

doi: 10.7690/bgzdh.2014.06.014

千兆车载实时光纤网络中心节点的设计与实现

孙偲晟

(上海电控研究所光纤通信研究室, 上海 200092)

摘要: 针对目前工业现场和车载信息交换的特点, 为了解决车内通信带宽和响应实时性的问题, 设计实现千兆光纤网络的中心节点装置。采用 FPGA 设计中心节点的 MAC 层逻辑, 实现基于无源光网络(Ethernet-based passive optical network, EPON)的千兆光纤交换协议层, 采用 GMII 媒介无关接口链接节点的千兆物理层电路, 千兆物理层芯片采用成熟的高速通信千兆位 SERDES 器件, 并通过交换协议确保交换实时性达到微秒级。试验测试结果表明: 该装置具有带宽大、交换实时性高、抗电磁干扰能力强和成本低等特点, 有很好的实用价值。

关键词: 无源光网络; 千兆以太网; 车载环境

中图分类号: TJ810.2 **文献标志码:** A

Design and Implementation of Gigabit Vehicle Real-Time Optical Network Central Node

Sun Sisheng

(Fiber Communication Research Office, Shanghai Electric Control Research Institute, Shanghai 200092, China)

Abstract: According to industry and vehicle information communications features, this paper design and realize Gigabit optical network central node to solve problem of vehicle communication bandwidth and real-time response. Use MAC layer logic of FPGA design central node, realize Gigabit vehicle exchange protocol layer of Ethernet-based passive optical network (EPON), use GMII interface to connect the Gigabit physical layer circuit. The Gigabit physical layer core uses high speed communication Gigabit SERDES. Then use exchange protocol to ensure the microsecond real-time exchange. The test data shows that the equipment is practical with features of wide bandwidth, high real-time exchange rate, high anti-electromagnetic disturbance ability and low cost.

Keywords: EPON; Gigabit Ethernet; vehicle environment

0 引言

过去的数年中, 光纤网络快速发展, 无源光网络(passive optical network, PON)、密集波分复用(dense wavelength division multiplexing, DWDM)、光放大、波长分插复用和高速交换等先进技术获得了成功应用。其中, PON 已经逐渐主导了整个接入网的发展。

光纤接入网中的主要技术就是 EPON 技术, 该技术突出接入带宽、支持融合语音、视频和数据业务、传输距离达到 20 km。为达到性能和成本间的平衡, PON 采用了点对多点、端到端之间没有有源器件的光网络, 在整个传输中 PON 内部使用的部件是无源的光部件, 包括光纤和光分路器^[1]。

在传统接入网络的协议层, 主流技术有以太网和 ATM。以太网具有更小的帧开销, 达到 7.42%, 并易于升级和管理维护, 已经远远超越了 ATM, 成为世界范围内最广泛应用的接入技术。目前车载信息网络已成为下一个通信业界发展的热点, 车内安全、娱乐、诊断和辅助电子设备的数量在不断增加,

设备之间的互连需求也越来越复杂, 因此对信息交换和数据带宽都提出了新的要求。笔者结合 PON 技术和千兆以太网的特点, 以车载领域和工业现场为应用背景, 设计实现了千兆光纤网络的中心节点装置。

1 网络结构

在网络中, 中心节点是网络的主节点, 负责网络控制、管理和资源分配以及上行数据的转发。中心节点通过光分路器和光纤连接各个接入节点构成千兆光纤网络, 是整个网络中的核心部件。如图 1。

