

## 一种位置可调整的实时图像预畸变方法

郑永瑞<sup>1,2</sup>, 林秋华<sup>2</sup>, 王全忠<sup>1</sup>, 武静<sup>1</sup>

(1. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000;

2. 大连理工大学信息与通信工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 图像几何畸变在大视场光学系统中非常普遍, 对于高畸变率光学系统以及高分辨率图像的实时几何畸变校正成为一个技术难点。讨论了投影系统预畸变的模型, 分析了光学系统的畸变特性, 提出了一种预畸变图形显示位置可调整的几何畸变校正方法, 以及相应的可实时实现双三次插值算法的硬件架构。该方法的优点是工程应用可行性高, 畸变校正的结果更精确且显示图像完整。

**关键词:** 畸变校正; 图像处理; 几何畸变; 扭曲补偿; 二维拟合; 多项式近似法

**中图分类号:** V271.4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-637X(2015)08-0076-04

## A Method for Real-Time Image Pre-distortion with Adjustable Positions

ZHENG Yong-rui<sup>1,2</sup>, LIN Qiu-hua<sup>2</sup>, WANG Quan-zhong<sup>1</sup>, WU Jing<sup>1</sup>

(1. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China;

2. School of Information and Communication Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** The images generated by large field-of-view (FOV) optical equipment usually have geometric distortion. It is difficult to make geometric distortion correction in real time for images with high resolution and serious distortion. Based on the model of project system with pre-distortion and the distortion features of large FOV optical system, we proposed a pre-distortion method with the position of the pre-distorted image being adjustable. The corresponding hardware architecture is also proposed for realizing bicubic interpolation calculation. The experiment results show that the proposed method is easy for engineering application and is accurate in distortion correction.

**Key words:** distortion correction; image processing; geometric distortion; warping compensation; 2D-fitting; polynomial approximation

### 0 引言

为了消除光学系统固有的畸变, 国内外学者提出了多种畸变校正<sup>[1-2]</sup>或者扭曲补偿的方法以及相应硬件<sup>[3-4]</sup>, 这些一阶的方法针对广角等小视场光学系统是有效的。然而对于大视场光学系统的畸变校正有2个难题: 1) 畸变情况较复杂, 特别是对于非同轴光学系统; 2) 高分辨率的畸变校正要求高带宽的数据处理。根据应用的不同, 光学系统分为成像光学系统和投影光学系统。通常把空间坐标变换分为从畸变图像到理想图像的前向映射, 与从理想图像或原始图像到

畸变图像的后向映射或逆向映射。逆向映射是将一幅正常的原始图像变换为光学投影系统所需的预畸变图像, 以抵消光学系统所造成的图像畸变, 经过投影后呈现给观察者无畸变的图像。本文论述畸变校正的一般原理和方法, 并在对投影光学系统畸变特性进行分析的基础上, 给出一种实用的畸变图像位置可调整的逆向映射索引表的建立方法。该方法优点在于图像信息不丢失, 使预畸变系统具有一定的安装公差调整能力, 提高系统的精度; 其次, 基于文献[5]的硬件实现设计了相应的改进硬件架构, 并就该架构实现的16个点的双三次立方插值算法给出了仿真结果。

### 1 投影系统校正模型

投影系统校正模型如图1所示, 假设定义光学投影

系统的左边为物空间或者称为目标空间,右边为像空间。如果在物空间放置感光底片,在像空间放置原始图像  $A(x,y)$ ,由于通过光学系统光线具有可逆性,物空间的底片经过足够曝光时间后要呈现一个形状似  $B(u,v)$  的畸变图形。同理,在物空间有一个形状似  $B(u,v)$  的预畸变图形  $B'(u,v)$ ,在像空间即可呈现理想的图像  $A(x,y)$  的近似图像  $A'(x,y)$ ,即光学系统的物空间和像空间存在某种函数关系  $A=f(B)$ ,该函数关系反映的是光学系统的畸变特性。为了实现预畸变需要在光学系统的物空间设计电子校正系统实现一个函数转化  $B=g(A)=f^{-1}(A)$ ,即完成输入为正常图像  $A$ 、输出为预畸变图像  $B$  的逆向映射,本文即可在像空间显示理想图像  $A$  的近似图像。

