

基于分布式视频编码的低能耗视频传感器节点研究

刘奕君^{1,2}, 张立³, 赵强^{1,2}, 毛亚青²

(1. 徐州医学院 医学现代教育技术中心, 江苏 徐州 221009; 2. 徐州医学院 医学信息学院, 江苏 徐州 221009;
3 徐州医学院 医学影像学院, 江苏 徐州 221009)

摘要: 在无线多媒体传感器网络中, 如何提高节点能源的利用率, 延长整个网络的生命周期是当前迫切需要解决的关键问题; 从视频数据处理和传输能耗的角度出发, 对分布式视频编码(DVC)基础理论与视频传感器节点的能耗模型进行分析和研究; 通过实验仿真的方式将 H.264 帧内编码方案同 DVC 方案进行比较, 实验结果表明了 DISCOVER-DVC 方案在节点节能方面的优势; 最后基于 DISCOVER-DVC 算法, 在 S3C6410 硬件平台和嵌入式 Linux 操作系统平台之上完成视频传感器节点设计, 来降低节点能耗, 提高节点生命周期。

关键词: 分布式视频编码; 无线多媒体传感器网络; 能耗; 嵌入式 Linux

Research of Low Energy Consumption Video Sensor Node Based on Distributed Video Coding

Liu Yijun^{1,2}, Zhang Li³, Zhao Qiang^{1,2}, Mao Yaqing²

(1. Modern Educational Technology Center, Xuzhou Medical College, Xuzhou 221009, China;
2. School of Medicine Information, Xuzhou Medical College, Xuzhou 221009, China;
3. School of Medical Imaging, Xuzhou Medical College, Xuzhou 221009, China)

Abstract: It is necessary to improve energy efficiency of WMSN node to maximize prolong the lifecycle of the networks, since WMSN's energy is limited and media information processing needs large energy consumption. This article focused on how to reduce the node data processing and transmission energy consumption with the video coding research. It compared the energy consumption of H.264 intra-frame coding scheme and the DVC scheme through simulation to analyze the data processing and transmission energy consumption of these two scheme. The results show that the DVC scheme can effectively reduce the energy consumption of the video sensor node. At last, it realized the DVC theory-based encoding scheme on the video sensor node based on S3C6410 and embedded Linux operating system to reduce energy consumption.

Keywords: distributed video coding; WMSNs; energy consumption; embedded Linux

0 引言

能耗问题是限制 WMSNs 发展主要因素之一^[1], WMSNs 中的节点应该具备功耗低, 体积小等特点, 要求传感器节点在没有外部供电设施的环境下, 利用自备电池也可以进行较长时间的工作。由国内外发表的研究成果可以看出, 关于 WMSNs 的节能研究主要集中在节点系统、MAC 协议^[2]、路由协议^[3]、多媒体数据处理^[4]等方面。传统的图像视频编码算法, 编码端算法比较复杂, 需要消耗较多的计算资源和能量, 而传感器节点的能量有限, 这也就限制了节点即编码端的计算能力。分布式视频编码(distributed video coding, DVC)与传统的图像视频编码算法相比, 具有编码端简单, 解码端复杂的特点, 适合于编码端计算能力和能耗受限的应用场景^[5]。本文利用 DISCOVER-DVC 视频编码方案这一特点, 将其应用到 WMSNs 来降低视频传感器节点的能耗。

1 相关基础理论

1.1 分布式视频编码理论

分布式信源是指对两个或多个相关信源各自独立编码, 每个编码器都不能访问其它信源, 编码产生的所有码流汇聚到一个解码器进行联合解码以去除信源间的冗余, 分布式视频编码的理论基础是 Slepian-Wolf 理论和 Wyner-Ziv 理论。

Slepian-Wolf 定理解决了以下编码问题: 两个统计相关的、独立分布的离散随机序列和, 在编码端进行独立的编码, 而不是像传统的预测编码方案一样进行联合编码^[6]。Slepian-Wolf 定理表明, 在无损条件下, 对两个相关信源进行独立编码所需要的最小码率和联合编码所需的最小码率相同。分布式信源编码方法是针对新的应用场景的研究成果, 至少在理论上, 单独编码和联合解码相对于传统的联合编解码方案在压缩性能上没有损失

