bridges and Bridged Networks—Amendment: Frame Preemption P802.1Qbu/D3.0, 2015
- [19] IEEE Std, DRAFT IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Bridges and Bridged Networks—Amendment: Enhancements for Scheduled Traffic Draft P802.1Qbv/D3.1, 2015
- [20] IEEE Std, Draft Standard for Local and metropolitan area networks—Bridges and Bridged Networks —Amendment: Path Control and Reservation, 2015
- [21] IEEE Std, IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems, 2008
- [22] Lu Huang, Management Support for Automatic Measurement of Link Delay Asymmetry, [Online] <http://www.ieee802.org/1/files/public/docs2011/asbt-huang-measurement-of-link-delay-asymmetry-1031-v00.pdf>, 2011
- [23] Nguyen Xuan Tien and Jong Myung Rhee, FHT: A Novel Approach for Filtering

- High-Availability Seamless Redundancy (HSR) Traffic, ENERGIES, 07/2015
- [24]Giuliana Alderisi, Gaetano Patti, Introducing Support for Scheduled Traffic over IEEE Audio Video Bridging Networks, IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation - 2013
- [25]Christian Boiger, Gates vs. Windows and Scheduled Traffic, IEEE 802.1 Interim, 2013
- [26]Soeren Rumpf, Till Steinbach, Software Stacks for Mixed-critical Applications: Consolidating IEEE 802.1 AVB and Time-triggered Ethernet in Next-generation Automotive Electronics, 2014 IEEE Fourth International Conference on Consumer Electronics Berlin (ICCE-Berlin), 2014
- [27]H.-T. Lim, D. Herrscher, M. J. Walzl, and F. Chaari, "Performance Analysis of the IEEE 802.1 Ethernet Audio/Video Bridging Standard," in 5th International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques (SIMUTools 2012), Sirmione-Desenzano, Italy, 2012
- [28]Sommer, Stephan; Camek, Alexander, RACE: A Centralized Platform Computer Based Architecture for Automotive Applications, 2013 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC), 2013,
- [29]New Trends in Automotive Architectures, New Trends in Automotive Architectures, 2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems, 2015
- [30]Yong Kim and Masa Nakamura , Automotive Ethernet Network Requirements, [online]
<http://grouper.ieee.org/groups/1722/contributions/2011/new-avb-KimNakamura-automotive-network-requirements-0311.pdf>, 2011
- [31]OPEN Alliance , ECU and Network Test, Test Specification ECU, 2015
- [32]IEEE Std, IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Media Access Control (MAC) Bridges and Virtual Bridged Local Area Networks, IEEE Std, 2011
- [33]IEEE Std, IEEE Standard for Layer 2 Transport Protocol for Time-Sensitive Applications in Bridged Local Area Networks, 2011
- [34]Lucia Lo Bello, The case for Ethernet in Automotive Communications, ACM SIGBED Review, 12/2011
- [35]Broadcom Corporation, BroadR-Reach Physical Layer Transceiver Specification For Automotive Applications V3.0, Broadcom Corporation, 5/2014

- [36]Stephan Kehrer and Oliver Kleineberg, A comparison of Fault-Tolerance Concepts for IEEE 802.1 Time Sensitive Networks (TSN), ETFA, 2014
- [37]Ken Bisson, SAE AS6802 DETERMINISTIC ETHERNET NETWORK SOLUTION, Avionics Interface Technologies, 2011
- [38]Bruno Dutertre, MODEL-BASED ANALYSIS OF TIMED-TRIGGERED ETHERNET, IEEE/AIAA 31st Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2012
- [39]Giuliana Alderisi, Simulative Assessments of IEEE 802.1 Ethernet AVB and Time-Triggered Ethernet for Advanced Driver Assistance Systems and In-Car Infotainment, IEEE Vehicular Networking Conference (VNC), 2012
- [40]Philipp Meyer, Extending IEEE 802.1 AVB with Time-triggered Scheduling: A Simulation Study of the Coexistence of Synchronous and Asynchronous Traffic, IEEE Vehicular Networking Conference, 2013
- [41]M. D. J. Teener and G. M. Garner, “Overview and timing performance of ieee 802.1as,” in IEEE International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication (ISPCS 2008), 2008
- [42]H.-T. Lim, K. Weckemann, and D. Herrscher, “Performance Study of an In-Car Switched Ethernet Network without Prioritization,” in Communication Technologies for Vehicles, ser. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin / Heidelberg, 2011, vol. 6596, pp. 165–175.

2 研究目标

2.1 研究目标

通过该课题的研究,将使泛亚汽车技术中心全面了解和掌握车载以太网的应用技术,对上汽在车载以太网研发方面提供技术积累和实际经验,以便在该技术领域赶上国际同行发展的脚步,在未来的应用中掌握技术话语权,为研发具有自主知识产权的车载以太网产品及建立相关行业和国家标准打下坚实的基础。

2.2 研究内容

本课题研究内容为研发车载驾驶辅助与信息娱乐以太网总线系统,同济大学汽车学院研发团队将根据泛亚汽车技术中心的需求,确定课题系统方案,设计车载以太网系统构架,开发以太网 TSN 协议栈,基于协议栈开发相关节点,交换机,并对其进行集成,优化测试。开发车载驾驶辅助与信息娱乐演示系统,并 TSN 协议栈集成其中,同时开发应用层软件,进行集成测试,优化系统参数。

3 技术方案

课题研究将采用汽车电子系统开发的标准 V 字型开发模式，技术路线如下：系统功能分析与定义，网络拓扑结构设计，网络通信协议制定及仿真，以太网通信 ECU 节点硬件设计，节点 TSN 协议栈软件开发，应用软件开发，交换机开发，主控 ECU 节点软硬件开发，ECU 节点测试，网络系统集成测试。

3.1 功能分析与定义

根据企业提出的相关技术要求，模拟真实车辆环境，定义为基于车载以太网通信与信息娱乐和驾驶辅助系统。系统功能定义如下：

节点	数量	作用	物理层
测距雷达	3 个	远距雷达 1 个，近距雷达 2 个，能够对远距离障碍物测距及识别，用于智能车防撞和避障	CAN BroadR-Reach
超声波雷达	8 个	能够对近距离（10 米内）的障碍物测距，用于智能车防撞和避障	CAN BroadR-Reach
摄像头节点	4 个	用于模拟车道偏移识别，自动泊车等驾驶辅助功能中所用到的摄像头模块	BroadR-Reach
音频节点	1 个	用于模拟信息娱乐系统中音响节点	BroadR-Reach
主控节点	1 个	控制摄像头模块 显示摄像头信息 对摄像头信息进行处理 控制音频节点 传输对各节点的控制命令	BroadR-Reach

在整个网络系统中还存在若干网关，用于各个节点互联。

3.2 网络拓扑结构

依据信息娱乐和驾驶辅助系统的功能定义，设计基于车载以太网连接的通信

与控制网络系统拓扑结构如图 3.1 所示：

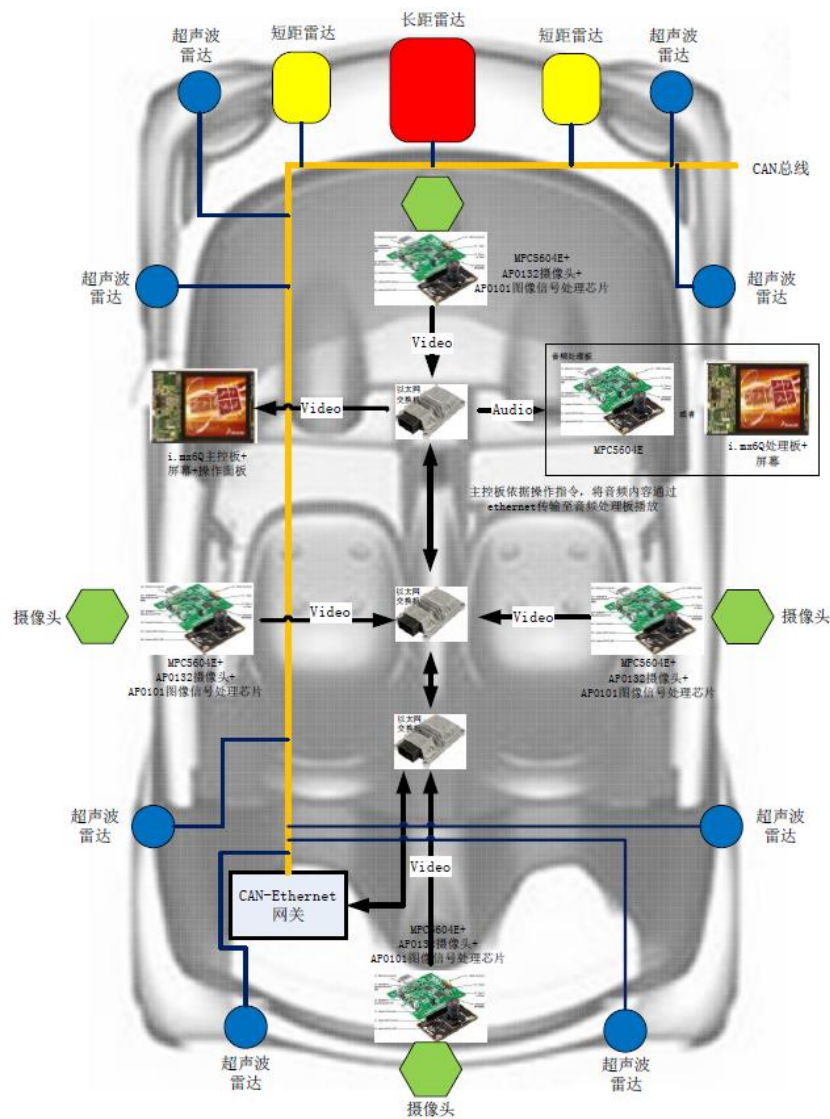


图 3.1 车载以太网拓扑结构

3.3 通信协议制定

根据企业要求进行制定基于车载以太网的驾驶辅助及信息娱乐系统通信协议。定义每个节点的通信报文内容和特性，制定网络管理策略和故障诊断协议。

3.4 通信协议仿真

采用 CANoe Option Ethernet 进行以太网通信系统仿真，针对通信协议会中

可能会产生的时延、丢包、抖动、乱序、重复报文、竞争流量等一系列问题，采用仿真软件验证通信协议是否完整与可靠，在极端条件下能否满足预定的通信功能要求。

3.5 ECU 节点硬件设计

按照功能定义，ECU 节点需采用 BroadR-Reach 车载以太网配合摄像头或音频设备工作。

设计方案基于飞思卡尔 MPC5604E+BroadR-Reach 车载以太网芯片设计单个 ECU 节点。

MPC5604E 包含以太网控制器，IEEE 1588 模块，视频压缩模块，可用于以太网收发，时间同步以及视频传输，满足 TSN 协议栈开发的底层要求。

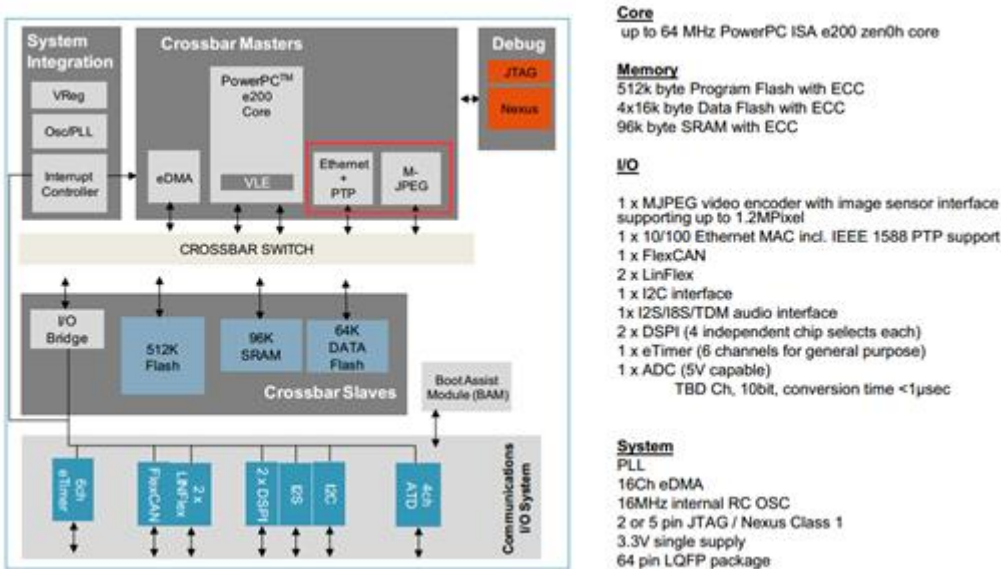


图 3.2 飞思卡尔 MPC5604E 以太网控制器

BroadR-Reach 车载以太网芯片可选用博通公司 BCM89810 芯片（或恩智浦的 TJA1100），该芯片支持在单对无屏蔽双绞线上 100Mbps 速率通讯，并且支持低功耗电源管理，与当前以太网 MII 接口兼容，设计方便。

