

# 声纳湿端数据远传 DWDM 光电交换模块设计

许 乔, 祝萌作, 周艳玲

(湖北大学 计算机与信息工程学院, 武汉 430062)

**摘要:** 声纳的应用极其广泛, 海洋渔业以及军事应用使得声纳技术得到了大力发展; 声纳湿端数据传输的可靠性、实时性是声纳系统性能得到保障的前提; 设计一用于声纳湿端数据远传的 DWDM 光电交换模块; 在该模块中, 使用以太网交换芯片和两个 DWDM 光模块对数据进行多路转发并实现光通路的冗余备份, 提升了系统可靠性的同时使网络拓扑更为灵活; 由于 DWDM 光模块可将电信号转换为波长可选定的光信号, 故通过若干该模块协同使用, 可实现多路光信号复用即同时传输多条声纳水下阵缆的数据; 经实际开发与测试, 该模块以太网业务性能指标符合设计需求, 且该模块已在某声纳工程项目中得到了应用, 并可为其他领域数据远传工程应用提供设计参考。

**关键词:** 光电交换; 以太网交换机; DWDM 光模块

## Design of DWDM Photoelectric Switching Module for Remote Data Transmission in Underwater Part of Sonar

Xu Qiao, Zhu Mengzuo, Zhou Yanling

(College of Computer and Information Engineering, Hubei University, Wuhan 430062, China)

**Abstract:** Sonar is widely used, marine fisheries and military applications make sonar technology greatly developed. The real-time and reliability of the data transmission by the underwater part of sonar makes sonar system performance guaranteed. In this paper, a DWDM photoelectric switching module for data transmission in the underwater part of sonar was designed. In this module, the Ethernet switching chip and two DWDM optical modules was used to make sure that the data forwarded over multiple channels and the backup of the optical path realized which improved the system reliability and make the network topology more flexible. The DWDM optical module can convert the electrical signal to an optical signal whose wavelength can be selected. Through the use of a number of modules, multiplexing of optical signals can be realized in order that data transmitting by a number of underwater cables at the same time can be achieved. After development and testing, the Ethernet service performance indicators of this module meet the design requirements. The module has been used in a sonar project and can provide design reference for other engineering applications.

**Keywords:** electro-optical switching; ethernet switch; DWDM optical module

## 0 引言

随着人类对海洋的不断探索, 声纳系统的应用范围也越来越广泛。数据传输的实时性以及完整性是声纳系统中非常重要的指标。声纳前端调理电路将采集到的数据传输到处理机大多需要远距离传输, 而使用电信号在进行远距离传输时无法保证数据的实时性以及完整性, 因此远距离传输数据大多会选用光纤介质进行。光纤传输与传统的电缆相比, 质量轻、抗干扰能力强、大带宽、稳定性好、适用于许多复杂的环境<sup>[1]</sup>。光纤通信技术不仅可以应用于声纳数据传输, 还可以应用到电力通信控制系统、有线电视、电力通信、互联网应用、军事方面等多个领域中<sup>[2]</sup>。例如, 在军事应用方面, 传统的电缆传输高清视频会有严重的损耗, 损耗与频率成正比, 也容易受到机载复杂环境影响, 因此在飞行试验中多采用光电复合缆传输视频数据以保证对试验的视频信号进行实时遥测和记录的质量<sup>[3]</sup>; 在国

民应用方面, 光纤通信在各类通信业务网的发展方面提供了有力的保障, 为国民经济的发展做出了巨大的贡献, 光纤通信将成为整个社会乃至全球通信行业的最重要的部分<sup>[4]</sup>。随着光纤通信技术的发展, 对光电交换技术的需求也会越来越迫切, 本文介绍一用于声纳湿端数据远传的 DWDM 光电交换模块。