Wyner 和 Ziv 对无损压缩的分布式编码方案进行了讨论, Wyner-Ziv 编码方案中利用了虚拟信道的方法, 根据信源与之间的相关性对虚拟信道进行构建。信源作为虚拟信道的输入信号, 信源作为信道的输出信号, 虚拟信道中所产生的误码就是与之间的差值。基于 Wyner-Ziv 理论的无损编解码系统是由基于 Slepian-Wolf 利用的无损编解码系统与量化模块组成的。如图 1 所示, 在编码端, 首先对信源进行量化, 得到量化后的信息, 再对进行 Slepian-Wolf 编码, 将编码后的信息传到解码

收稿日期: 2014-05-29; 修回日期: 2014-07-09;

基金项目: 徐州市科技计划项目(XM13B021); 徐州市科技计划项目(XM12B077)。

作者简介: 刘奕君(1983-), 女, 江苏连云港人, 讲师, 主要从事传感器网络、图像处理方向的研究。

赵强(1958-), 男, 江苏徐州人, 教授, 主要从事医学信息、信号处理方向的研究。

端, 在解码端, 利用收到的编码信息和边信息由和边信息进行 Slepian-Wolf 解码得到, 对进行重建值得到。Wyner-Ziv 编码问题可以抽象成一个信源信道编码的问题。

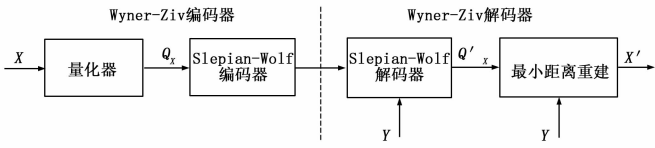


图 1 Wyner-Ziv 编解码系统框图

欧盟 IST FET 的 DISCOVER 项目小组提出的 DISCOVER 编码方案并提出全面的性能评估方案, 是目前分布式视频编码构架中性能较好的方案, DISCOVER 小组的 WZ 视频编码结构如图 2 所示^[8-9]。它以早期的斯坦福 WZ 视频编解码结构为基础, 对其进行了很大的改进, 比如, 解除了原始结构中需要在解码端使用原始信息的限制, 边信息的生成和重建也得到了改进, 引入了 LDPCA 码进行 Slepian-Wolf 编码以及利用 CRC 编码来检错。

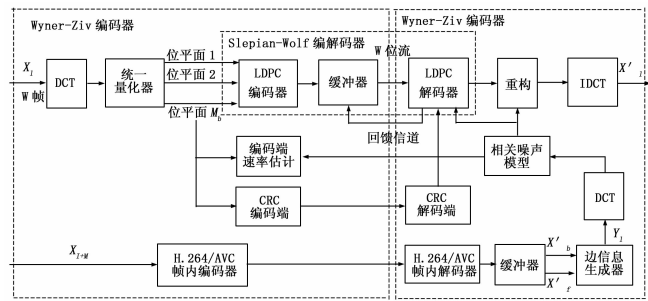


图 2 DISCOVER 视频编码框架

1.2 多媒体传感器节点能耗模型

在无线通信中, 发射功率随着传输距离的增大而呈指数衰减。这里选用自由空间 (free space) 信道模型和多路径衰减 (multi-path fading) 信道模型进行建模^[10]。在这种模型下, 传输距离为时, 位数据的收发能耗可用式 (1) 和 (1) 表示。发送能耗:

$$E_{TX}(k, d) = E_{TX-elec}(k) = E_{TX-amp}(k, d) \\ = \begin{cases} k \cdot E_{elec}(k) + k \cdot \epsilon_{fs} \cdot d^2(k, d) + \alpha N C_L V_{dd}^2, & d < d_0 \\ k \cdot E_{elec}(k) + k \cdot \epsilon_{mp} \cdot d^4(k, d) + \alpha N C_L V_{dd}^2, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (1)$$

接收能耗:

$$E_{Rx}(k) = E_{Rx-elec}(k) = k \cdot E_{elec} \quad (2)$$

其中: E_{elec} 是基于数字滤波器、编码、模型等电路的收发器线路之间的能量消耗; 放大器的能量消耗 $\epsilon_{fs} d^2$ 和 $\epsilon_{mp} d^4$ 在可接受的容错率下, 取决于传输的距离; 一般情况下 $E_{elec} = 50$ nJ/bit, $\epsilon_{fs} = 10$ pJ/bit/m², $\epsilon_{mp} = 0.0013$ pJ/bit/m⁴, $d_0 = 87$ m。