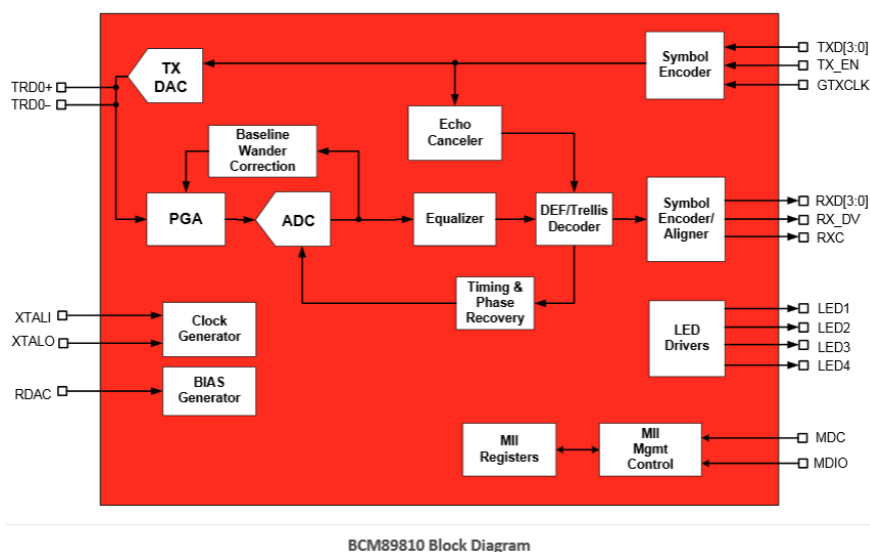


图 3.3 博通公司 BCM89810 芯片

基于节点属性，还需开发对应的硬件。对于摄像头节点，需添加摄像头模块支持。对于音频模块，需添加发声装置支持。

3.6 ECU 节点 TSN 协议栈软件开发

按照企业要求，除常规以太网通讯外，ECU 软件需支持 TSN 协议。当前 TSN 协议处于草稿版阶段，还未公布，其分布如下，ECU 内部代码则参考 TSN 构架编写。

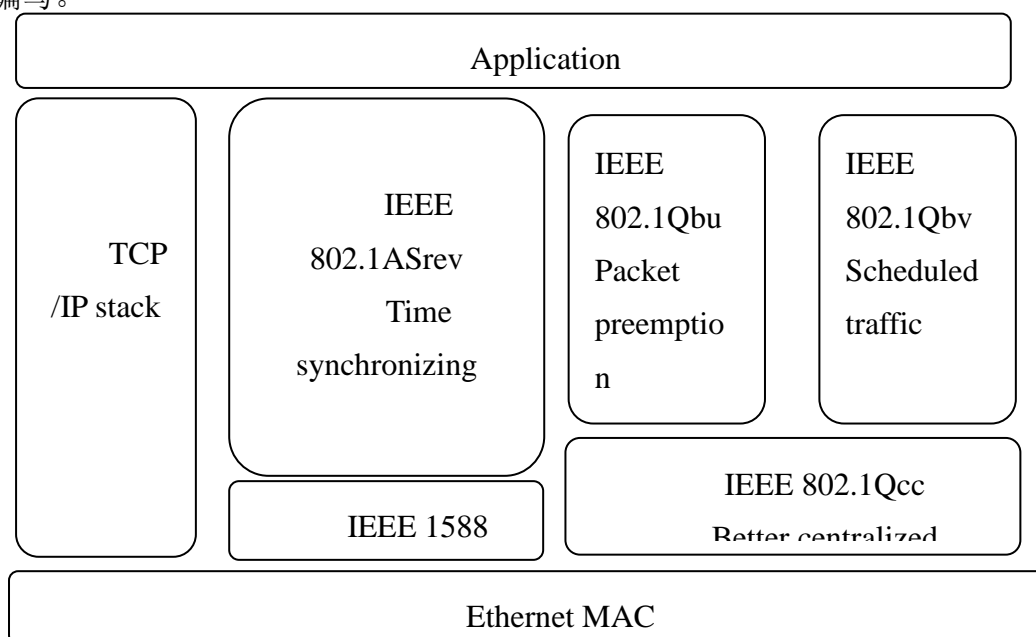


图 3.4 TSN 协议栈软件架构

3.7 应用程序开发

系统网络节点功能定义完毕后，可为各个节点开发音频、视频等通信与控制应用层程序用于演示。同时也可基于 DoIP (Diagnostics over Internet Protocol) 为节点开发诊断程序，扩展节点应用能力。

3.8 交换机开发

由于博通以太网通讯形式为点对点通讯，因此各个节点的互联需要交换机支持。当前 NXP 公司已经发布的交换机芯片为 SJA1105，该芯片包含 5 个以太网接口，可用于交换机设计，方便调试。同时芯片支持 IEEE 802.1AS 协议以及部分 TSN 协议，因此可以用于与 TSN 节点交互。

3.9 主控节点 ECU 开发

主控节点需要显示，处理视频，传输音频，因此采用 Freescale i.mx6 处理器，内部包含视频处理，显示模块，支持以太网以及 IEEE 1588 同步，可实现演示系统所需功能。

3.10 ECU 节点测试

为保证 ECU 的设计质量，需对 ECU 进行节点测试。测试时可采用当前已有的车以太网通讯工具，验证 ECU 的通讯过程是否满足协议需求，保证其通讯一致性。

测试时可采用当前已有的车以太网通讯工具，将其与被测件相连进行点对点连接，仿真剩余总线，测试通讯有效性，同时监控当前网络当前吞吐量，带宽，时延，抖动，丢包等性能指标。对于一些 ECU 特有的控制逻辑，编写测试脚本完成 ECU 的控制功能测试。

为测量节点基于 802.1AS 协议校准后的同步性能，可利用示波器搭建测试电路，其中节点输出基于 802.1AS 协议所同步的时钟波形到示波器，通过对比示波器波形，得到同步效果的精确显示。同时也可加入交换机，以验证交换机状态（高负载，低负载）对同步性能的影响。

3.11 系统集成测试

在 ECU 节点，交换机，主节点开发、测试完毕后，可根据网络拓扑结构进行组网集成测试，此时以太网工具可作为监控节点插入不同的位置执行网络分析，验证整个网络在不同工作模式下系统性能是否达到设计要求。

4 硬件平台搭建

4.1 硬件需求

按照通信需求，网络需要具有同步，实时，无缝冗余等特性，同时采用 BroadR-Reach 通信技术，因此采用 NXP 公司以太网收发器 TJA1100 和交换机芯片 SJA1105TEL。

经过了解芯片特性，交换机的冗余特性为“支持实时报文环形冗余”，因此网络结构必须采用环形冗余结构，如下图所示：

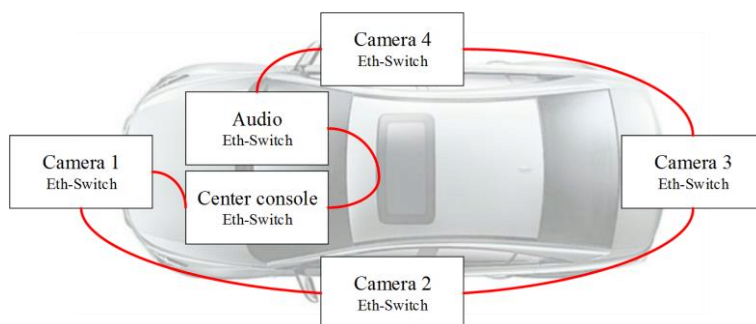


图 4.1 环形冗余结构

在环形网络中，每个节点均有两个以太网接口用于连接上一个节点和下一个节点。在节点内部需要区分报文需要本节点接收或者转发给下一个节点，这部分逻辑需要交换机完成，因此每个节点具有以下基本硬件结构：

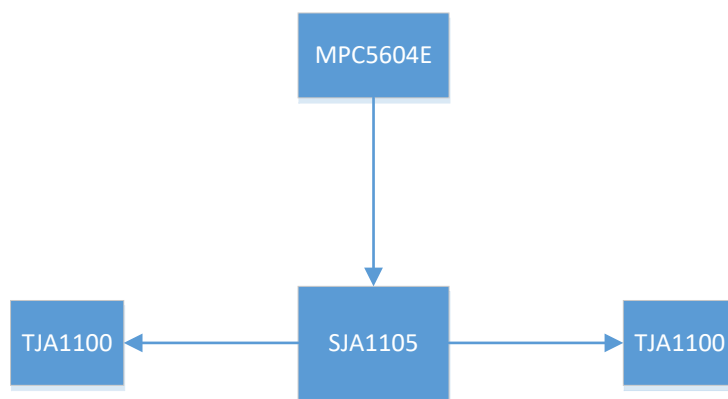


图 4.2 节点基本硬件结构

由于各个节点均具有该基本结构，因此设计时把通用部分设计为核心板模块，再通过底板组合起来，各个节点组成如下：

节点名称	组成	数量
摄像头节点	MPC5604E 核心板	1
	SJA1105 核心版	1
	TJA1100 收发器模块	2
	摄像头模块	1
	摄像头节点底板	1
音频节点	MPC5604E 核心板	1
	SJA1105 核心版	1
	TJA1100 收发器模块	2
	音频模块	1
	音频节点底板	1
主控节点	MPC5604E 核心板	1
	SJA1105 核心版	1
	TJA1100 收发器模块	2
	标准以太网模块	1
	显示节点底板	1