## 1 系统分析

在声纳设备中, 如果每个水下阵列都用一根单独的线路连接到处理机将会使系统的线路十分庞杂, 而且物料成本巨大。而若要将多个水下阵列采集的数据经光电转换后通过单光纤传输到处理机就需要用到光复用技术。光复用技术种类很多, 其中最为重要的是波分复用 (WDM) 技术和光时分复用 (OTDM) 技术。它们二者各有其优点, 而 WDM 在技术应用上要比 OTDM 成熟的多, 密集波分复用 (DWDM) 技术作为 WDM 的一种已经得到了广泛的应用, 目前市面上销售的 DWDM 光模块可以提供 16/20 波或 32/40 波的单纤传输容量, 有的甚至可到 160 波, 这就意味着在一根物理光纤上可以提供几十或者高达 160 个虚拟光纤通道进行数据的传输。在实际应用中, DWDM 可以有效解决网络带宽瓶颈的问题, 同时又具备扩容简单和性能可靠等诸多优点, 可以直接接入多种业务进行透明传输, 兼容不同体制和不同厂家的设备<sup>[5]</sup>, 本模块选择用 DWDM 技术实现光复用。

**收稿日期:** 2017-05-10; **修回日期:** 2017-05-26。

**基金项目:** 国家自然科学基金青年科学基金资助项目 (61301144)。

**作者简介:** 许 乔 (1986-), 男, 湖北恩施人, 博士, 讲师, 硕士研究生导师, 主要从事高速数据采集传输, 声纳系统设计方向的研究。

周艳玲 (1981-), 女, 湖北广水人, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事卫星导航, 信号处理方向的研究。

光模块与光纤属于敏感易损坏元件，且光通路属于数据传输的关键部分，所以有必要进行光路备份冗余设计。该功能可以由一片交换机芯片来实现。数据经过 PHY 芯片进行串并协议转换后通过交换机对数据进行多路转发，可支持连接多路光模块，并可实现光通路的切换，光路的选择使用只需按需对交换机芯片进行简单配置即可。同时，数据的多路转发也能带来更为灵活的拓扑，为今后扩展提供方便。

本光电交换模块配合水下以及干端处理机铜口（网线）使用，分为湿端光电板卡、干端光电板卡两部分，如图 1 所示。

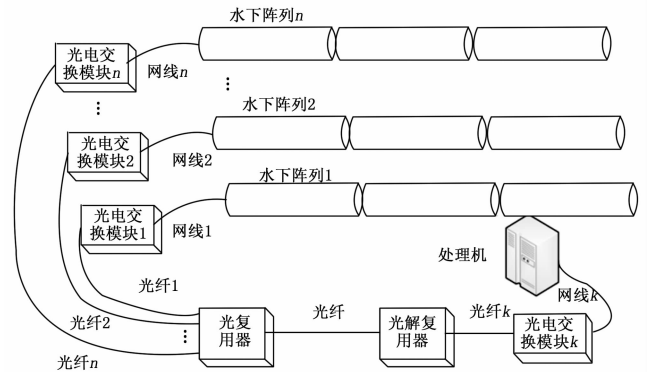


图 1 光电交换模块框图

多个水下阵列将采集到的数据通过网线传输到各自光电交换模块，将电信号转换为波长互不相同的光信号传输到光复用器，光复用器将各路光信号复用到一根光纤中进行传输，在干端光电板由光解复用器对接收的光复用信号进行解复用，经光电转换还原出采集到的电信号传输到处理机进行处理，实现了数据的上行传输；处理机命令在干端进行电光转换后经光纤发送到湿端，再由湿端进行光电转换后发送给水下采集设备，实现命令的下行传输。

2 硬件设计

2.1 设计参数

该模块的主要设计参数见表 1。

表 1 光电交换模块主要设计指标

项目名称	参数
接口	不小于 2 对光纤接口，2 个千兆以太网电接口
吞吐量	不小于 950Mbps
传输延迟	不大于 60μs
丢包率	0
传输距离	大于 50km

2.2 功能框图

该模块需实现电光、光电转换，并能够实现光通路的备份冗余，支持数据的多路转发。光电交换模块功能如图 2 所示。

板内主要集成一片最多支持 8 个千兆以太网接口的交换机芯片 BCM5389 和 2 片千兆 PHY 芯片 BCM5461，配合预留的 2 个 DWDM 光模块实现 2 路铜口和 2 路光纤接口（各有一路接口作为备份）。MCU 芯片 MC9S12NE64 实现对交换机的配置与管理。隔离电源为板内芯片供电。BCM5389 和 BCM5461 有独立的 25M 晶振电路为其提供工作时钟，同时设计有各自的复位电路。