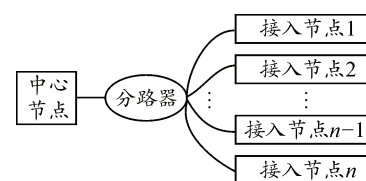


图 1 网络结构示意图

2 EPON 网络协议设计

中心节点分为协议层和物理层, 其中协议层负责管理千兆光纤网络, 协调各接入节点的实时媒质接入机制, 并转发接入节点发送的上行数据, 实现

收稿日期: 2014-01-10; 修回日期: 2014-02-26

作者简介: 孙偲晟(1983—), 男, 上海人, 硕士, 工程师, 从事车载系统光纤通信技术、车辆电子信息系统组网技术、光纤传感技术研究。

各接入节点间数据的实时交换，物理层负责串并转换、码字对齐、和光信号的连续发送和突发接收。

千兆光纤网络采用了分时隙的网络管理机制，由中心节点充当分配者的角色。对所有接入节点分配授权时隙，这种网络带宽资源分配机制避免了传统竞争冲突，具有更好的带宽利用率。一个通信周期内分为 2 个阶段：承载多个接入节点(S₁-S₁₆)时隙窗口的实时数据阶段(TDM DATA)和网络管理阶段(OAM)^[2]，如图 2。

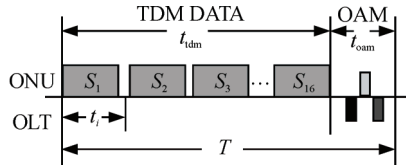


图 2 时隙分配机制

千兆光纤网络在初始化阶段需要完成对每个接入节点的同步和测距，将其授权时隙窗口调整到相应的时隙内，确保中心节点和接入节点的时间保持同步。笔者提出了一种相对时间同步的方法。中心节点在时隙分配窗口，向接入节点发送 GATE 帧，接入节点回复 REPORT 帧，同时记下发送 REPORT 的时刻 t_{s0} 。中心节点记下收到 REPORT 的时刻 t_0 。若在规定的时间内没有收到 REPORT 帧，则认为对

应接入节点不存在，继续探测下个节点。查询完后，中心节点计算被发现接入节点的时间调整量 $\Delta t_i = t_i - t_0$ ， t_i 为接入节点 i 的数据到达中心节点的预定时刻(由时隙分配机制决定)。随后中心节点将被发现接入节点的时间调整量 Δt_i 通过 START 帧广播。相应接入节点收到 START 帧后，提取各自调整时刻，确定其首次发送上行数据的时刻 $t_{s1} = t_{s0} + \Delta t_i$ ，如图 3。

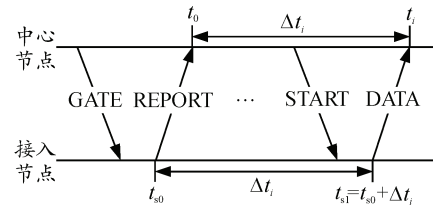


图 3 相对时间同步示意图

中心节点硬件设计如图 4 所示，协议层通过 FPGA 实现，设计中选用了 ALTEAR 公司的 EP3C40F324 器件，物理层选用了 TI 公司的 TLK2541，两者之间通过数据端口和时钟控制线互联，光接口选用了 LTE4302，该光电模块支持光信号动态增益调整 AGC。在网络管理模块硬件设计中采用了 DM9000 网络口和 RS232 串口能够与上位机进行通信。网络管理软件固化在 FLASH 中，上电启动加载 SDRAM 进行运行。

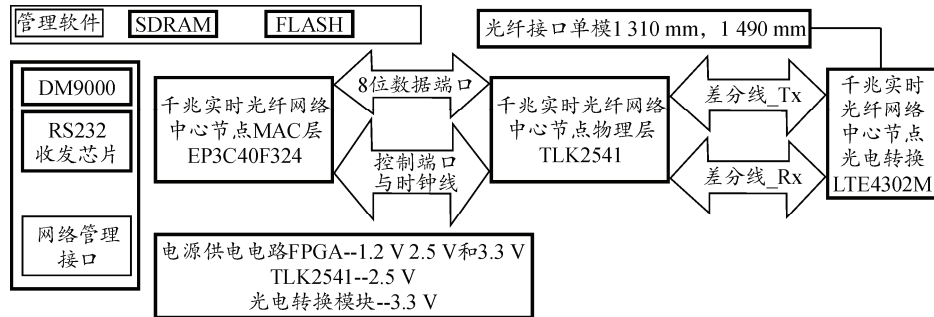


图 4 中心节点硬件设计框图

3 中心节点 OLT 的协议层的设计实现

中心节点协议层包括了 GMII 接口、MAC 数据发送子模块、MAC 数据接收子模块、帧解析子模块和时隙控制子模块。其中 GMII 接口模块提供了物理层和协议层互联，在发送端生成了 TXD[7:0], tx_er 和 tx_en., 在接收端生成了 RXD[7:0], rx_dv 和 rx_er。