4.2 MPC5604E 核心板设计

本项目中各个节点均包含 MPC5604E 作为控制器，设计时将单片机设计成通用最小模块，通过核心板的形式插在各个节点底板上，减少硬件重复设计，便于故障节点更换。

4.2.1 核心板组成

核心板包括以下部分：

- MPC5604E 单片机；
- 晶振电路，用于提供 25Mhz 基准频率；

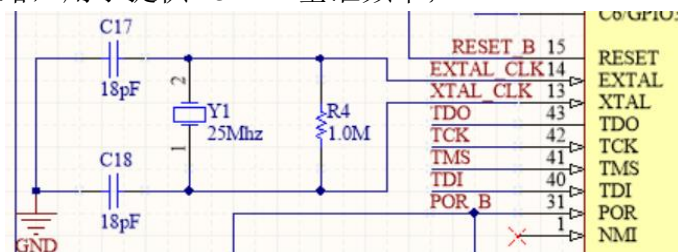


图 4.3 晶振电路

c) 代码下载，调试接口；

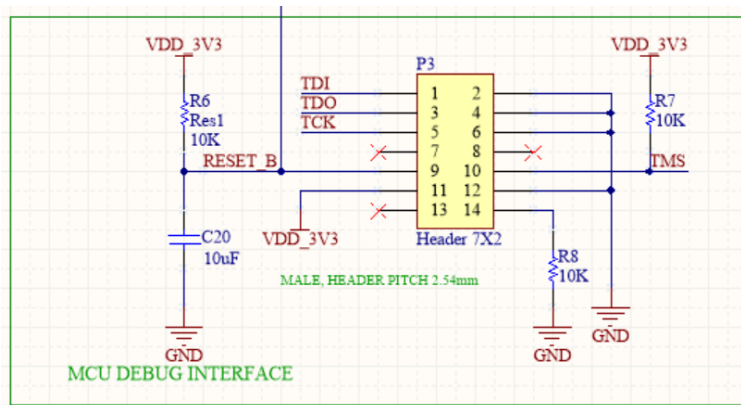


图 4.4 SWD 调试接口

d) 单片机需要 1.2V, 3.3V 电压，因此加入相关稳压电路，由于单片机电流不大，采用线性稳压器 ASM1117 即可满足要求；

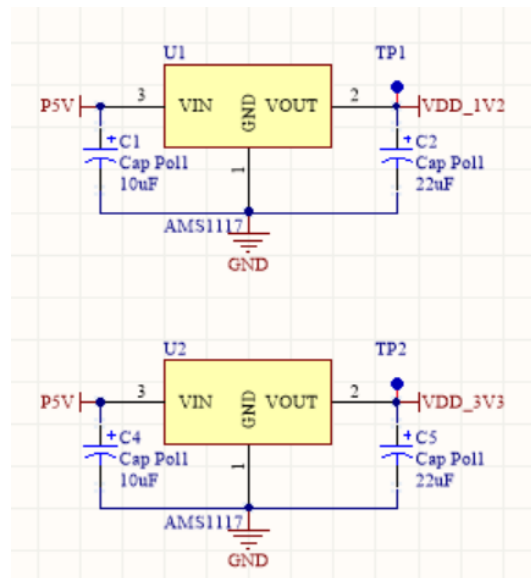


图 4.5 稳压电路

e) 引出所有剩余 IO 接口；

4.2.2 核心板电路

核心板电路如图 4.6 所示，可以看到单片机所有 IO 口通过上方和下方接插件引出，每个节点底板均支持该模块接入。当前该模块已经完成设计，制作，可以稳定工作。

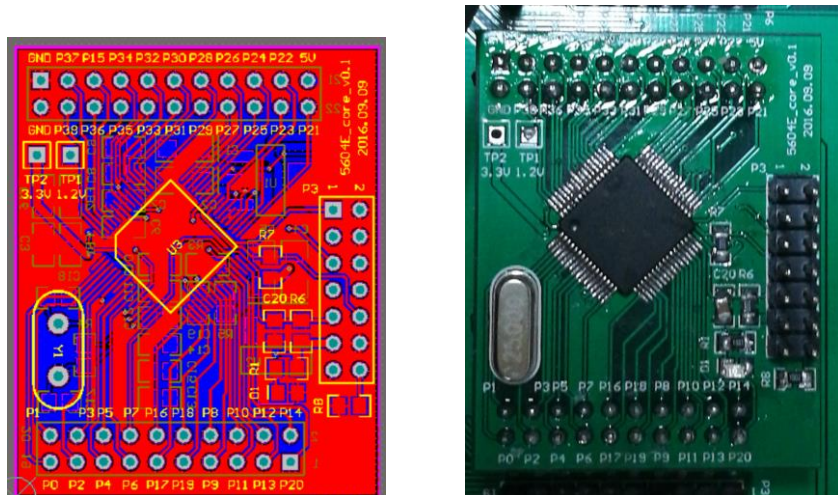


图 4.6 节点核心板硬件电路

4.3 交换机核心板设计

与 MPC5604E 设计为核心板的方式类似，由于每个节点内部都存在交换机，因此为 SJA1105 芯片设计相关核心板。SJA1105 采用 BGA 封装，手工焊接难度大，工作过程中如果发生故障很难维修。采用核心板设计的方式可以提高电路互换性，便于后期维护。

SJA1105 和单片机之间除了 MII 的标准以太网连接外，还需要通过 SPI 端口配置交换机工作状态，通过 PTP 时钟线进行同步操作，因此 SJA1105 除了引出 MII 接口外还需引出其他控制接口。

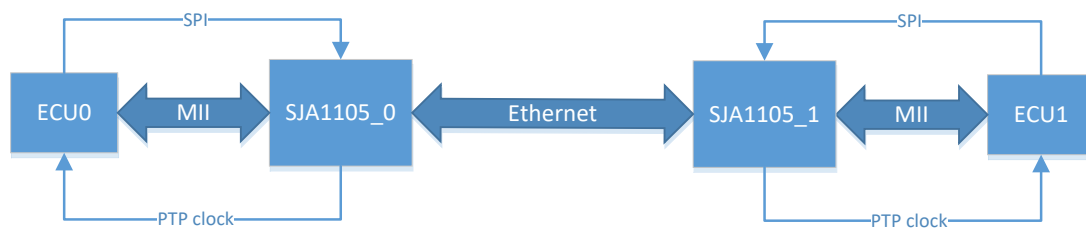


图 4.7 交换机与单片机连接示意图

4.3.1 核心板组成

SJA1105 交换机核心模块包括一下部分：

- SJA1105 芯片；
- 晶振电路，用于提供 25Mhz 基准频率；
- 1.2V，3.3V 稳压电压；

d) 引出 5 路以太网 MII 接口;

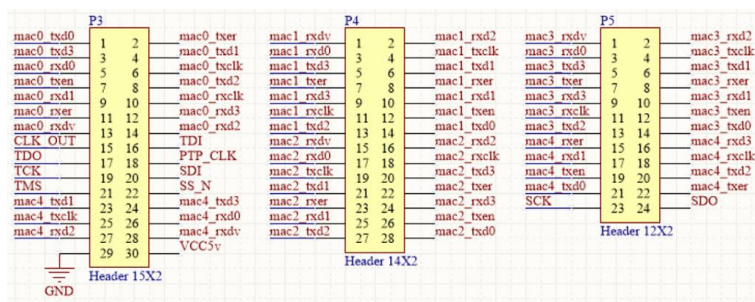


图 4.8 交换机接口

4.3.2 核心板电路

核心板电路如下图所示，由于 BGA 封装扇出困难，因此采用 4 层电路板设计，最小单边焊盘为 0.15mm，这导致加工成本增加。通过核心板的方式，最小化本部分电路，也能够起到节约成本的作用。

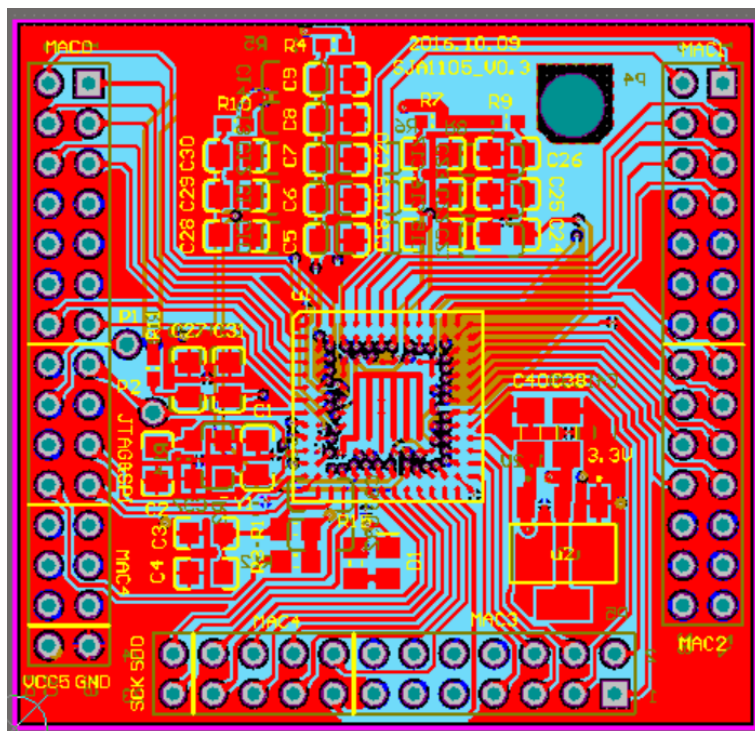


图 4.9 交换机核心板电路图

4.4 TJA1100 模块设计

网络中每个节点均需要两个以太网接口，因此 TJA1100 部分也设计为模块形式。同时由于以太网 MII 接口为标准接口，因此底板可以自由更换 TJA1100

模块和标准以太网模块，便于调试。

4.4.1 TJA1100 模块组成

TJA1100 模块的设计主要参考 NXP 公司提供的相关资料，并经过反复改版设计，修改硬件 BUG 并使其便于调试。每个模块包括以下部分：

- a) TJA1100 芯片；
- b) 电源滤波；
- c) BroadR-Reach 输出电路；
- d) 晶振电路；
- e) MII, MDIO 接口；
- f) BroadR-Reach 专用接插件；
- g) TJA1100 模式配置电路；

4.4.2 TJA1100 模块电路

TJA1100 模块电路如图 4.10 所示，实际使用过程中由于芯片发热量较大，因此在芯片下方采用较大的焊盘散热，同时在模块芯片上方也可添加散热片。

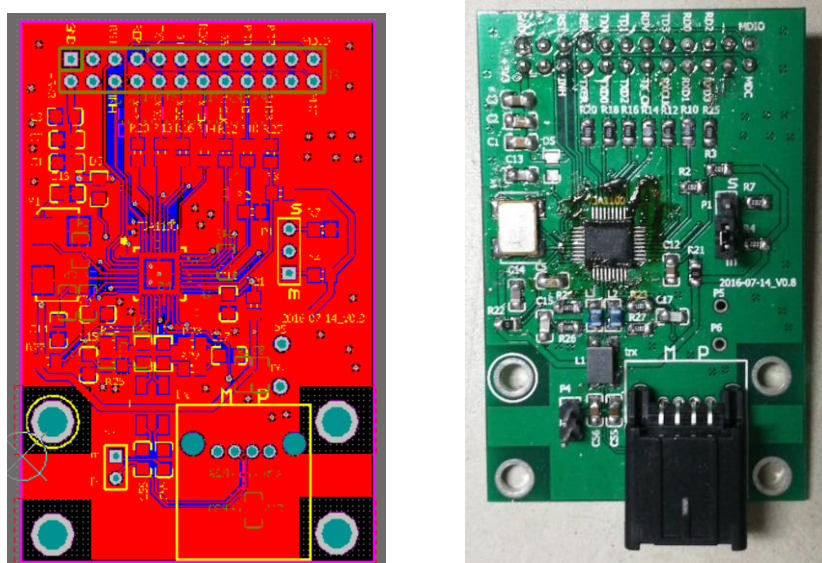


图 4.10 TJA1100 模块电路图

4.4.3 TJA1100 接口电路设计

TJA1100 采用 BroadR-Reach 通信技术，属于本项目重点内容，因此需要对其工作状态反复验证。

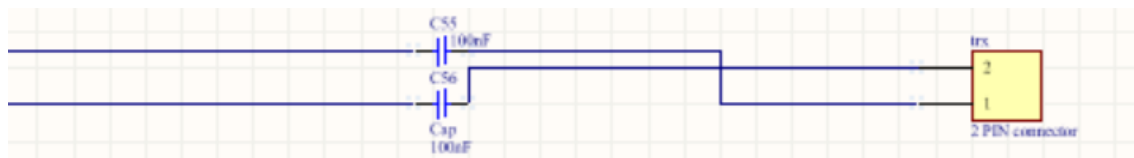


图 4.11 TJA1100 初期接口电路

调试初期并未对信号输出电路进行优化，只是如图 4.11 所示简单将其接到接插件输出，虽然模块之间能够通信，但是偶尔会出现数据错误。实际对以太网波形采样后发现输出波形存在杂波，波形质量较差。