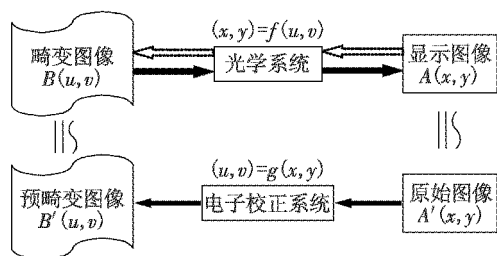


图 1 投影系统畸变校正模型

Fig. 1 Distortion correction model of project system

在投影系统的物空间为数字液晶像源,像源显示图像  $B'$  相当于对畸变图像  $B$  的数字重采样。综上所述,畸变校正就是根据光学系统物空间和像空间的函数映射关系,建立预畸变图像  $B'$  位置信息到理想图像空间的位置的映射索引,然后完成灰度插值。

## 2 电子校正系统的设计考虑

### 2.1 光学系统畸变特点

在大视场光学显示设备中,由于设计方法、装配工艺等因素影响,造成了最终显示的图像会产生不同程度的非线性几何畸变,其经典表现为图像中画面扭曲、扩张、挤压。目前存在的几何畸变有旋转对称光学系统畸变和非旋转对称光学系统畸变,如图 2 所示。

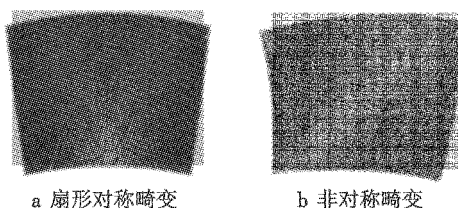


图 2 大视场光学系统畸变图

Fig. 2 Distortion of large FOV optical system

对于分辨率为  $1024 \times 768$  的理想图像的预畸变图像平面空间尺寸是不能满足 4:3 的比例的。这就意味着用  $1024 \times 768$  的像源显示  $1024 \times 768$  的理想图像的

预畸变图像将发生图像数据的丢失,且由于装配公差的存在使像源安装精度有限,显示图像在像源上的位置也不可电子调整从而导致显示图像品质下降。

### 2.2 预畸变电子校正系统设计

基于文献[5],本文提出一种具有调整能力的能完成双三次立方图像插值算法的预畸变校正方法。根据光学系统畸变的特点,畸变图形的水平和垂直方向的跨度可能要大于理想图像。为了完整地显示原始图像而不丢失图像信息,电子校正系统中采用分辨率为  $1280 \times 1024$  像源显示分辨率为  $1024 \times 768$  的投影图像。

以图 2a 的畸变特性为例,预畸变校正系统逐像素生成预畸变图形时首先读取理想图像的中间部分,然后才会读取理想图像两边的部分,即对输入理想图像的读访问是非线性的。为了同时读取 16 个像素值完成双三次立方插值算法,本文采用 8 片 QDR2 芯片作为图像缓冲支持非线性,同时读取图像的 16 个像素值,如图 3 所示。

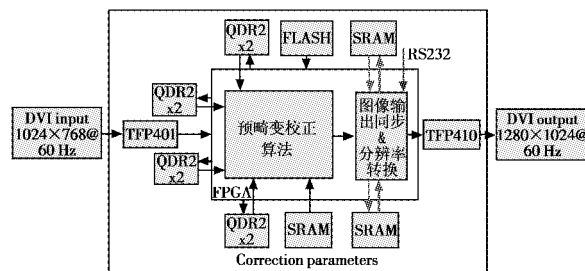


图 3 预畸变系统框图

Fig. 3 Block diagram of pre-distortion image processing

本文对预畸变图像采用多边形扫描算法采样建立位置映射索引表后,物空间的预畸变图像位置将是精确并固定的。由于在工程实践中存在结构设计、装配等多种容差,图像传感器的安装位置存在误差,投影图像校正的效果将不理想。因此可以通过 RS232 接口接受调整的参数,适当地调整预畸变图像在像源上的位置,保证由于像源安装位置精度不足而导致的预畸变图像和逆向映射索引表的不匹配情况。