MAC 数据发送和接收子模块按照千兆以太网帧格式，完成数据帧的组装和解析，并进行 CRC32 的帧校验码计算。帧格式包括协议层前导码(0x55)、帧起始位(0x5d)、源地址(SA)、类型域(TYPE)、保留位(RESERVED)，时间戳字段(Timestamp)、用户数据段(Message)和校验段(CRC)。协议层数据帧开辟的用户数据段为 1 500 个字节。兼容千兆以太

网数据的传输。

MAC 层的处理采用 32 位的处理总线，在完成协议层数据封装和解析之前开辟了一个双口 RAM，即结构图中的数据发送缓存和数据接收缓存 Tx_Buffer 和 Rx_Buffer。通过 Buffer 处理将数据转换为 32 位，提高了系统整体处理速度。

中心节点的协议层核心模块包括数据解析和时隙管理控制子模块，首先数据解析子模块会分析收到的帧类型，判断收到 REPORT 帧、REG_REQ 帧、DATA 帧、CONFIG_ACK 帧和 COUNT_ACK 帧，如是管理帧 CONFIG_ACK 帧和 COUNT_ACK 帧，解析模块提取其中的配置字段和统计字段，通过控制信号 valid 和 InfoBuf 提交给时隙管理子模块。

时隙管理子模块控制着中心节点的运作，整个运作分为 3 个阶段，通过模块中的时隙状态机依次实现。首先模块配置 1 个本地的时间计时器 CurrentTime，通过本地计时计算每个接入节点的时隙窗口。状态机在第 1 个阶段首先发送 GATE 帧探测各个接入节点是否在线，并在每次 GATE 帧发送后设置等待时间，超时发送下一帧 GATE。

直至完成所有节点 GATE 帧发送，中心节点计算各个接入节点的时隙调整量，通过 START 帧广播给各个接入节点。至此状态机进入第 2 阶段，在该阶段，中心节点会在 START 帧定义的各个有效窗口接收到接入节点上行的数据帧，模块会计算每轮上行数据帧的时隙误差，将结果更新到数据帧的

timestamp 字段。依次处理每个上行数据帧直到 1 个通信循环结束，状态机进入第 3 阶段，在该阶段中心节点会进行管理任务：新节点注册，配置管理和统计管理，分别对应 REG_OPEN 帧、CONFIG_REQ 帧和 COUNT_REQ 帧，管理阶段中心节点会和各个接入节点进行交互，通过 REQ 帧请求和 ACK 帧应答。中心节点和 MAC 层数据帧格式分别如图 5、图 6。

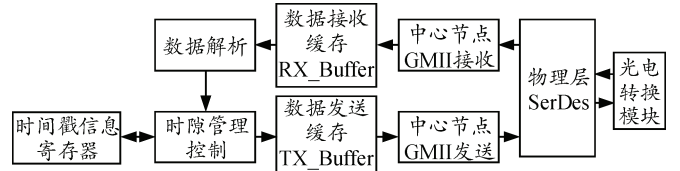


图 5 中心节点

MAC层同步开销 0x55 (7BYTE)	MAC层帧头(SFD) 0x5d (1BYTE)	源地址 SA (1BYTE)	类型域 TYPE (1BYTE)	保留 RESERVED (2BYTE)	时间戳 Timestamp (4BYTE)	数据段 Message (1500BYTE)	校验段 CRC (4BYTE)
-----------------------------	--------------------------------	-------------------	---------------------	------------------------	--------------------------	---------------------------	--------------------