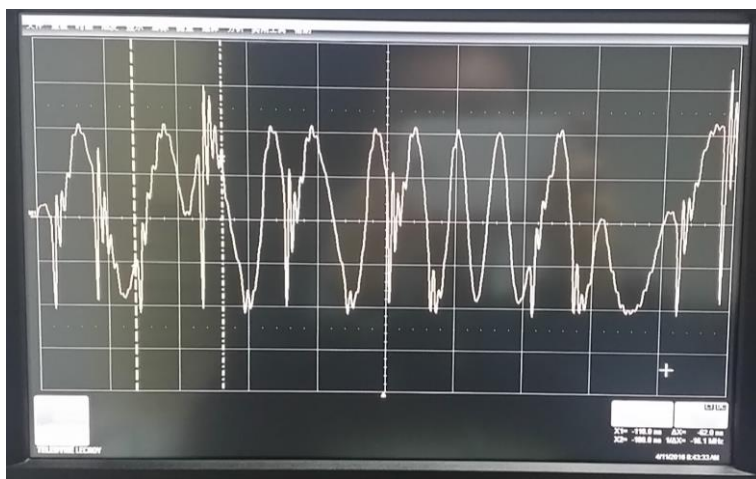


图 4.12 初期以太网模块输出波形

为了解决该问题，在设计上采用 NXP 手册中推荐电路，通过电感，电阻等元件对匹配波形阻抗，成功解决接口电路波形反射问题。

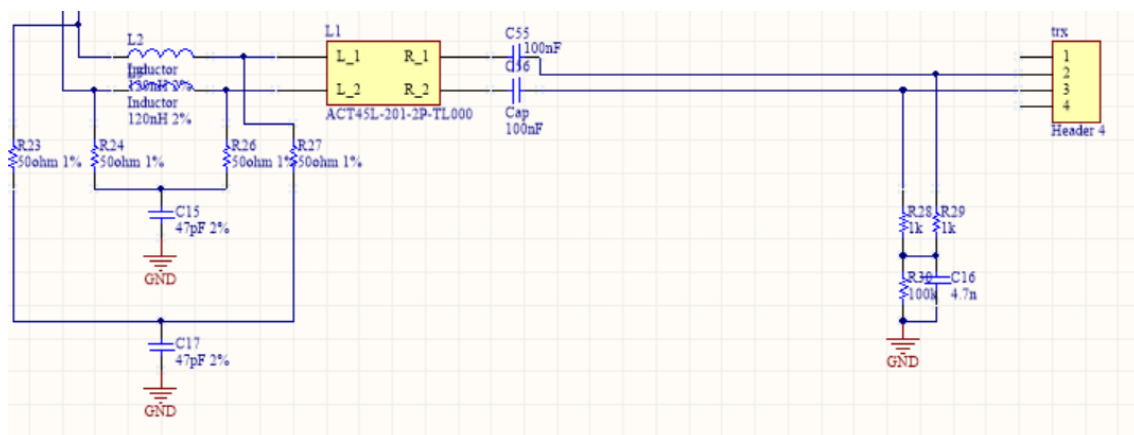


图 4.13 目前以太网模块接口电路

通过添加阻抗匹配器件，成功解决波形反射杂波问题，模块可以正常工作。实际波形如下图所示，可以看到杂波问题明显获得改善。

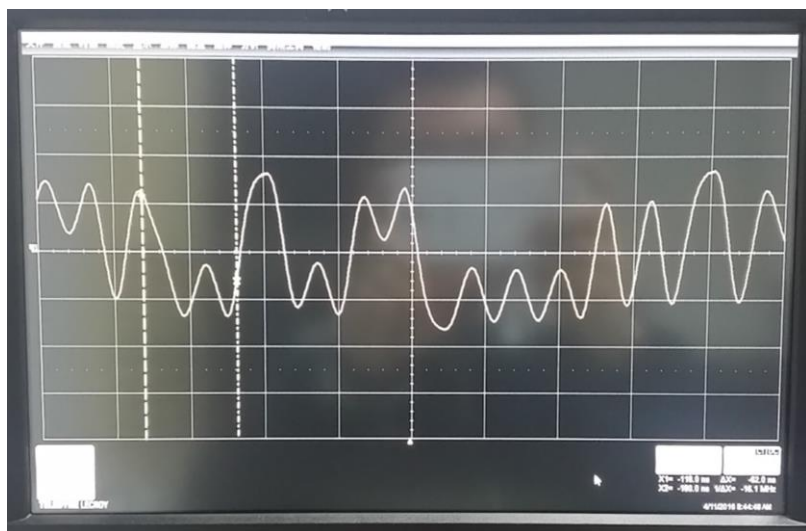


图 4.14 目前以太网模块输出波形

4.5 摄像头节点底板设计

摄像头底板上包含之前设计的三种核心模块以及摄像头模块。由于摄像头模块较为复杂，并且和网络通信关系不大，因此采购现有模块加入设计。

4.5.1 摄像头选型-OV9655 FIFO

在设计过程中，初步调试选用的是 30W 像素摄像头 OV9655，该摄像头模块自带 FIFO 电路，因此无需单片机硬件采样支持，直接使用 IO 口读取 FIFO 内容即可，可以很方便调试。如下图所示，MPC5604E 将摄像头通过 IO 口采样后直接通过以太网发送给主控节点。

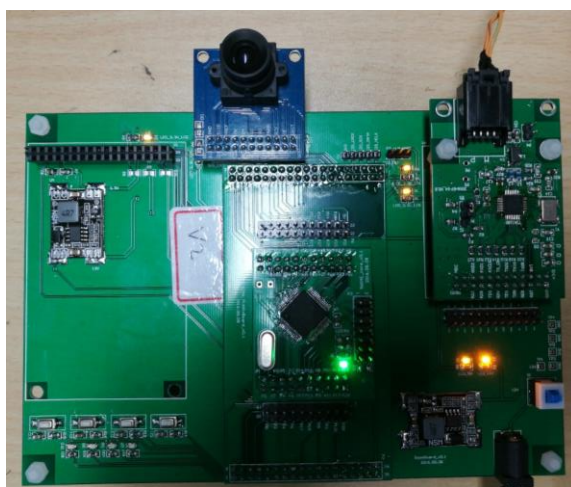


图 4.15 摄像头节点

使用过程中由于对应的 LCD 显示屏分辨率为 320*160，因此摄像头采样分辨率也使用 320*160 的 RGB 模式，通过以太网将原始图像信息传输到 LCD 显示节点。

实际使用下来后发现该方案存在以下问题：

a) 摄像头原始数据量太大。在 15FPS 320*160 RGB565 的工作模式下，数据量为每秒 $15 \times 320 \times 160 \times 2 = 1536000$ 字节，即占用 $1536000 \times 8 / 1000000000 = 12.2\%$ ，加上帧间间隔，报文额外数据等，实际带宽使用率为 19%。当前网络拓扑需要 4 个摄像头，则需要 76% 带宽。而实际观察摄像头信息时，可以发现由于实际环境中光线不会发生突变，报文中大量数据均为重复数据，因此图像压缩后传输效率更高，更合理，并且 AVB 协议要求带宽不能超过 75%，因此必须对图像信息进行压缩。

b) 摄像头实际工作效果较差。由于该摄像头较为低端，其动态特性，色彩效果均不能达到演示需求。图 4.16 为该摄像头采集到的视频，可以看到虽然能够捕捉到灯光，但是其他部分细节几乎完全丢失。通过调节采集分辨率也无法提高图片效果。



图 4.16 该摄像头采集到的视频图像

4.5.2 摄像头选型-OV5642

由于 OV9655 存在缺点，因此对摄像头重新进行选型。由于 MPC5604E 带有图片压缩模块，可以对 YUV 格式图像信息进行硬件压缩（图 4.17 为硬件压缩工作模式），因此选择色彩效果更好，像素更高的 OV5642 摄像头。

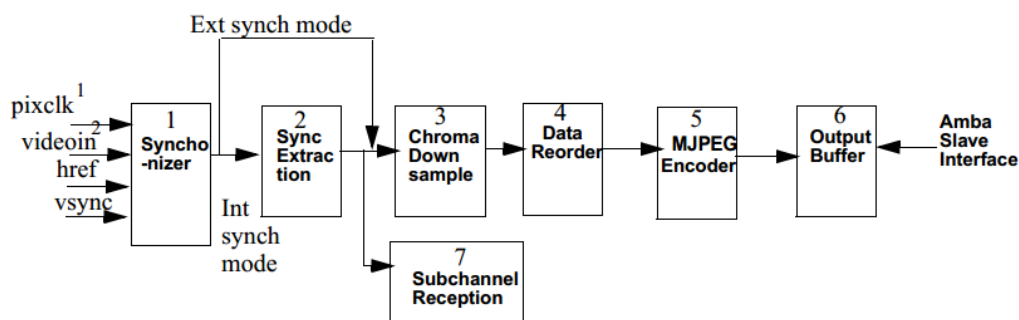


图 4.17 硬件压缩工作模式

经过配置，当前摄像头稳定工作在 640*480，15fps 模式下，通过图像压缩模块，带宽使用率为 8%左右，可以满足传输需求，同时图片效果更好。



图 4.18 摄像头采集到的视频图像

4.5.3 底板电路设计

底板作用在于连接 TJA1100，SJA1105，MPC5604E 和摄像头，因此需要将各个模块添加到底板上，下图为 TJA1100 模块接口，可以看到当前模块被接到交换机 3 号口，而 MDIO 没有使用。