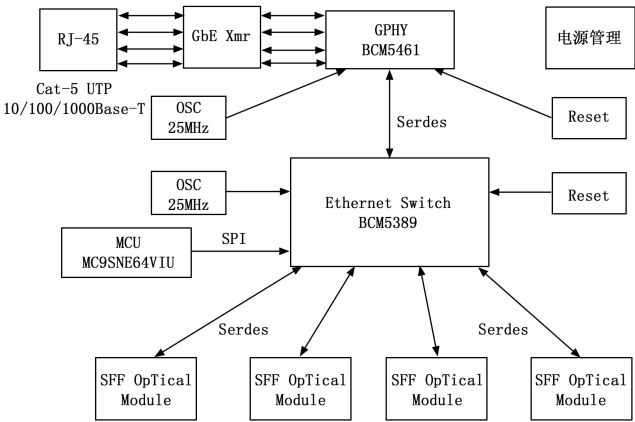


图 2 光电交换模块功能框图

2.3 芯片选择

2.3.1 交换机芯片

本模块选用 Broadcom 公司的一片全千兆交换芯片 BCM5389 为核心，其特点如下：

- 1) 集成 9 个支持 9KB 大数据帧转发的 MAC 控制器；
- 2) 集成 8 个 SerDes/SGMII 自适应接口，缓存高达 128KB；
- 3) 集成 SPI 接口，可方便访问内部寄存器进行芯片配置和管理；
- 4) 低功耗（小于 1.5W），小体积（17×17mm 256 引脚 FBGA 封装）。

2.3.2 PHY 芯片

BCM5461 芯片是 Broadcom 公司的一片 117 引脚 BGA 封装的自适应千兆 PHY 芯片，可以配置成 GBIC 模式与 BCM5389 配合使用。BCM5461 芯片特点如下：

- 1) 完全集成 10BASE-T/100BASE-TX/1000BASE-X 千兆以太网收发器；
- 2) SerDes、SGMII、GMII、RGMII、RTBI 和 MLL MAC 接口选项；
- 3) 线路侧铜缆和光纤接口，使得光纤和铜缆的应用更加灵活；
- 4) 支持 9k 巨型帧，以便高速数据传输；
- 5) 低功耗，高级电源管理，降低了系统的功率。

2.3.3 MCU

随着互联网的出现和以太网的迅速发展，基于以太网和设备控制越来越多，发展也越来越快。传统的多器件以太网连接方案是通过 MCU 扩展以太网控制器来实现，必要时还需要扩展外部 RAM 和 ROM。虽然这种方案应用起来不是很困难，但所用外部元件数量较多，系统开销较大，稳定性不高<sup>[6]</sup>。因此本模块设计时采用集成以太网 MAC 层和物理层 16 位 MCU MC9S12NE64 芯片实现单器件以太网连接，该 MCU 芯片通过 SPI 总线访问 BCM5389，并实现对其配置。MC9S12NE64 芯片特性如下：

- 1) 采用高性能 16 位 HCS12CPU 内核，3.3 V 下工作频率可达 25 MHz 或 10 MIPS，具有优化的 C 语言体系结构，可以生成十分简洁的代码；
- 2) 集成了 64 KB 的 Flash 内存和 8 KB 的静态 RAM，能够满足大多数的应用场合，如果需要还可以进行外部扩展；

- 3) 集成了 10/100 Mbps 以太网媒介访问控制器 (EMAC), 内置标准的媒介独立接口 (MII);
- 4) 集成了 10/100 Mbps 以太网物理层 (EPHY), 支持自动协商模式, 支持半双工和全双工的通讯, 并具有自诊断功能;
- 5) 带有 8 通道 10 位模数转换器 (ADC)、4 通道 16 位定时器、2 个串行通信接口 (SCI), 1 个高速串行外设接口 (SPI)、1 个具有 256 种时钟速度选项的 I<sup>2</sup>C 接口及多个 IO。