图 6 MAC 层数据帧格式

4 中心节点物理层的设计实现

笔者设计的中心节点支持千兆速率 1 000 Mbit/s，设计采用物理层 SerDes 和光电转换模块实现。物理层采用 SerDes 技术，选用 TI 公司的 TLK2541 器件，该器件支持 1.25G/2.5G 双速率的通信，内部具有 8B10B 编解码电路，输入输出可以配置为 txd[7:0]、txctrl、rxd[7:0]和 rxctrl。高速差分电路为 CML 电平可以方便地和光模块互联。具有

接收快速同步功能，在接收同步中需要辨别 IDLE 码字 K28.5。

设计中定义了物理层帧格式，如图 7。通过 FPGA 的 GMII 子模块生成 txctrl 来控制 TLK2541，生成 IDLE 进行光纤线路同步。按照 802.3 标准定义了物理层帧头 K27.7，物理层帧尾 K29.7 K23.3^[3]。

物理层同步开销 K28.5同步码	物理层帧头 K27_7	物理层有效载荷	物理层帧头 K29_7	物理层帧尾 K23_3
---------------------	----------------	---------	----------------	----------------

图 7 物理层帧格式

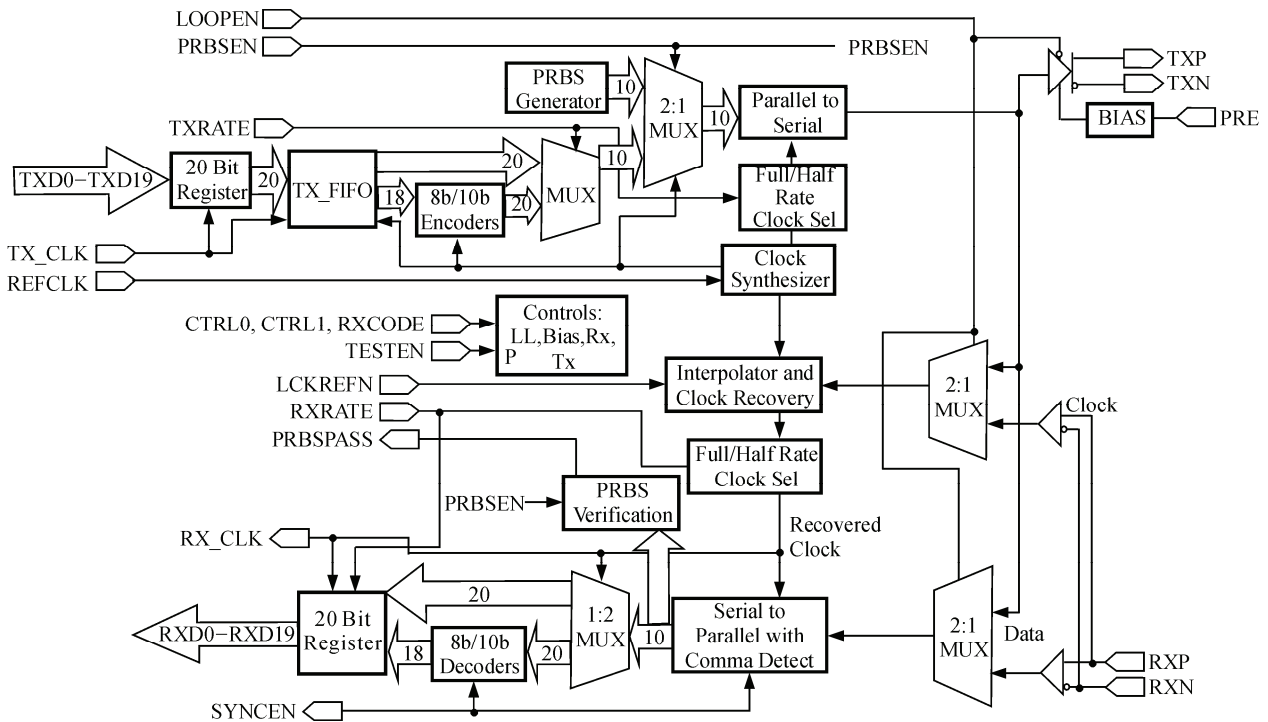


图 8 物理层收发电路

TLK2541 完成数据高速串并转换和 8B10B 光纤线路编码, 通过 CML 模式差分信号传输, 设计电阻网络上下拉配置, 可以直接和光电转换模块进行连接, 物理层收发电路如图 8 所示, 设计中采用的模块是 LTE4302, 该光电模块支持 EPON 的中心