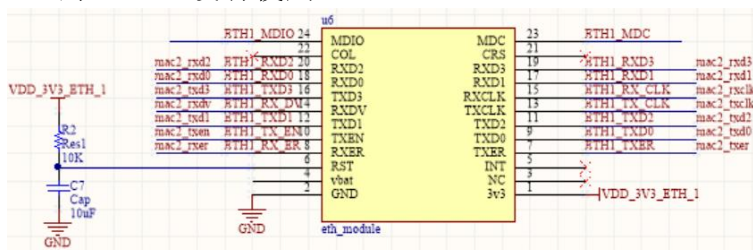


图 4.19 TJA1100 接口

下图是 SJA1105 接口，可以看出所有 MAC 接口，PTP 时钟，SPI 接口均引出。由于核心板已经封装大部分硬件细节，因此底版只需将连接相关端口。

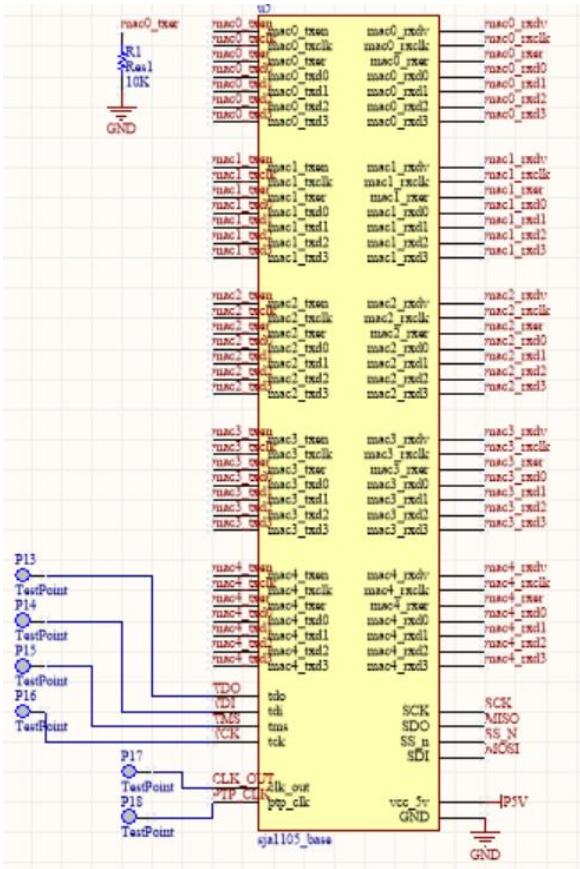


图 4.20 SJA1105 接口

底板 PCB 设计如图 4.21 所示，其中 1、2 为 TJA1100 收发器模块，3 为交换机核心板，4 为 MPC5604E 核心版，5 为摄像头模块。除此外还有电源，开关，调试接口等常规电路。

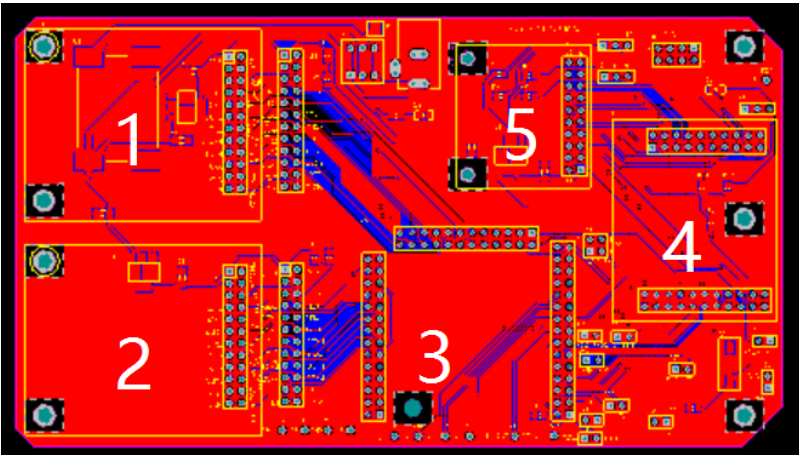


图 4.21 底板电路图

4.6 音频节点设计

音频节点的设计和摄像头节点比较类似，除了摄像头模块变为音频模块，其他部分基本一致。MPC5604E 自带音频 IIS 输出模块，但是由于 IIS 外部电路较为复杂，同时需要对音频格式进行解析，因此采用外置的音频解析模块。下图所示音频模块采用简单的 SPI 通信，可以直接将 MP3 文件通过 SPI 传输后播放，简化硬件设计和软件设计，因此采用该模块输出音频信息。

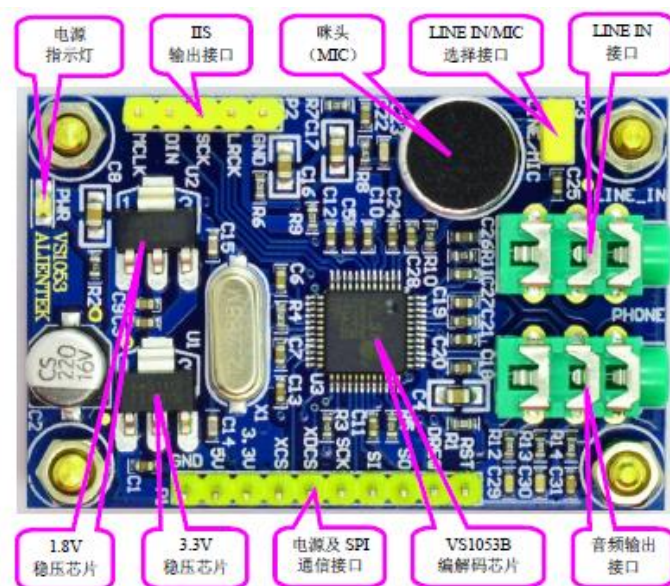


图 4.22 音频模块

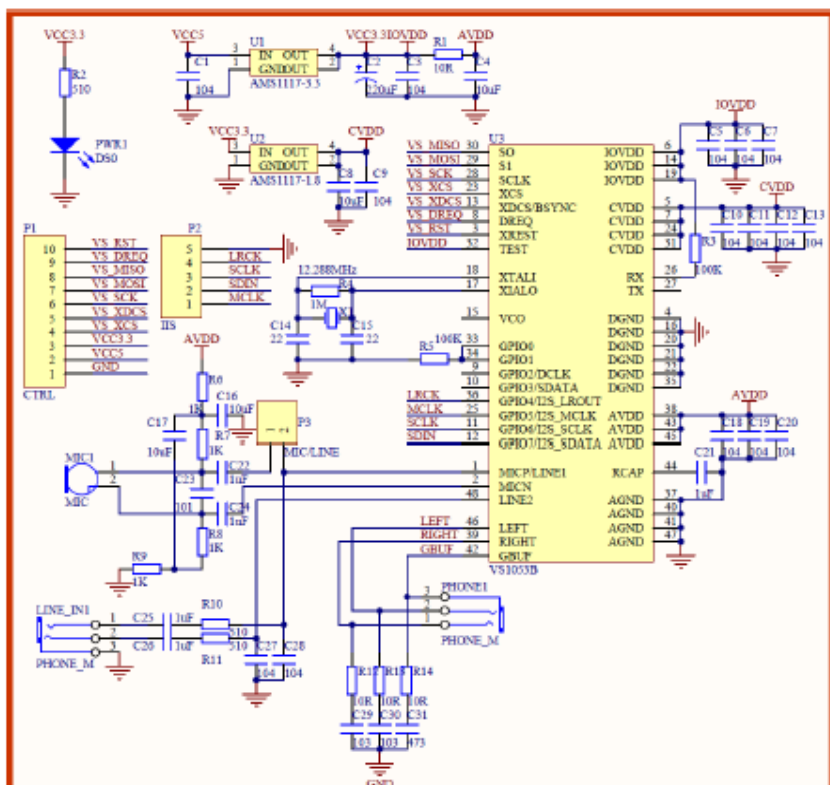


图 4.23 音频模块原理图

4.7 主控节点底板设计

主控节点主要用于摄像头信息的显示和其他节点控制，因此需要图像处理功能。计划采用 I.MX6 作为主控节点，但是在开发初期为了快速验证，采用了 MPC5604E + LCD 屏和 PC 机显示方案。

4.7.1 LCD 屏显示

初期采用 OV9655 摄像头，通过以太网直接传输 RGB 图像信息，因此可以通过 MPC5604E 直接驱动 LCD 屏。由于该单片机的驱动已经在前期调试完成，因此调试更方便，可以用于快速验证摄像头信息的正确性。该方案存在以下问题：

- LCD 屏幕较小，只能显示一个摄像头数据，而网络中需要 4 个摄像头；
- 由于 OV9655 效果太差，后期改为 OV5642，并将图像压缩为 JPEG 格式后通过以太网发送，而 MPC5604 无法解码 JPEG，因此不能用于新的摄像头显示；

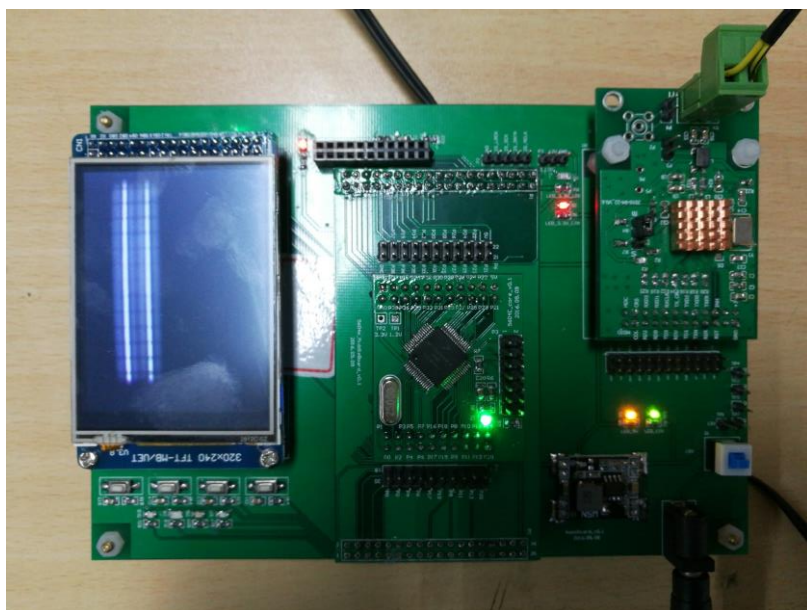


图 4.24 LCD 显示节点

4.7.2 PC 显示

由于 LCD 屏幕显示方案存在问题，在考虑开发的便捷性后，采用 PC 显示方案，此时底板上的 MPC5604E 具有交换机管理和实时报文传输功能，而摄像头信息部分通过 PC 显示，其工作流程如下图所示。

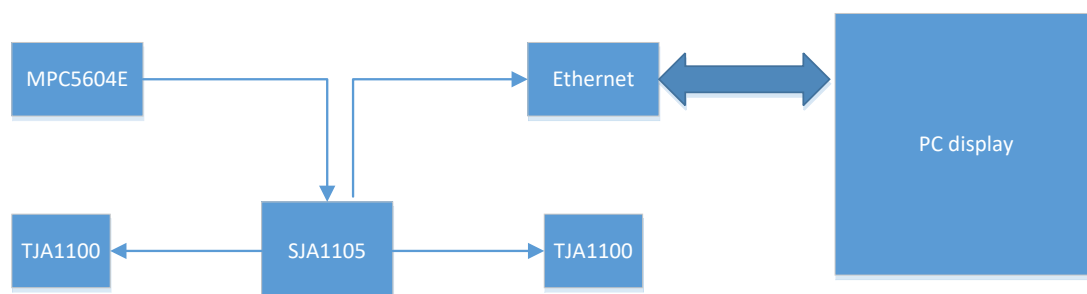


图 4.25 PC 显示工作流程

PC 端采用 QT 环境编写，可以很方便地移植到 I.MX6 上，后期可用 I.MX6 开发板代替 PC 显示摄像头信息。因此主控节点底板设计和摄像头节点底板设计类似，将摄像头模块改为标准以太网模块，便于 PC 接收报文数据。