2.3.4 DWDM 光模块

光电转换以及电光转换的实现会使用到光模块, 通常光模块分为发射端和接收端两种, 发射端把电信号转换成光信号, 通过光纤传送后, 接收端再把光信号转换成电信号<sup>[7]</sup>。目前市场上 DWDM 光模块大多为 XFP 封装, 所以光模块选择了中兴公司定制光模块 WXTRXPAL1 1.25G XFP, 该光模块能传输距离规格为 80 km, 工作光波长可设定, 有不少于 40 个波长可供选择 (C 波段: 1528~1561 nm), 方便未来扩展。

2.4 硬件接口设计

板内主要硬件接口如图 3 所示。

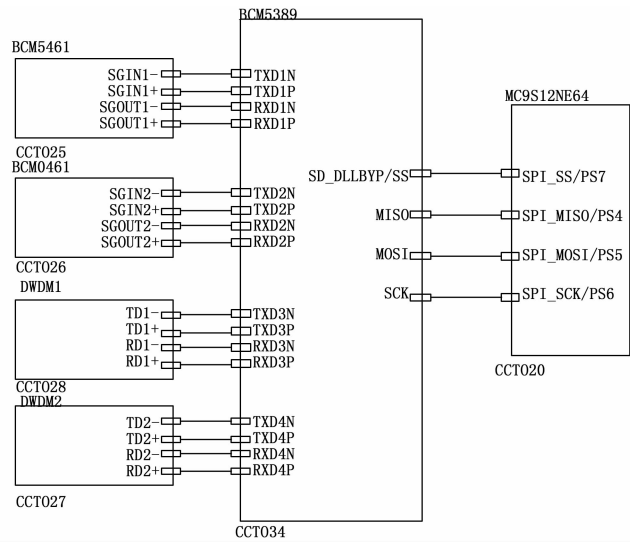


图 3 硬件接口电路

BCM5389 通过 SPI 接口与 MC9S12NE64 相连接, 并实现对内部寄存器配置与管理。BCM5389 的 SPI 四个接口为: SCK (串行时钟), SS (片选端), MOSI (主动模式输出、从动模式输入), MISO (主动模式输入、从动模式输出)。BCM5389 多运行于从模式, 因为它仅仅只需要对主控装置的读写请求进行应答。MC9S12NE64 芯片的 SPI 接口可实现与 BCM5389 的对接, SCK 与 SPI—SCK/PS6 相连, 提供接口工作时钟; SS 与 SPI—SS/PS7 相连, 为片选信号, 低电平有效; MOSI 与 SPI—MOSI/PS5 相连以及 MISO 与 SPI—MISO/PS4 相连实现对数据的读写操作。

现在许多以太网 PHY 芯片可以对物理层信号与诸多的数据链路层信号实现转换, 如 SerDes、SGMII、GMII、RGMII、MII、TBI、RTBI 等, 可以方便地实现各种接口的连接。我们所选用的 PHY 芯片 BCM5461 具有 SerDes、SGMII、GMII、RGMII、RTBI 和 MLL MAC 接口, BCM5389 集成了 8 个 Serdes/SGMII 自适应接口, 在该模块中两个 PHY 芯片 BCM5461 和两个定制 DWDM 光模块选择以 Serdes 模式与以太网芯片相

连接。Serdes 是串行器/解串器的简称, 其功能是把并行的多路信号转换为差分串行传输方式, 差分传输是采用两根线传输信号, 信号振幅相等, 相位相反, 在接收端比较这两个信号的电压差值来判断发送端发送的是逻辑 0 还是逻辑 1。差分串行传输方式具有功耗低、抗干扰能力强、对外电磁干扰小、识别精确以及速度快等特点, 理论上该接口的最高传输速率可达到 10Gbps 以上<sup>[8]</sup>。BCM5389 的 TXD 端口为数据差分输出端, RXD 端口为数据差分输入端。PHY 芯片 BCM5461 的 SGIN 端口为数据差分输入端, SGOUT 为数据差分输出端。光模块 DWDM 也通过 Serdes 接口接入以太网交换机芯片, TD 为 DWDM 光模块输入端口, RD 为 DWDM 光模块输出端口。

2.5 PCB 设计

由于该模块以以太网作为高速传输的手段, 对信道质量有较高要求, 在对 PCB 进行设计时必须考虑信号完整性以及高速电路电磁兼容设计, 考虑 PCB 叠层结构与线宽线距的选取, PCB 布局以及 PCB 布线<sup>[9]</sup>。