节点应用。具有连续发送突发接收特点。内部完成自动增益控制 AGC, 确保衰减不均的节点码字“1”和“0”不会被误认。并且能够对光信号进行时钟和数据恢复 CDR, 对接收到的信号进行相位和频率同步^[4-5]。光电转换电路连接示意图如图 9 所示。

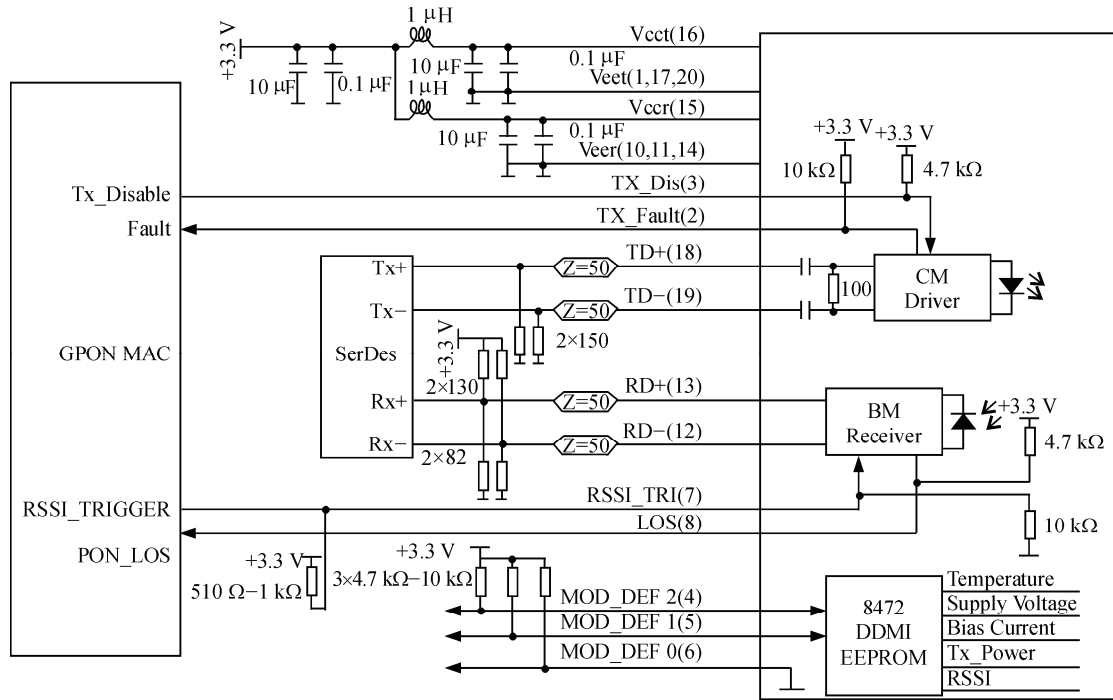


图 9 光电转换电路

5 测试

中心节点在 FPGA 内设计了主状态机来控制整个光纤网络的运行, 图 10 是在计算机仿真环境下中心节点在整个网络中的行为和时序测试, 经过测试, 整个光网通信周期是 583 μ s。设计可支持 16 个接入节点的同时接入。每个节点分配的时隙窗口为 30 μ s。网络管理时间端为 60 μ s, 这期间中心节点会处理一些网络的统计管理和配置管理任务。中心节点负责发送的 GATE 帧有效载荷为 128 ns, START 帧为 640 ns, DATA 帧为 12.24 μ s。所有帧的物理层开销占用 13 μ s^[5]。