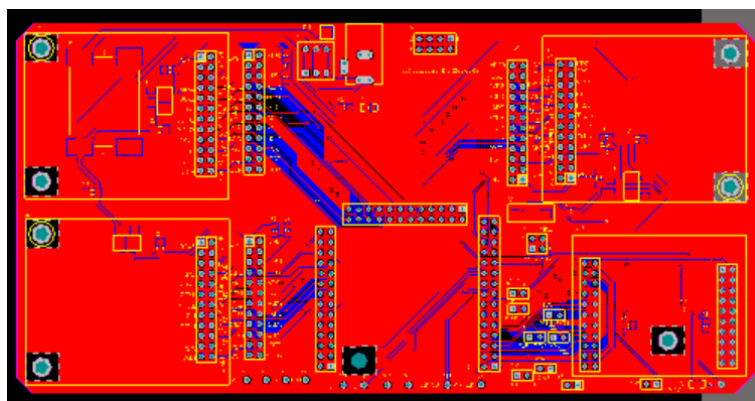


图 4.26 主控节点底板电路图

通过节点转发，以及上位机显示配合，即可显示摄像头信息，图 4.27 为当前上位机显示状态，由于当前网络中只有一个摄像头节点，因此四个屏幕均显示同样内容。

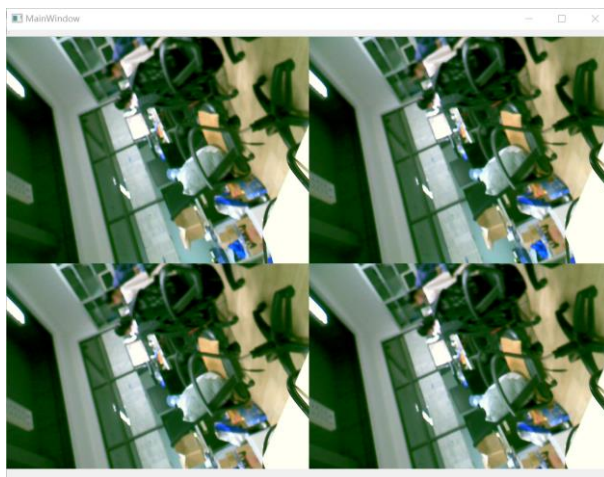


图 4.27 上位机显示图像

5 软件开发

5.1 软件构架

本项目重点在于基于 TSN 的以太网通信，因此各个节点均需支持 TSN 相关协议栈内容。

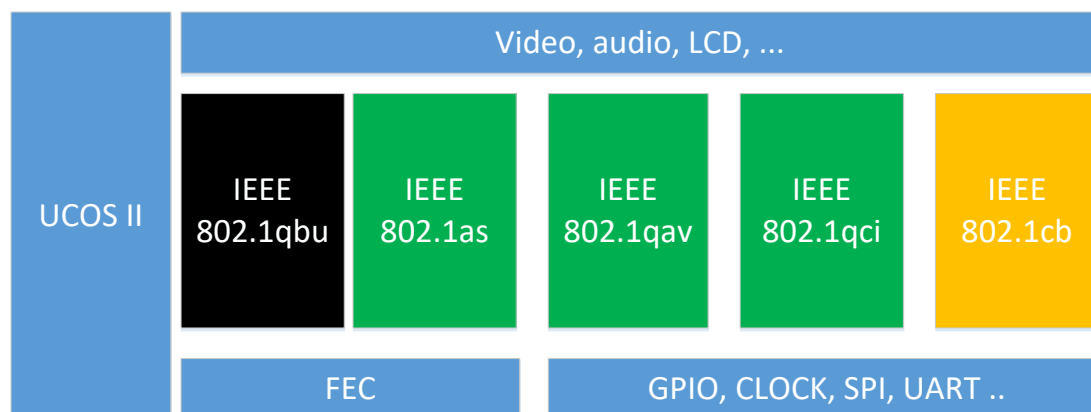


图 5.1 节点软件架构

图 5.1 即为各个 5604E 节点软件构架，其中黑色部分为不支持内容，黄色部分为交换机相关内容。

由于 TSN 对实时性要求较高，为了保证各个节点能够满足实时要求，则通过添加实时操作系统 UCOS II 的方式增加任务，内存管理功能。

5.2 节点地址定义

每个节点均有唯一 MAC 地址，其值如下：

```
INT8U video_node0_mac[] = {0x00, 0x01, 0x6C, 0x06, 0xA6, 0x20};  
INT8U video_node1_mac[] = {0x00, 0x01, 0x6C, 0x06, 0xA6, 0x21};  
INT8U video_node2_mac[] = {0x00, 0x01, 0x6C, 0x06, 0xA6, 0x22};  
INT8U video_node3_mac[] = {0x00, 0x01, 0x6C, 0x06, 0xA6, 0x23};  
INT8U lcd_node_mac[] = {0x00, 0x01, 0x6C, 0x06, 0xA6, 0x24};  
INT8U audio_node_mac[] = {0x00, 0x01, 0x6C, 0x06, 0xA6, 0x25};
```

5.3 应用层报文定义

为了提高节点实时性，降低代码复杂性，同时由于网络具有静态，封闭特性，因此直接采用带 VLAN 的 raw Ethernet 格式报文。raw Ethernet 格式报文能够提供最简单的单片机使用接口，而 VLAN 则是用于交换机对 TSN 相关协议支持。

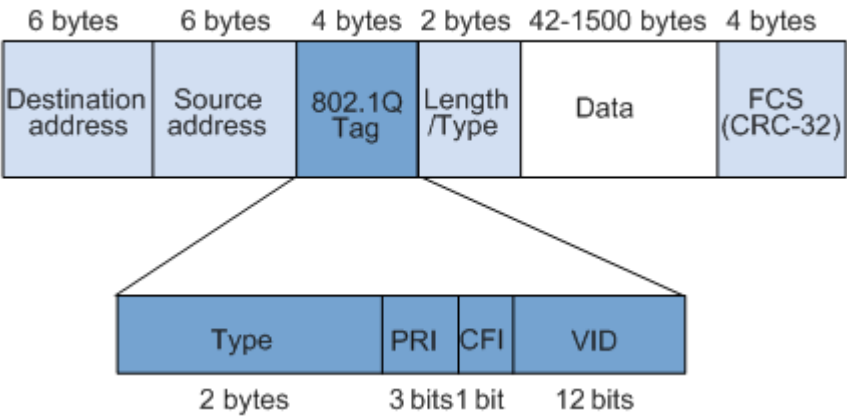


图 5.2 带 VLAN 的 raw Ethernet 报文格式

Raw Ethernet 报文数据场中前 4 字节用于表示当前报文功能（类似 CAN 总线 ID），定义如下：

值	数据定义
0x00000000	心跳报文，用于向其他节点表示当前状态。 Byte0: 计数值，每发送一次后加 1，重启后第一次发送 0，加到 255 后返回到 1 继续发送
0x00000010	摄像头节点功能报文： Byte0: 当前图片报文计数值（MSB） Byte1: 当前图片报文计数值（LSB） Byte2-: 图片内容
0x00000011	音频节点报文
0x00000020	控制报文，内容待定

5.4 802.1AS 协议数据单元

在 802.1AS 协议中，目的 MAC 地址为 01-80-C2-00-00-0E，长度/类型域的值为 0x88F7（35063），由于该值大于 1536，所以用于描述以太网数据帧 MAC CLIENT DATA 采用的协议为 802.1AS（IEEE1588）协议，所有的 PTP 报文都采用该值作为长度/类型域的值。所有的 PTP 报文的发送顺序与以太网数据包的发送顺序相同，前导序列、帧起始界定符、校验序列等都遵守 802.3 标准规定。

802.1AS 报文的由报文头（Header）、报文主体（Body）和报文后缀（Suffix）三个部分组成。报文头是所有报文共有的部分，它们具有相同的数据结构；报文主体是各个报文私有的部分，不同报文的报文主体的结构各不相同；报文后缀部分是一个可选的结构，报文后缀可包含一个或多个 TLV（类型、长度、变量）的结构。

802.1AS 中定义两种报文类别（Message Class），即一般报文（General Message）和事件报文（Event Message）类型。一般报文指不会在硬件层对报文的发送与接收打时间戳的报文，事件报文在报文的发送与接收时会在对应的点给报文打时间戳。所有的报文由 preamble 前导序列开始后，跟随 802.3 以太网数据包的 Header 部分，随后是载有 PTP 报文的有效载荷段（Payload）。标准定义，PTP 报文的时间戳获取点位于 Preamble 前导序列后帧起始界定符处（即 Start Frame Delimiter）。由于 SJA1105 支持直接截取时间戳，因此节点可以直接通过以太网或者 SPI 的方式获取并修正时钟。

5.5 以太网驱动

MPC5604E 控制器带有一个百兆以太网控制器 Fast Ethernet Controller (FEC)，除了标准以太网特性外，控制器还支持分段数据描述符，因此以太网报文不同段的内容（应用层内容，VLAN 头，MAC 地址等）可以放在不同的 RAM 地址。通过内存动态分配以及报文组装的方式，避免常规以太网协议栈在分层处理时反复复制数据带来的延迟，在发送完成后，将申请的内存归还 UCOS，保证其他任务可以顺利发送以太网报文。