2.5.1 叠层与线宽线距

本板共 8 层, 其中信号层共 4 层 (1 层、3 层、6 层和 8 层), 每层可能既有差分信号又有单端信号, 均做阻抗控制; 2 层、4 层和 7 层为地层; 第 5 层为电源层。顶层和底层单端信号线宽 6.8 mil, 差分信号线宽 4.2 mil, 线距 7 mil。中间第 3 层和第 6 层单端信号线宽 7 mil, 差分信号线宽 4.5 mil, 线距 7 mil。在此基础上确定叠层结构, 以满足差分信号阻抗控制为 100 Ω, 单端信号阻抗控制为 50 Ω。

2.5.2 布局

一个好的 PCB 布局不仅可以提高板卡电路信号的完整性, 并且可以使电路板整齐美观, 便于后期的生产和维护, PCB 布局一般按以下几个主要原则进行<sup>[10]</sup>:

- 1) 按照功能划分;
- 2) 按频率划分;
- 3) 按信号类型划分;
- 4) 综合布局。

2.5.3 布线

由于该模块以千兆以太网作为高速传输手段, 对信道质量有较高要求, 在 PCB 布线过程中需要遵循高速信号布线规则<sup>[11]</sup>:

- 1) 高速信号走线屏蔽规则;
- 2) 高速信号走线闭环规则;
- 3) 高速信号的特性阻抗连续规则;
- 4) 高速信号走线方向规则;
- 5) 高速信号走线回路路径规则。

2.6 硬件初始化及备份链路切换

模块在启动时还必须进行初始化操作, 并需要对备份链路切换进行设置。备份链路切换流程如图 4。

首先上电, 对以太网交换机各端口进行初始化。BCM5389 共集成了 8 个 Serdes/SGMII 自适应接口, 将连接备份光模块对应接口设置为 SGMII 模式 (光模块只能在 BCM5389 的端口设置为 Serdes 模式时与以太网交换机进行数据的传输), 其他 7 个接口都设置为 Serdes 模式。初始化完成后链路是没有进行过切换的, 通过验证信息的发送与接收对光通路的状态进行判断, 如果 2 秒内光路没有接通则对光路进行切换; 否则一直进行光通路的检测, 直到通路无法使用进行切

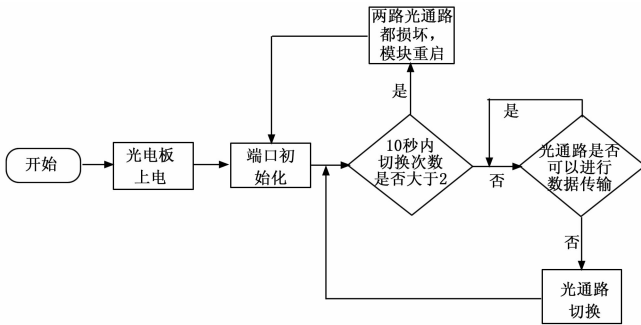


图 4 模块备份链路切换流程

换。光通路切换后对规定时间内的切换次数进行判断，如果 10 秒内切换的次数超过 2 次则表明两条光通路都无法使用，模块重启并循环以上操作；否则一直进行光通路的通断检测，直到通路无法使用再次进行切换。由于在海水中光纤有可能受到挤压与弯折或者其他原因导致光通路不通，而不一定是光模块和光纤的永久损坏引起的，所以可以对两个光通路进行反复多次切换。

3 性能测试

吞吐量、延时、丢帧率以及 Back-to-Back 这四个性能指标是判断网络传输链路性能优劣的重要依据。网络数据测试仪在全球范围有两个大厂商，分别是思博伦和 Ixia。我们对该模块进行网络测试使用的是思博伦的 SmartBits 600B，测试配套软件选择了 SmartApplication；可为多种网络设备提供吞吐量、时延、丢包率和 Back-to-Back 的测试。