图 11 是在实际硬件环境中的测试, 通过示波器抓取关键的时隙窗口信息, 中心节点连接 3 个接入节点网络初始化以及正常通信过程中的时隙图, 每一轮通信过程中, 网络时隙窗口都按照中心节点的授权来分配, 设计完全满足网络通信协议要求, 每一轮周期稳定无抖动。实验中在中心节点和接入节点共同搭建的网络中进行了数据通信测试, 传输 CAN 命令数据和标准以太网数据, 进行了点对点以及点对对点的测试, 在测试过程中, 笔者所设计的千兆实时光纤网络中心节点运行稳定可靠, 误码率 $< 1 \times 10^{-9}$ 。

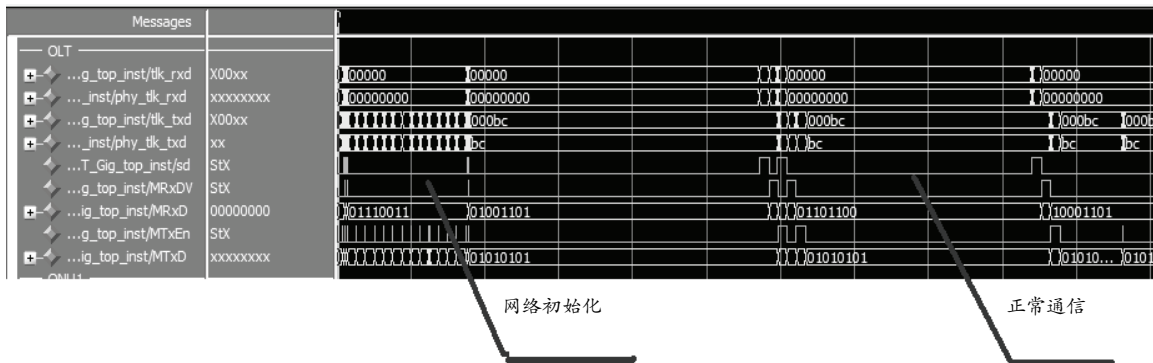


图 10 中心节点仿真波形

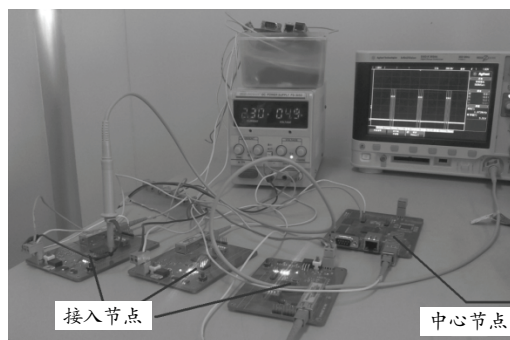
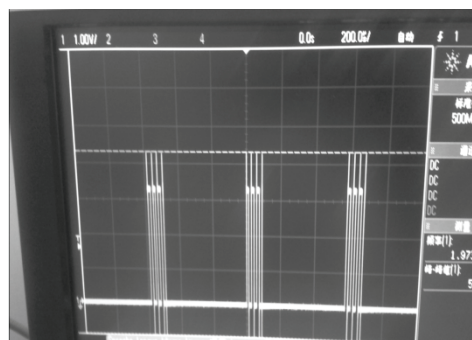


图 11 运行时隙图和测试现场

6 结论

笔者论述了千兆实时光纤网络的中心节点设计, 采用 ALTERA CYCLONEIII 系列 FPGA 实现 MAC 层的逻辑功能, 连接高速串行 SERDES 物理层, 完成了物理层编解码和并行转串行, 设计了具有增益动态调整的光电转换电路, 完成了高速光数据流的突发接收和连续发送。仿真试验和数据收发测试结果表明: 该设计思路正确可行, 在工业现场和车载通信领域具有很好的实用价值。

参考文献:

[1] 格伦·克雷默. 基于以太网的无源光网络[M]. 北京:

(上接第 47 页)