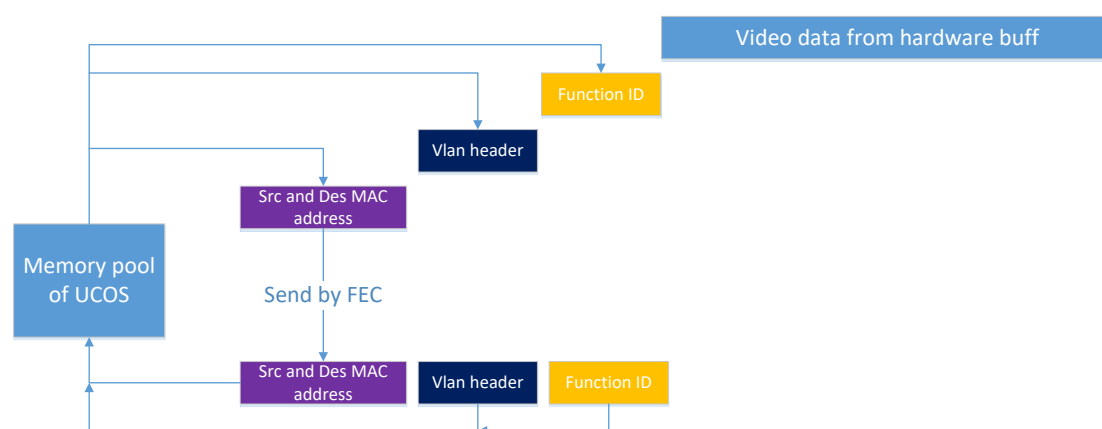


图 5.3 以太网发送报文组装

以太网在工作过程中作为单独任务运行，通过消息队列接收其他任务的报文

发送请求。

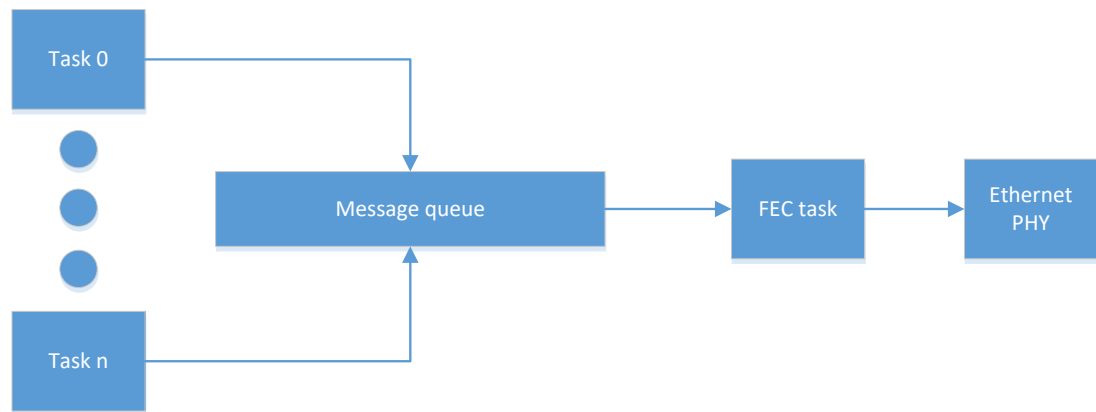


图 5.4 以太网发送工作流程

5.6 节点交换机管理

由于 TSN 协议是通过交换机来实现的，而每个节点内部都带有交换机模块，因此节点需要对交换机进行管理，并控制交换机实现 TSN 协议功能。

SJA1105 提供了很多配置项可以选择，通过 SPI 接口对交换机的不同配置项进行设置，可以实现想要实现的功能。恩智浦提供了一个针对 SJA1105 的 Python 库，可以通过 Python 脚本来对不同的配置项进行配置，并自动生成对应的配置数据，可以通过 SPI 下载到交换机中。配置项包括：设置 MAC 过滤地址、设置 Host 接口、设置以太网传输速率、设置 hash 算法多项式、设置流控相关功能、设置时间戳相关功能、设置接口 MII 模式等等。

```
1 #####
2 #Test configuration where priority map is retained but all prios are put in a single
3 #egress queue
4 #####
5
6
7 from sjal105.config_mra2.snic_switch.tables import *
8 from sjal105.config_mra2.snic_switch.config import Switch_Config
9 from sjal105 import mainLog, logLevel
10 from sjal105 import getAbsPath, getScriptName
11 from os.path import join
12
13 mainLog.log(logLevel["debug"], "Executing the script %s" % getScriptName(__file__))
14
15 local_dir = getAbsPath(__file__)+"..\\"
16 # Create an empty configuration with the modified configuration
17 swc = Switch_Config()
18
19 #####
20 # General Parameters
21 #####
22
23 #swc.cc_parameters["uvVlMarker"] = 0x84838281
24 #swc.cc_parameters["uvVlMask"] = 0xFFFFFFFF
25
26 #####
27 # General Parameters (General Parameters)
28 #####
29 swc.cc_parameters["barInc"] = 0
30 swc.cc_parameters["MirrorPortConfigEnable"] = 1 # Dynamic change of Mirror Port is enabled
31 swc.cc_parameters["nDeviceId"] = 3
32 swc.cc_parameters["nMgmtPrio"] = 0
33 swc.cc_parameters["auVMacFilterResult[1]"] = 0x0180c2000000
34 swc.cc_parameters["auVMacFilterResult[0]"] = 0x0180c2000000
35 swc.cc_parameters["auVMacFilter[1]"] = 0xFFFFFFFF000000
36 swc.cc_parameters["auVMacFilter[0]"] = 0xFFFFFFFF000000
37 swc.cc_parameters["abIncludeSrcPort[1]"] = 0
38 swc.cc_parameters["abIncludeSrcPort[0]"] = 0
39 swc.cc_parameters["abSendFollowupTs[1]"] = 1
40 swc.cc_parameters["abSendFollowupTs[0]"] = 0
```

图 5.5 交换机配置脚本

因此节点对交换机的管理接口采用 **SPI** 通信。在对交换机进行控制来实现协议之前，需要对交换机进行初始化使其能正常工作。交换机初始化流程如图 5.6 所示。

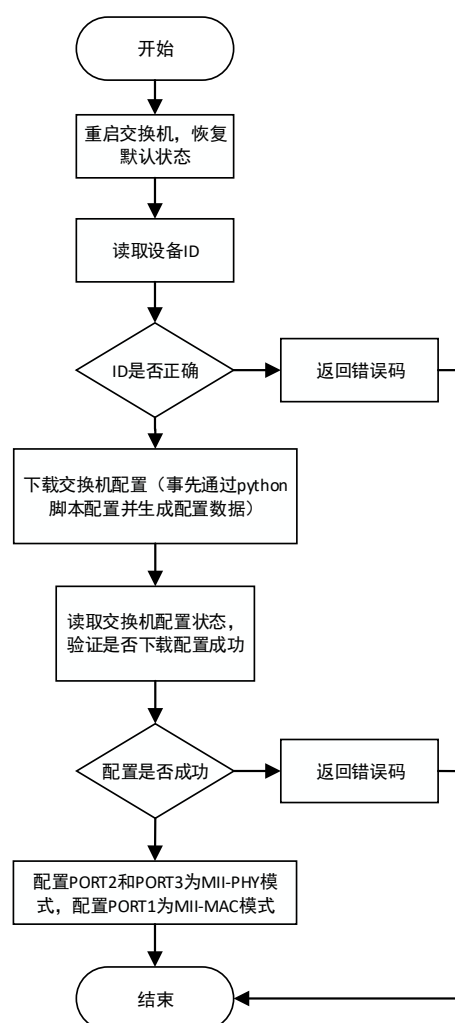


图 5.6 交换机初始化流程

在初始化完成的基础上，读取交换机在转发报文时的发送时间戳以及接收报文时的接收时间戳，然后根据获取到的时间戳进行 **PTP** 时钟管理来实现 **TSN** 中的时间同步协议。

5.7 摄像头节点开发

摄像头节点代码包括以太网驱动，图像采集、压缩驱动和交换机管理模块，其中图像采集模块为本节点特有功能，其他代码为通用代码，不同类型节点可以复用相关代码。

5.7.1 图像采集驱动

摄像头在使用前必须对其进行配置，确定摄像头的工作频率，采样率，输出格式等信息。配置通过 SCCB 总线实现，该总线类似 I2C 总线，只是去除了 ACK 位。MPC5604E 支持硬件 I2C 模块，因此可以采用该模块与摄像头通信。

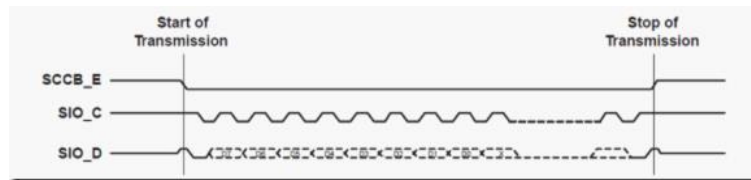


图 5.7 SCCB 总线工作时序图

摄像头在工作过程中通过 8 位 IO 以及场同步，行同步，像素时钟输出图像信息。启动时单片机将摄像头配置为 15FPS，640*480 YUV 模式，像素时钟为 50Mhz，其频率远超过单片机 IO 采样速率，因此单片机无法直接通过 IO 采样。MPC5604E 支持硬件采样，压缩功能，因此只需讲摄像头引脚接到单片机对应引脚，并配置图像压缩驱动即可。图像压缩工作流程如下图所示。

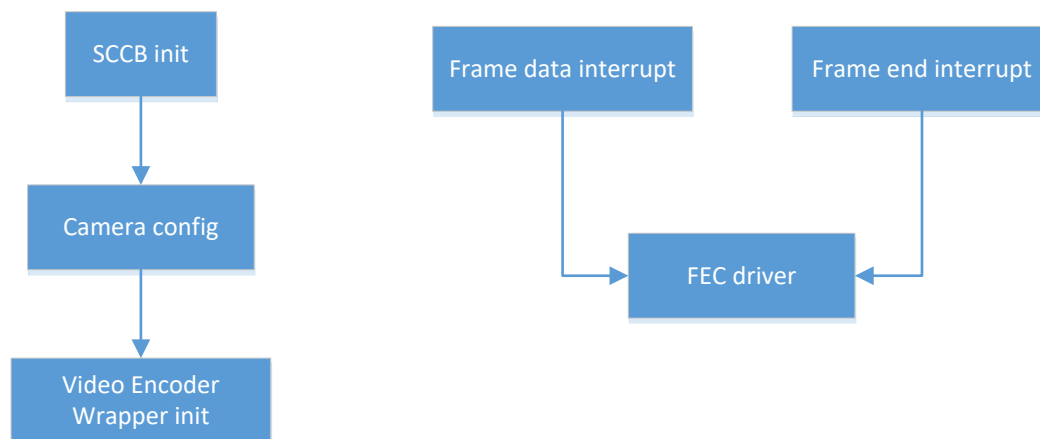


图 5.8 图像压缩工作流程

摄像头在运行过程中有两个中断源，一个是 JPEG 数据中断，一个是完成中断。由于单片机 RAM 只有 96KB，而一般一幅图片为 110KB 左右，因此必须在图片压缩过程中就把已经完成数据通过以太网发送，否则会造成内存溢出。

JPEG 数据中断的中断频率与以太网报文长度有关，例如一帧以太网报文能发送 1KB 字节 JPEG 数据，那么该中断就可以配置为每产生 1KB 的摄像头数据则产生一次中断。由于数据几乎不会是 1KB 的整数倍，因此最后一场数据需要完成中断获取。

6 网络特性测试与分析

6.1 以太网速率测试

当前以太网采用 BroadR-Reach 技术，通信速率为 100Mbps。依据该技术规范，其信号在双绞线上按照三进制发送（-1，0，+1），其波形频率为 66.7Mhz，MII 速率为 25Mhz。