测试回路如图 5 所示。将两块光电交换模块通过光纤级联，一块作为数据接收端通过网线与 SmartBits 600B 相连，另一块则作为数据发送端与 SmartBits 600B 相连，这样就构成了一个数据传输的完整回路，同时也可以对数据进行反向传输。计算机通过网卡与 SmartBits 600B 连接，并在计算机上运行 SmartApplication 软件实现对测试的设置与控制。测试结果以表格形式进行输出。

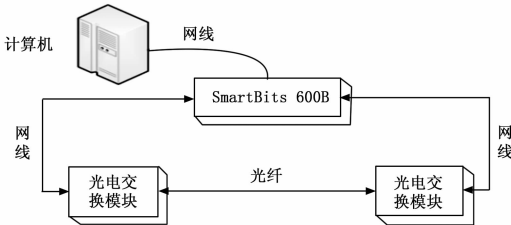


图 5 两块光电交换模块级联测试

吞吐量测试结果以 SmartApplication 软件输出表格形式呈现，如图 6。以典型数据帧长 64byte、128byte、256byte、512byte、1024byte、1280byte 和 1518byte 对模块的吞吐量进行测试。以下以 64byte 为例对其吞吐量进行计算。吞吐量计算的通常公式为  $(L+8+M) \times 8 \times N=1000M$ ， $L$  为以太网帧长（此处为 64byte）； $M$  为包间隙（当设备满流量发送数据，则其最小包间隙应该 12byte）； $N$  为设备每秒发出的数据帧的个数；括号中的 8 为每个以太网帧前面的 7 个前导码和 1 个定帧字节；括号外面的 8 为一个 byte 包含 8 个 bit；1000M 表示物理层的 bit 速率。由此公式可计算在千兆速率下以 64byte 为帧长所能转发的最多数据包数量应该为：

$$N = 1000M / (8 \times (64\text{byte} + 8\text{byte} + 12\text{byte})) = 1488095.238$$
，四舍五入为 1488095。

由测试结果图可知在帧长为 64byte 情况下端口（01，02，01）对端口（01，02，02）进行数据传输时每秒可以传输 1488095 个数据包，端口（01，02，02）对端口（01，02，01）进行数据传输时每秒同样可以传输 1488095 个数据包，因此全双工传输吞吐量为 100%。

以此类推可计算出在数据帧长为 128byte、256byte、512byte、1024byte、1280byte 和 1518byte 的情况下进行数据传输的吞吐量都达到了 100%。

吞吐量为 100% 也表明该模块在满负荷状态进行数据传输时的丢包率为 0（通常情况下丢包率 + 吞吐量 = 1），即该模块正常工作时完全可以达到千兆的传输速率，符合大于 950Mbps 的设计需求。

Throughput Test									
		Test duration (sec): 30				Number of pairs: 1			
		Minimum frame size (byte): 64				Initial rate (%): 100.00			
		Maximum frame size (byte): 1518				Maximum rate (%): 100.00			
		Step frame size (byte): Custom				Resolution rate (%): 1.00			
						Mode: Bi-directional			
Frame Size	Passed Rate(%)	(01,02,01) to (01,02,02) (pkts/sec)	(01,02,02) to (01,02,01) (pkts/sec)	Total					
64	100.00	1488095	1488095	2976190					
128	100.00	844595	844595	1689190					
256	100.00	452899	452899	905798					
512	100.00	234962	234962	469924					
1024	100.00	119732	119732	239464					
1280	100.00	96154	96154	192308					
1518	100.00	81274	81274	162548					

图 6 吞吐量测试结果

延时测试结果以 SmartApplication 软件输出表格形式呈现，如图 7。以典型帧长 64byte、128byte、256byte、512byte、1024byte、1280byte 和 1518byte 对模块的直通转发延时和存储转发延时性能进行测试。从目标数据帧从第一位进入设备开始计时到目标数据帧第一位出现在输出端口结束计时，两者时间差为直通转发设备的延时；从目标数据帧从最后一位进入设备开始计时到目标数据帧第一位出现在输出端口结束计时，两者时间差为存储转发设备的延时。通常情况下存储转发延时会略小于直通转发延时。

CT: Out Through (or FIFO), S&F: Store & Forward (or LIFO)