基于 CMOS 技术的处理器功耗主要可分为两部分^[10]: 动态功耗 P_d , 由电容充放电导致; 漏电功率 P_{leak} , 由漏电流导致。

$$P_d = \alpha C_L V_{dd}^2 f \quad (3)$$

其中: α 为电路开关活动因子, C_L 为负载电容, V_{dd} 为工作电压, f 为工作频率。若 N 为完成某个处理任务所占用的 CPU 时钟周期数, 则处理该任务所需能耗为:

$$E_{act} \approx P_{act} \cdot t = \alpha N C_L V_{dd}^2 \quad (4)$$

多媒体节点数据处理和传输会消耗很大一部分的能量, 视

频传感器节点是一种具有代表意义的多媒体节点。我们主要研究 CPU 处理能耗和数据传输能耗, 所以在将传感器节点的消耗模型简化为:

$$E_{ST} = E_{act} + E_{Tx} \quad (5)$$

2 视频节点能耗仿真分析

选择 H.264 帧内编码方案与 DISCOVER-DVC 方案进行对比, 视频源选用大小为 QCIF (176 × 144) 的 15 fps 的标准视频序列 Forman 序列、Coastguard 序列、Claire 序列、Container 序列。在 Intel 双核 2.0 GHz, 512 M 内存的虚拟机和 Red Hat Linux Enterprise 6.0 系统平台上, 分别对上述视频序列进行 H.264 帧内编码方案和 DISCOVER-DVC 方案的压缩编码, 统计数据代入公式 (5), 得到不同 PSNR 下节点编码和传输总能耗, 这里 $V_{dd} = 1.8$ V, $C_L = 0.67$ nF, $\alpha = 2$, 实验结果如图 3 所示。

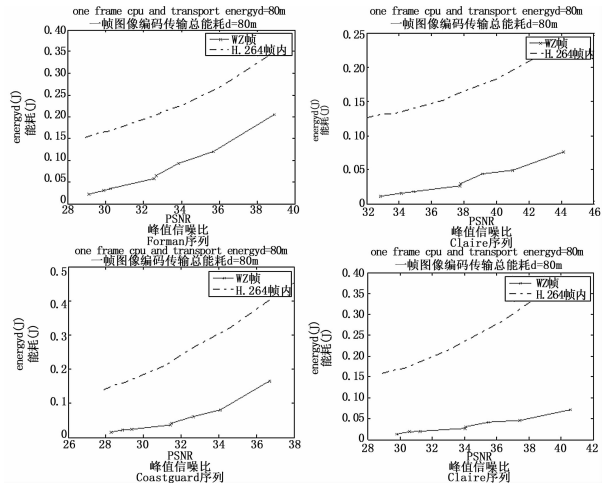


图 3 节点总能耗对比 ($d = 80$ m)

从图中可以看出与 H.264 帧内编码方案相比, 利用 DISCOVER-DVC 方案中的 WZ 帧编码可以达到 WMSN 节点节能的效果。分布式编码方案在一定程度上对视频时间域的冗余信息进行压缩, 编码方案的压缩性能和视频帧之间的相关性有着重要的关系, 下面抽取不同帧率 foreman 序列进行视频编码方案的性能进行仿真分析。不同帧率下节点处理和发送图像数据总能耗仿真结果如图 4 所示。

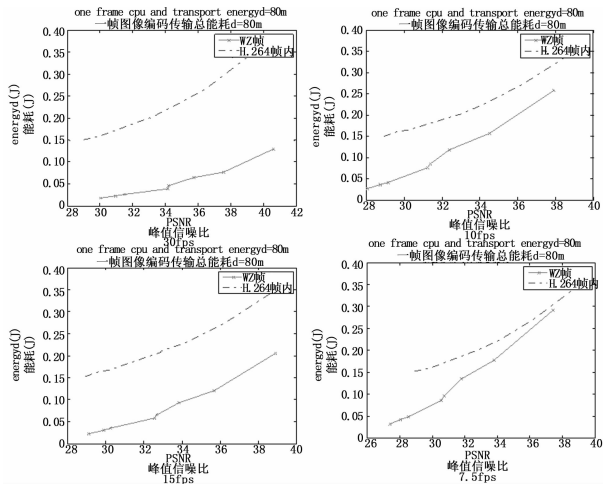


图 4 不同帧率下总能耗对比 ($d = 80$ m)