实际 MII 测试波形如下图所示，频率为 25.1Mhz，可以满足通信需求。

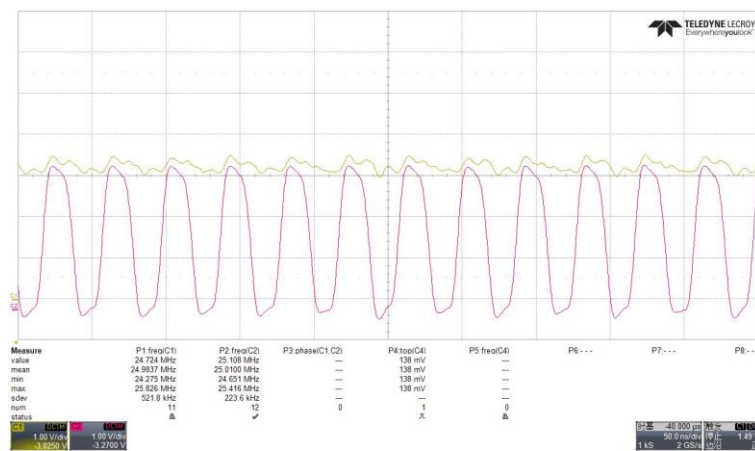


图 6.1 MII rxclk

实际测试电路如下图所示，直接测量节点 MII 以及以太网接口信号。



图 6.2 以太网速率测试

实际双绞线测试波形如图 6.3 所示，由于波形形状与实际通信数据，扰码多项式有关，因此无法直接读出频率。但是可以查看最近的信号跳变（如图中光标

所示)，可以看出波形频率接近 66.7Mhz。

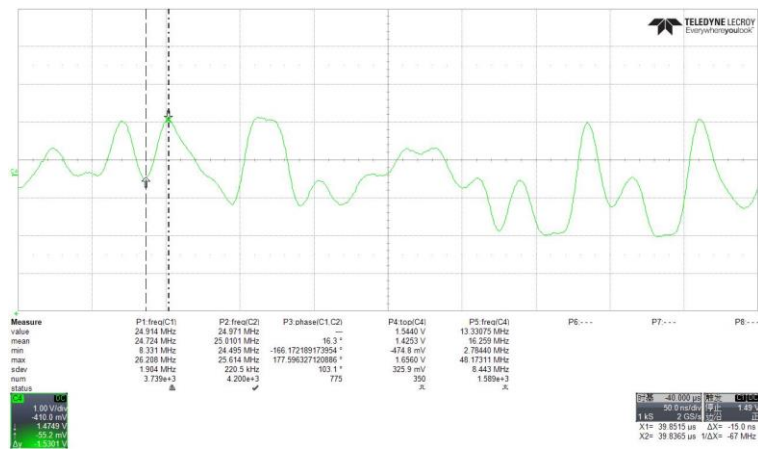


图 6.3 双绞线信号

6.2 以太网链路延迟

为了测量以太网报文发送延迟，采用以下测量电路，通过示波器测量实际报文发送过程中从发送节点 TX_EN 信号到接收节点 RX_DV 节点延迟。

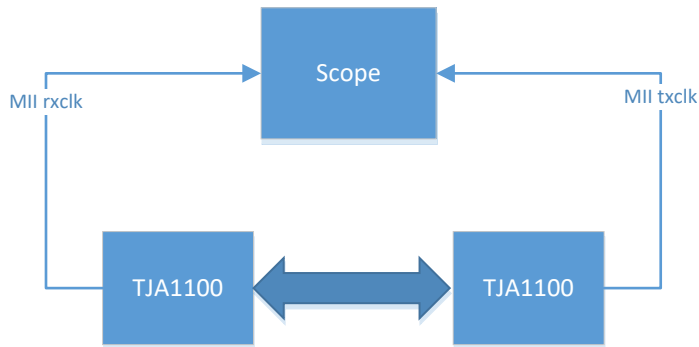


图 6.4 延迟测试电路示意图

实际链路延迟测试电路如下图所示，节点和节点直接连接，示波器测量两端 MII 接口电路信号。

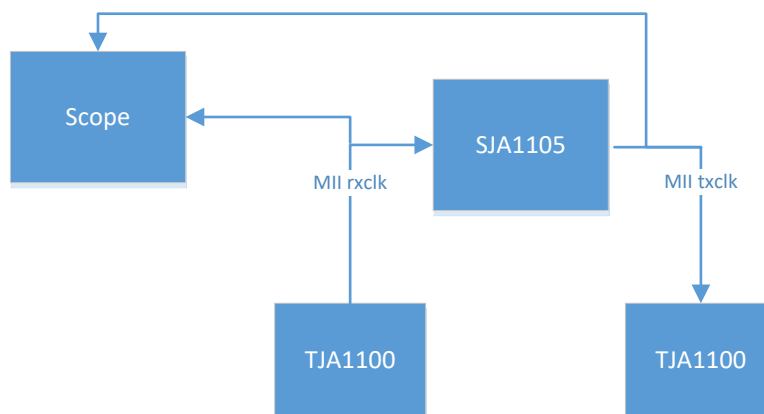


图 6.7 转发延迟测试

实际交换机转发测试电路如下图所示，示波器直接测量收发节点的 MII 信号。

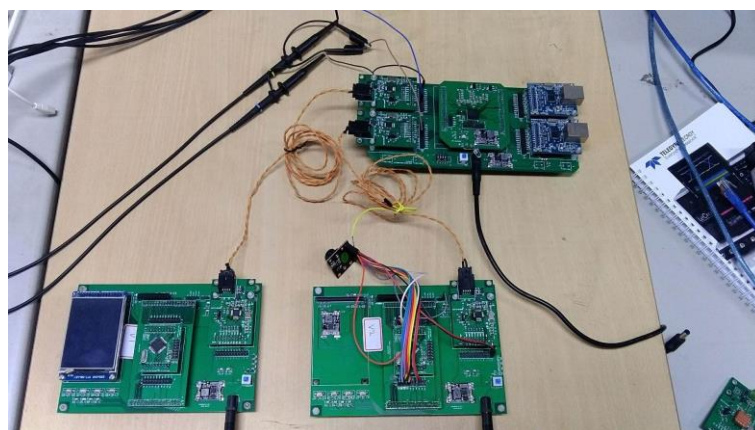


图 6.8 转发延迟测试

实际测试过程中测量了不同报文长度的延迟，可以看出转发延迟为 8.7us，与报文长度无关。

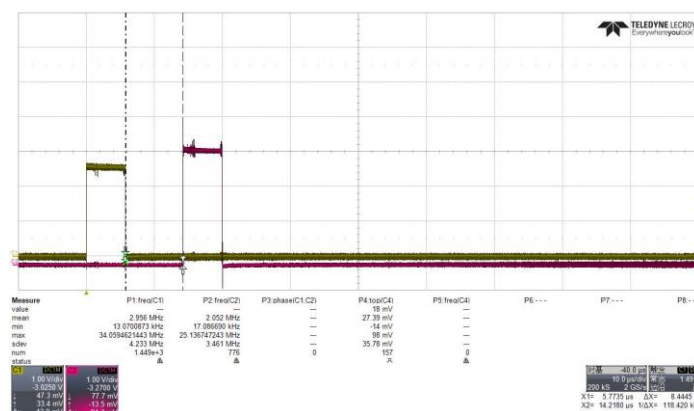


图 6.9 转发延迟@64bytes

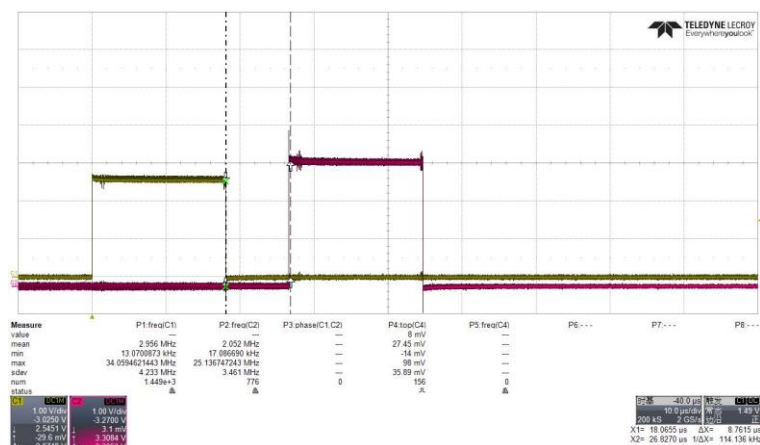


图 6.10 转发延迟@200bytes

6.4 PTP 时钟频率调整

PTP 时钟通过 IEEE 802.1AS 协议同步，报文在按照协议交换后各个节点可以得知自身时钟频率偏差。SJA1105 支持通过定点浮点数的方式调整频率，该定点浮点数为一个 32bit 寄存器，其定义如下：

Bit 31: 浮点数的整数部分；

Bit 0-30: 浮点数的小数部分；

因此 0x80000000 代表频率修正参数为 1，0x81000000 代表频率修正参数为 1.0078。

实际测量电路如下图所示，示波器直接接到 PTP 时钟输出引脚。



图 6.11 PTP 频率测试

将输出频率配置为 1KHz，实际测量输出波形如下图（其中通道 2 为示波器

标准方波输出) 所示, 可以看出当频率修正参数改为 0x81000000 后, 实际输出频率从 999.99Hz 变为 1.0078KHz, 实际结果与理论计算匹配。

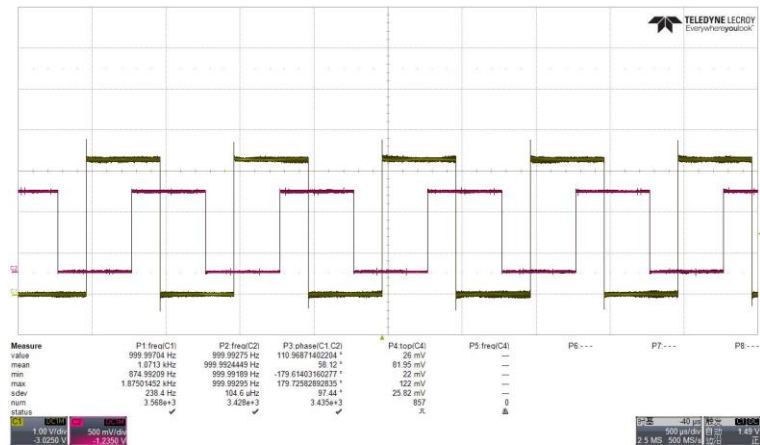


图 6.12 PTP 频率@0x80000000

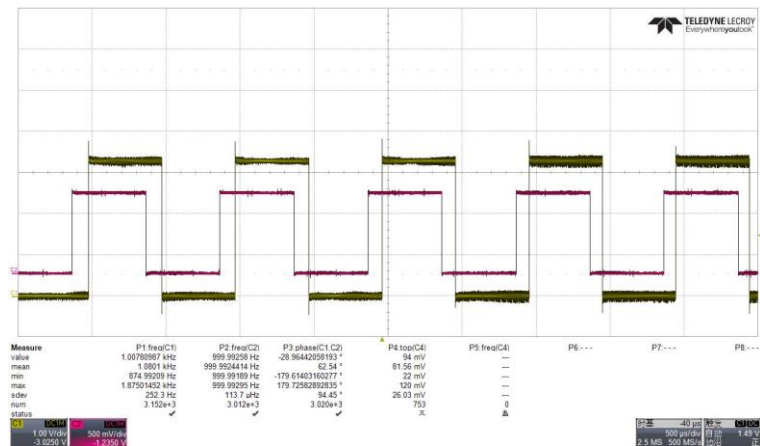


图 6.13 PTP 频率@0x81000000

7 小结

7.1 网络规划

网络规划分为 3 个部分，网络拓扑制定、网络通信协议制定以及通信系统仿真，目前网络拓扑制定已经按原计划完成，制定出了网络拓扑报告；网络通信协议由于需要根据交换机的特性来决定如何通信，因此稍有拖延；关于通信系统仿真部分，由于网络通信协议尚未制定完成，因此通信系统仿真未完成。

7.2 硬件设计

硬件设计分为四个部分，分为音频节点、视频节点、主控节点和交换机的硬件设计，目前所有节点和交换机的硬件设计都已完成，但由于在调试阶段还会更改部分硬件设计，因此还未最终定稿。

7.3 TSN 协议栈软件开发

TSN 协议栈软件开发分为四个部分，按交换机支持的 TSN 协议分为 802.1AS、802.1qbv、802.1qcc 以及 802.1cb 协议四部分，目前已经开发了部分 802.1AS 协议栈。其余协议栈的开发正按部就班地进行。

8 下一步工作计划

8.1 冗余节点搭建

按照冗余要求，每个节点都必须带有交换机以及两路以太网，因此需要开发新的硬件以支持该特性。

8.2 各 ECU 功能、以太网相关测试

功能测试和以太网测试分为五个部分，音频节点功能测试、视频节点功能测试、交换机特性测试、以太网物理层测试和以太网通信协议测试。目前正等待前期硬件和软件开发完成后进行测试。

8.3 驾驶辅助与信息娱乐系统软硬件集成

系统软硬件集成分为四个部分，以太网-CAN 网关硬件开发、以太网-CAN 网关集成 TSN 协议栈、雷达节点集成和雷达节点和以太网网络通信联合调试。

8.4 驾驶辅助、信息娱乐系统应用层软件开发

应用层软件开发分为功能定义和代码开发两部分。

8.5 系统集成与测试

分为测试方法定义和系统集成测试两部分。

8.6 优化系统参数

分为系统参数整理和系统参数优化两部分。

8.7 完成最终测试，整理课题成果

主要为文档，硬件设计，代码，仿真工程文件整理。