4 结论

针对广域空基伪卫星网络的精确授时, 笔者在小范围共视授时的基础上, 提出了一种网内传递共视授时方法, 并对授时过程中的相关误差及传递共视模型进行了分析与推导, 通过对对流层延迟误差及其变化率与高度角之间关系的研究, 提出了共视选星策略, 进一步削弱了对流层延迟误差的影响; 分析了空基组合导航系统定位误差的统计特性, 在揭示授时误差与组合导航系统定位误差之间数学关系的基础上, 采用整网平均的方法实现了网络整体高于 0.3 ns 的共视授时精度。笔者结合 8 颗北斗导航卫星, 运用共视技术实现了广域空基伪卫星网络的动态共视授时, 授时精度会随着导航卫星数目增加而变高, 这也是笔者下一步要深入研究的方向与内容。该广域空基伪卫星增强网络高精度共视授时技术的实现对我国北斗卫星导航系统大范围高性能服务的实现提供了一定的参考。

参考文献:

- [1] 史海青, 郁丰. 基于遗传算法的蜂窝广域空基伪卫星网络布局优化[J]. 兵工自动化, 2013, 32(9): 68-72.
 [2] 许国宏, 韦金辰, 陈国宇. 双星系统高精度共视授时技术[J]. 应用科技, 2007, 43(6): 41-44.

北京邮电大学出版社, 2007: 53-54.

- [2] 孙偲晟. 车载实时光纤控制网络分析与中心节点设计[J]. 兵工自动化, 2013, 32(6): 44-47.
 [3] 王利春. EPON 上行接入算法研究[J]. 电子科技大学学报, 2005(6): 294-295.
 [4] Texas Instruments. TLK2541 1 to 2.6GBPS Transceiver Data Sheet[S/OL]. 2008. Texas Instruments. 2008: 1-4.
 [5] 包伟阳, 陈焕银, 童孟军. 基于真实场景的车载网络路由协议仿真[J]. 机电工程, 2013, 30(5): 641-644.
 [6] ALTERA Serial Digital Interface Reference Design for Cyclone & Stratix Devices[S/OL]. 2004, <http://www.altera.com/literature/an/an356.pdf>.
 [7] 严建华, 张洪源, 李文魁, 等. 北斗卫星共视增强罗兰-C 授时应用[J]. 宇航计测技术, 2009, 29(5): 37-39.
 [8] 谭建华. 多基地雷达同步技术研究[D]. 南京理工大学工程硕士学位论文. 南京: 中电十四所, 2012: 14-16.
 [9] 刘建业, 郁丰, 熊智. 导航星座的自主定位与守时研究[J]. 宇航学报, 2009, 30(1): 215-219.
 [10] Fontana R D, Cheung W, Stansell T. The modernized L2 civil signal: leaping forward in the 21st century[J]. GPS world, 2001, 11(9): 28-34.
 [11] 帅平, 曲广吉. 导航星座自主导航的时间同步技术[J]. 宇航学报, 2005, 26(6): 768-772.
 [12] Brown R G, Hwang P Y C. Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering[M]. New York: Published by John Wiley & Sons, 1997: 419-460.
 [13] Jianguo Jack Wang, Jinling Wang. Tropospheric Delay Estimation for Pseudolite Positioning[J]. Journal of Global Positioning Systems, 2005, 4(1-2): 106-112.
 [14] Kedar S, Hajj A, Wilson B D, et al. The effect of the second order GPS ionospheric correction on receiver positions[J]. Geophys Res Lett, 2003, 30(16): 1829-1832.
 [15] Jianguo Jack Wang, Jinling Wang. Tropospheric Delay Estimation for Pseudolite Positioning[J]. Journal of Global Positioning Systems, 2005, 4(1-2): 106-112.
 [16] 冯培德, 谢淑香, 张京娟. 机群组网定位的一种新途径[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(11): 1263-1267.
 [17] 刘俊成, 张京娟, 冯培德. 基于相互测距信息的机群组网协同定位技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(4): 541-545.