分析仿真结果可以发现, 帧率即视频帧之间的相关性对分布式视频编码方案的压缩性能有较大的影响, 所以实际应用时, 应该根据应用场景的帧率需求来动态的选择合适的编码方案, 最大限度的节省能耗。当帧率比较低的时候应该选择传统的视频或图像编码算法, 帧率较高时则应该选择 DISCOVER-DVC 方案。

3 视频传感器节点设计

3.1 节点硬件设计

视频传感器节点需要能够对图像数据进行采集, 编码和传输, 这就对节点硬件的计算能力提出了较高的要求, 同时, 节点本身能量有限, 有需要尽可能的降低节点的能耗, 所以合适的硬件平台选择对节点地应用有着重要影响。这里选用 ARM11 核心的 S3C6410 处理器作为节点的主处理器, S3C6410 是具备低成本、低功耗、高性能等特点的微处理器解决方案, 内部集成了多种视频图像格式的编解码器^[1]。S3C6410 可以稳定工作在 600 MHz 的频率之上, 能够满足这里视频图像实时编码算法的需求。CMOS 图像传感器模块具有低功耗、高集成度的优点, 选择 CMOS 摄像头模块可以满足一般视频监控应用的需求。

节点硬件平台主要由以下几个部分构成: 主处理器, CMOS 摄像头模块, 存储器, WIFI 无线模块, 供电部分等。主处理器通过 CMOS 摄像头模块进行数字图像数据的采集, 对采集到的数字图像数据进行编码处理, 利用自身的硬件编码模块完成关键帧的编码, 然后通过软件方式完成对 WZ 的编码工作。编码后的数据通过 WIFI 无线模块转发到路由节点, 最后传输到服务器端进行解码。节点硬件框架如图 5 所示。

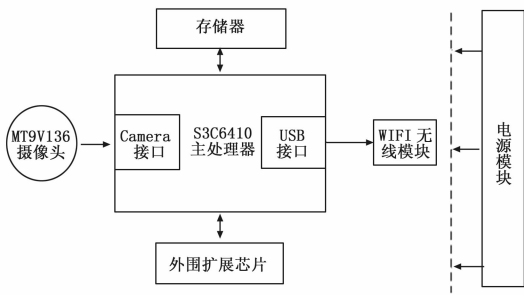


图 5 节点硬件平台设计框图

3.2 节点软件设计

选择 Linux 操作系统作为节点的软件系统平台, 首先进行系统软件平台的搭建, 需要根据节点的硬件平台情况, 完成 Linux 操作系统的裁剪和移植, 根据自己选用的设备, 完成驱动程序的移植工作。在系统软件的基础之上进行应用软件设计, 完成图像数据的采集, 基于分布式视频编码算法的软件设计。驱动软件为应用层软件提供了统一的服务接口, 驱动程序直接与硬件设备进行交互, 完成设备的初始化, 以及与设备直接的数据通信, 并向操作系统文件系统提供设备文件操作接口。应用层使用相应的系统调用, 就可以完成对设备的操作以及与设备之间的通信。依据 DISCOVER-DVC 编码方案, 将视频源分为 K 帧和 Wyner-Ziv 帧, 采用 S3C6410 提供的硬件多媒体处理模块可实现 H.264 编码, 为 K 帧的编码提供了方便。Wyner-Ziv 帧则采用 C++ 编写的编码器进行编码。应用软件主要包括两个部分, 视频采集编码模块和数据传输模块。视频

采集编码模块进行视频信号采集并将采集到的数字视频信息进行基于 DISCOVER-DVC 分布式视频编码压缩; 数据传输模块利用 UDP 传输协议将编码好的视频流通过 Wi-Fi 模块发送解解码端, 系统软件框架如图 6 所示。