Latency Test

Test duration (sec): 30

Minimum frame size (byte): 64

Maximum frame size (byte): 1518

Step frame size (byte): Custom

Number of pairs: 1

Initial rate (%): 100.00

Step Rate: 5.00

Resolution rate (%): None

\*\* Measure on one receiving card only. Mode: SmartMetrics Comp. Mode

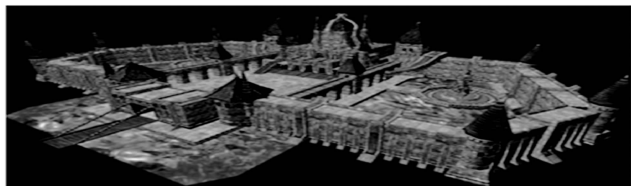
Mode: Bi-directional

Frame Size	Rate Tested(%)	(01,02,01) to (01,02,02) (us): CT	Average (CT)	(01,02,01) to (01,02,02) (us): S&F	Average (S&F)
		108~108		108~108	
64	100.00	6.3	6.3	5.8	5.8
128	100.00	8.6	8.6	7.5	7.5
256	100.00	12.8	12.8	10.8	10.8
512	100.00	21.5	21.5	17.4	17.4
1024	100.00	38.6	38.6	30.5	30.5
1280	100.00	47.3	47.3	37.0	37.0
1518	100.00	55.5	55.5	43.3	43.3

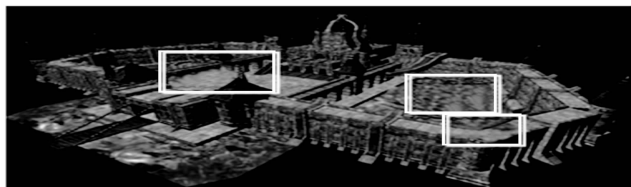
图 7 延时测试结果

以 64byte 为例，在发送速率为 100%（即满负荷工作情况下），从端口（01，02，01）到端口（01，02，02）的直通转发延时为 6.3 us；从端口（01，02，01）到端口（01，02，02）的存储转发延时为 5.8 us。在其他典型帧长的情况下的直通转发延时和存储转发延时就不再赘述。由测试数据可知该模块在满负荷时延时为几微秒到几十微秒，而且如果模块处在非满载的工作状态时会有更低的延时，说明该模块正常工作时不会产生过大转发延时影响到数据的传输的实时性。

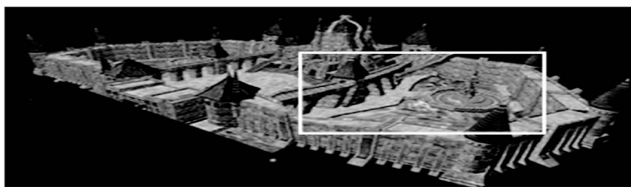
（下转第 206 页）



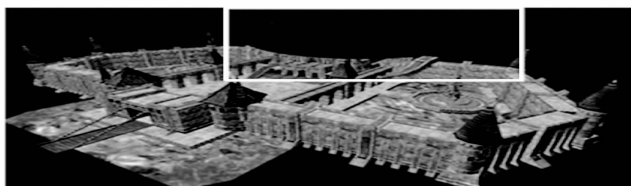
(a) 本文方法三维重构后的物体三维显示



(b) 文献[7]方法三维重构后的物体三维显示



(c) 文献[10]方法三维重构后的物体三维显示



(d) 轮廓法三维重构后的物体三维显示

图 2 不同方法三维重构后的物体三维显示

合图 2 和表 1 结果可知, 采用本文方法能够计算点云数据之间的关系和深度信息, 使重构的物体三维模型较为精细, 能够实现自动化重构, 文献 [7] 方法和文献 [10] 方法空间复杂度

(上接第 202 页)

以上对该模块吞吐量、延时的测试结果说明了该模块具有优越的性能。

## 4 结语

本文设计一用于声纳湿端数据远传的光电交换模块。该模块主要提供光—电、电—光转换的功能, 可将接收到的电信号转换为选定波长的光信号, 使得光复用器将多路信号复用到一根光纤中成为可能。两个 DWDM 光模块与以太网交换机芯片的使用不仅可以完成光通路的冗余备份和切换, 而且带来更为灵活的拓扑, 为今后扩展提供方便。由测试结果可以看出该模块具有优越的性能, 高吞吐量以及低延时为声纳湿端数据传输的可靠性和实时性提供了保障。该模块不仅可用于声纳湿端, 亦可应用于其他对远距离数据传输有需求的领域, 具有较为广泛的应用价值。

## 参考文献:

[1] 韩红霞, 等. 光电跟踪设备数字视频图像信息光纤传输系统设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18 (5): 1219-1225.