由于输入图像和输出图像的分辨率不同,本文利用一个同步模块“乒乓”访问外部 SRAM 存储器实现预畸变图形偏移操作和解决跨时钟域的问题。

## 3 预畸变方法

### 3.1 多边形扫描转换算法

图 4a 为目标图像空间,即放置像源的物空间;图 4b 为理想原始图像空间,即像空间。像源  $A$  的分辨率为  $1280 \times 1024$ ,其在像空间的成像包络为  $A'$ 。为了完整显示一幅数字图像,该图像必须被包含在  $A'$  的包络内部。假设  $1024 \times 768$  理想原始图像  $B'$  的四边形

$C_1C_2C_3C_4$  位于轮廓  $A'$  内部,如图 4b 所示,其在目标图像空间映射图形为  $B$ ,即畸变的四边形  $T_1T_2T_3T_4$ ,同理四边形  $T_1T_2T_3T_4$  也在像源的有效显示范围之内,而且有适当的调整裕量。这样设计的优点在于尽管牺牲了像源的部分有效显示面积,但是完整显示了理想图像且不丢失图像信息。

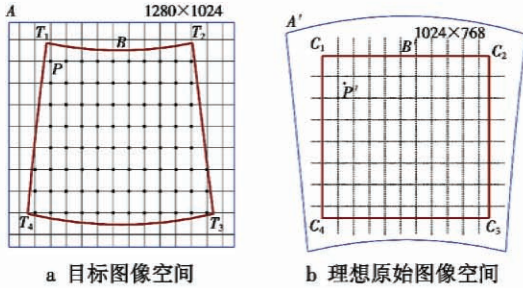


图4 预畸变图像与原始理想图像映射关系

Fig.4 Mapping relation between distortion image and the original image

为了将矩形的理想原始图像  $B'$  预畸变为顶点为  $T_1T_2T_3T_4$  的四边形,用多边形扫描算法对四边形  $T_1T_2T_3T_4$  进行填充<sup>[6-7]</sup>。在对四边形  $T_1T_2T_3T_4$  进行填充时扫描线从左到右,自上而下地生成。在生成每一条扫描线时,对于其上的每一个像素,建立一个从目标图像空间到原始理想图像空间的位置映射函数,即

$$P' = f(P) \quad (1)$$

式中: $P = (x, y)$  是目标四边形的扫描线上的像素坐标; $P' = (x', y')$  是  $P$  在理想原始图像上所对应的坐标。根据式(1)建立的映射关系可以对目标四边形  $T_1T_2T_3T_4$  进行扫描线转换。找到扫描线上的每个像素点在理想原始图像空间对应的空间位置坐标,并将该位置周围几个点插值所得的灰度值复制到目标图像空间的像素上,这样就实现了原始理想矩形图像的预畸变。

### 3.2 映射方法

本文采用逆向映射技术,对目标图像空间进行扫描线转换时需建立目标图像空间到原始图像空间的位置映射关系。该阶段通常分为两步:第一步通过对光学系统进行光线跟踪或者靶板成像实验建立物空间和像空间的映射关系;第二步通过线性的方法或者非线性的方法完成位置坐标映射。

本文采用非线性的高阶多项式拟合的二维拟合的方法。对于大视场光学显示设备,显示图像(原始图像)与畸变图像(校正图像)之间是非线性的变换关系,通常用坐标间的多项式变换来表示,原始图像中任一点坐标  $(x, y)$  与目标图像中对应点坐标  $(u', v')$  的变换关系可表示为<sup>[8-9]</sup>

$$\begin{cases} u' = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^{N-i} a_{ij} x^i y^j \\ v' = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^{N-i} b_{ij} x^i y^j \end{cases} \quad (2)$$