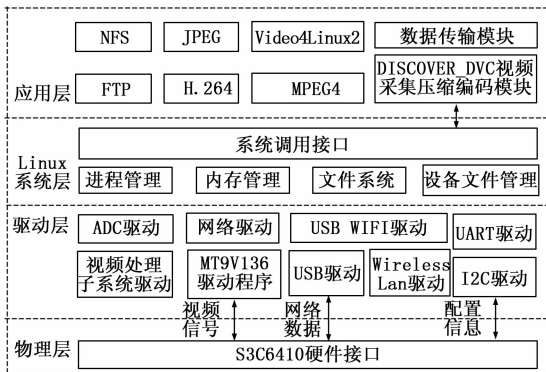


图 6 视频传感器节点的软件设计框图

4 实验结果与分析

搭建好整个无线多媒体传感器网络系统平台后, 启动无线视频传感器节点, 节点通过 Wi-Fi 无线网络连接到服务器, 在服务器上运行分布式视频解码播放器, 对系统的无线传输能力和视频解码效果进行测试, 设定视频传感器节点的分辨率为 640×480 、帧率为 15 fps、码率为 1 Mbps, 编码方案采用 DISCOVER-DVC 编码方案。首先进行传输距离测试, 移动视频节点的位置, 分别在距无线接入点 40 m、60 m、80 m 处对视频服务质量进行监测, 在服务器端可以访问到的质量清晰、播放流畅的实时视频信息。然后对 WMSNs 的多跳传输性能进行测试, 测试系统端到端传输带宽与跳数之间的关系, 来分析多跳无线网络提供视频传输服务的能力, 在楼宇之间空旷区域布置视频传感器节点, 相邻节点之间的距离 75 m, 当节点经过一跳直接与服务器进行数据传输时, 网络会保持 8 Mbps 的传输带宽, 但随着无线网络跳数的增加, 网络带宽会急剧下降, 跳数增加到 5 跳后, 网络吞吐量下降到 1 Mbps 左右, 测试结果如图 7 所示。实验结果说明, 在 WMSNs 中, 对于分辨率为 640×480 、帧率为 15 fps、码率为 1 Mbps, 采用 DISCOVER-DVC 编码的视频流经过 5 跳的传输后, 在服务器端依然可以解码出清新的实时视频信息。为了进一步提高无线传输深度(跳数), 需要降低视频分辨率, 或视频帧率, 通过第二节仿真结果可知, 随着视频帧率的下降, DISCOVER-DVC 编码方案会逐渐失去在能耗方面的优势, 当帧率下降到 7 fps 以下时, 可以采用传统的视频编码方案代替 DISCOVER-DVC 编码方案。因此, 在进行视频传感器节点设计时可以同时固化 DISCOVER-DVC 编码器和传统视频编码器, 使得传感器可以

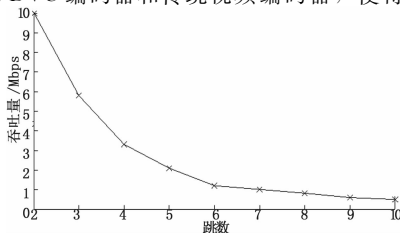


图 7 网络吞吐量与节点跳数的关系

根据网络环境和视频参数的变化选择合适的编码方案。

参考文献:

[1] 鲁琴, 杜列波, 左震. 无线多媒体传感网络节点能耗问题评述 [J]. 传感器与微系统, 2008, 12: 1-3.

[2] 李瑞芳, 李仁发, 罗娟. 无线多媒体传感器网络 MAC 协议研究综述 [J]. 通信学报, 2008 (8): 111-123.

[3] 曹啸, 王汝传, 黄海平, 等. 无线多媒体传感器网络视频流多路径路由算法 [J]. 软件学报, 2012 (1): 108-121.

[4] Gurses E, Akan O. B. Multimedia communication in wireless sensor networks [J]. Ann Telecommun, 2005, 60 (7-8): 799-827.

[5] 樊晓平, 熊哲源, 陈志杰, 等. 无线多媒体传感器网络视频编码研究 [J]. 通信学报, 2011 (9): 137-146.

[6] Slepian J D, Wolf J K. Noiseless coding of correlated information

sources [J]. IEEE Transaction on Information Theory, 1973 (22): 471-480.

[7] Wyner A, Ziv J. The rate-distortion function for source coding with side information at the decoder [J]. IEEE Trans. Inform. Theory, 1976 (22): 1-10.

[8] 贺红. 基于 Wyner-Ziv 视频编码的高效编码算法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.

[9] Artigas X, Ascenso J, Dalai M, et al. The Discover Codec: Architecture, Techniques and Evaluation [A]. Picture Coding Symposium [C]. Lisboa, Portugal. Nov. 2007.

[10] 高妍. 无线传感器网络节点能耗建模与仿真 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.

[11] 康维新, 郑威威, 杨文斌, 等. 基于 S3C6410 和 Linux 的 H.264 编码器的实现与优化 [J]. 计算机测量与控制, 2012 (8): 2220-2222.