和时间复杂度均较低, 但易受外界环境影响, 导致重构结果存在一定的偏差, 轮廓法物体三维重构结果取决于物体轮廓像数量, 计算过程较为繁琐, 使得重构复杂度较高, 相比之下验证了本文方法物体三维重构模型的综合有效性。

## 4 结论

本文以三维激光扫描技术为研究基础, 提出一种基于三维激光扫描的物体重建建模方法。实验结果表明, 所提方法重构的物体三维模型精度较高, 解决了当前采用摄像机拍摄获得的物体重建精度低的问题, 但该方法难以保证实时性要求, 未来一段时间内, 需要对这一方面进行深入研究, 继续研发三维激光扫描技术, 通过实践对缺陷方面进行针对性解决。

## 参考文献:

[1] 申超群, 高 静. 基于 VTK 的 SRM 断面图像三维重建系统构建[J]. 计算机仿真, 2016, 33 (3): 90-94.  
[2] 胡笑莉, 仲思东. 基于立体视觉的三维立体模型全自动拼接方法[J]. 科学技术与工程, 2015, 15 (12): 75-80.  
[3] 阳建中, 陈慧蓉, 胡例蕊. 基于 SIFT 特征检测和三次插值样条的快速曲面重构算法[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (1): 185-187.  
[4] 于天慧, 孙金玮. 面向复杂场景的未标定两视图三维重构方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016, 28 (8): 1232-1241.  
[5] 袁 甜, 张海荣, 程红阳, 等. 小型通用医学图像处理软件的设计与实现[J]. 电子设计工程, 2016, 24 (8): 138-140.  
[6] 李 辉. 基于虚拟双目视觉的玉米叶片三维重建方法[J]. 科技通报, 2016, 32 (5): 96-101.  
[7] 郭伟青, 汤一平, 夏少杰, 等. 基于镜面折射反射全景成像的三维重建方法研究[J]. 高技术通讯, 2015, 25 (z2): 878-885.  
[8] 白素琴, 等. 采用可编程逻辑控制器的大型物体三维扫描重建[J]. 光学精密工程, 2017, 25 (4): 1044-1050.  
[9] 林 晓, 王燕玲, 朱恒亮, 等. 基于自适应权值的点云三维物体重建算法研究[J]. 图学学报, 2016, 37 (2): 143-148.  
[10] 李 想, 胡剑凌, 张 霞, 等. 基于高光消除的 SFS 三维重构算法研究[J]. 电视技术, 2015, 39 (21): 107-110.  
[2] 高 冰. 光纤通信技术应用及发展趋势探求[J]. 数字通信世界, 2016, 7: 11.  
[3] 荆 游, 王赞超, 蔡 磊. 基于 SFP 光模块的机载高分辨率视频信号传输技术[J]. 科技创新导报, 2015, 34: 30-32.  
[4] 王建国. DWDM 技术在传输网中的应用[D]. 南京: 南京邮电大学, 2014.  
[5] 肖建平. DWDM 技术在广电城域网中应用(下)[J]. 电视工程, 2016 (1): 24-26.  
[6] 胡荣强, 李 涛, 徐 丹. 基于 MC9Si2NE64 型单片机的嵌入式以太网连接[J]. 国外电子元器件, 2006, 1: 44-46.  
[7] 王 佳. 光模块的研究与测试[D]. 太原: 中北大学, 2014.  
[8] 任立强. 列车以太网交换机硬件设计与实现[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.  
[9] 邓文博. 基于 Zynq7010 的列车以太网交换机硬件设计及实现[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.  
[10] 周润景, 刘梦男. Cadence 高速电路设计与仿真(第 4 版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.  
[11] 路宏敏, 安晋元, 赵益民, 等. 印制线拐角的频域分析[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41 (12): 1451-1454.