(上接第 328 页)

3.2 仿真测试

首先采用 multisim 仿真软件对电路的 V/F 转换器、光纤传输单元进行仿真, 设输入的模拟电压信号为 V_{in} , V/F 转换器输出的脉冲信号频率为 F_1 , 仿真结果见表 1。

表 1 仿真测试数据

序号	1	2	3	4	5	6
V_{in} (V)	0.01	0.1	0.5	1	3	5
F_1 / (Hz)	14.07	140.73	703.63	1 407.26	4 221.79	7 036.31

如表 1 所示, V_{in} 与 F_1 之间函数关系和 V/F 转换器的转换公式一致, 因为模拟环境下系统不会受到外界的任何干扰。

3.3 实验测试

采用泰克信号发生器输出直流电压信号 V_{in} , 来模拟传感器输出的电压信号, 示波器测量 V/F 转换器输出的脉冲信号 (同时也是光纤发送器输入的信号), 频率为 F_{x1} ; 示波器测量光纤接收器输出的脉冲信号频率为 F_{x2} ; FPGA 测量单元测量到的脉冲信号频率为 F_{x3} 。各个部分的测量结果见表 1。

表 2 实验测试数据

序号	1	2	3	4	5	6
V_{in} / (V)	0.01	0.1	0.5	1	3	5
F_{x1} / (Hz)	14.62	143.46	703.63	1 405.85	4 225.18	7 040.420
F_{x2} / (Hz)	14.60	143.54	695.43	1 404.16	4 223.58	7 042.250
F_{x3} / (Hz)	14.60	143.58	695.81	1 405.21	4 224.30	7 040.953

4 实验数据分析

当 V_{in} 小于 1V 时, V/F 转换器的实际输出频率 F_{x1} 和理论频率 F_1 之间的误差大于 1%, 且 V_{in} 越小误差越大。可以在信号输入端叠加一个标准 1V 直流电压信号, 这样可以大大提高 V/F 转换器的精度。当 V_{in} 大于 1V 时, 光纤发送器输入信号的频率 F_{x2} 和光纤接收器输出的信号频率 F_{x3} 之间的误差很小, 整个系统传输的误差小于 0.1%。

5 结束语

本文将光纤系统应用于工业大功率微波加热设备模拟信号的传输, 有效的屏蔽了传输线路受到外界的电磁干扰。采用 FPGA 等精度测频法, 实现了信号的快速、精准测量。经过实验验证, 信号传输过程中不受外界电磁干扰, 信号传输和测量的误差小于 0.1%。

参考文献:

[1] 王永周, 陈美, 邓维用. 我国微波干燥技术应用研究进展 [J]. 干燥技术与设备, 2008, 6 (5): 219-223.

[2] 黄卡玛, 卢波. 微波加热化学反应中热失控条件的定量研究 [J]. 中国科学 (E 辑), 2009, 39 (2): 266-271.

[3] 刘长军, 申东雨. 微波加热陶瓷中热失控现象的分析与控制 [J]. 中国科学 (E 辑), 2008, 38 (7): 1097-1105.

[4] Wu X, Thomas J R, Davis W A. Control of thermal runaway in microwave resonant cavities [J]. J Appl Phys, 2002, 92 (6): 3374-3380.

[5] Parris P E, Kenker V M. Thermal runaway in ceramics arising from the temperature dependent of the thermal conductivity [J]. Phys Status Solidi B, 1997, 200 (1): 39-47.

[6] 赵新旗, 莫德举, 刘丽欣. 井下模拟信号的转换传输 [J]. 中国仪器仪表, 2005 (12): 89-91.

[7] 王继业, 钮金真, 王东明. 一种新颖的模拟信号光电隔离方法 [J]. 仪表技术与传感器, 2003 (1): 38-39.

[8] 裘建才. 用红外传输实现计算机监测系统串行通信的设计 [J]. 煤矿自动化, 2001 (1): 11-13.

[9] 史萌萌, 江海河. 模拟光纤传输模块的原理与设计 [J]. 光学与光电技术, 2007, 5 (6): 21-23.

[10] 林汉. LM331 压频变换器的原理及应用 [J]. 国外电子元器件, 1999 (10): 20-22.

[11] Tayahi, Fan H, Webster R, et al. Digital and Analog Transmission through Polymer Optical Fiber [J]. The International Society for Optical Engineering, 1998, 3414 (8): 268.

[12] 朱亚朋, 李鸿鹏, 霍德强, 等. 基于 AD650 的模拟信号光纤传输系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (6): 1662-1664.

[13] 李红刚, 张素萍, 杨林楠. 基于 FPGA 的高速等精度频率测量系统设计 [J]. 微计算机信息, 2008, 24 (32): 218-228.