式中: $N$  为多项式的次数; $a_{ij}$  和  $b_{ij}$  为待定多项式的系数,可利用已知的控制点对来求解。

如果控制点数目与方程组中未知数的数目是相同的,则可以直接求解方程组。为了获得较高的精度,控制点的数目总是多于方程组中未知数的数目,这样方程组可能是病态的。对于  $L$  个控制点,采用最小二乘法来解决这个问题,即多项式拟合后的误差平方和达到最小<sup>[6-7]</sup>

$$\varepsilon_x = \sum_{i=1}^L \left( u'_i - \sum_{j=0}^N \sum_{k=0}^{N-j} a_{jk} x_i^j y_i^k \right)^2 \quad (3)$$

$$\varepsilon_y = \sum_{i=1}^L \left( v'_i - \sum_{j=0}^N \sum_{k=0}^{N-j} b_{jk} x_i^j y_i^k \right)^2 \quad (4)$$

校正精度与多项式次数有关,多项式次数太低,拟合粗糙误差大;次数太高,计算量急剧增大,数据噪声也被纳入模型。最小二乘法可以在拟合多项式次数不是很高的前提下给出一个最优的近似解。

在得到目标空间和像空间的非线性关系后,本文切割出一个包含预畸变图形的矩形。该矩形小于输出分辨率,大于预畸变图形。对于矩形范围内预畸变图形包络内的点,根据目标空间和像空间的非线性关系以及多边形扫描算法计算得到灰度校正的参数,包络外的点赋予统一的默认值。

### 3.3 灰度校正方法

灰度校正也叫图像重采样,它是利用若干邻近的像素灰度值来估计未知像素点的灰度值,一般是邻近像素灰度值的某种加权平均。因此灰度校正就是原图像与插值核的卷积运算,也是一种滤波操作。如图5所示,假设经过几何校正后图像上的像素点  $B$  与畸变图像上像素点  $A$  对应,由于点  $A$  不是整像素点,它的灰度值与其周围像素点的灰度值有关。在最近邻插值(Nearest)算法中取点  $A$  最近的像素点  $p_6$  的灰度值作为  $B$  点的灰度值。而双线性插值(Bilinear)算法取  $A$  点周围的4个像素点  $(p_6, p_7, p_{10}, p_{11})$ ,双三次插值(Bicubic)算法<sup>[9-10]</sup>则需要取  $A$  点邻近16个像素点,即  $(p_1 \sim p_{16})$  的灰度值来估计  $B$  点的灰度值。这些算法都是对整幅图像的不同部分做相同处理,均是通过计算该点附近某些像素集合的加权平均来确定校正点的灰度值,其区别在于不同算法对校正点周围像素集合取法不同以及插值的核函数不同,因此灰度校正核函数选择与硬件设计的复杂度密切相关。

最近邻插值算法的核函数为门函数,双线性插值算法的核函数为三角函数,双三次插值的核函数为三

次函数,这些函数都是偶函数,且这些插值算法在坐标系中 X 轴方向和 Y 轴方向具有一致性。因此本文可以将插值系数离散化,固化于 FPGA 中并通过查表方法读取。这样有效地避免了双三次插值的每个插值点需要参数太多造成的查找表过度庞大的缺点。

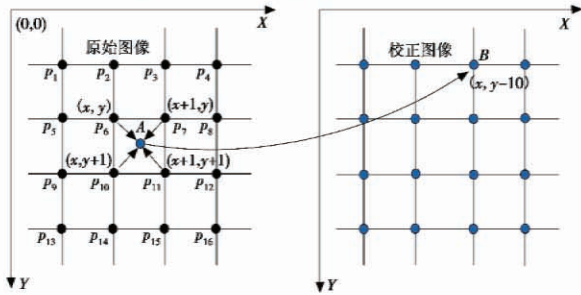


图 5 灰度校正示意图

Fig.5 Scheme of gray grade correction

### 4 仿真结果

实验采用 Matlab R2012 软件进行仿真。几何预畸变的输入分别为一幅正常的 1024 × 768 像素的无色数字图像和一幅彩色图像,如图 6a、图 6c 所示。试验中采用 16 个点的双三次插值算法,对于最大畸变率为 23% 的光学系统,预畸变后输出 1280 × 1024 像素的图像如图 6b、图 6d 所示。图 7 中给出了最大畸变率为 16% 的光学系统中预畸变图像显示位置调整的实验结果。图 7b 和图 7e 为畸变图形位于显示画面的中心位置,图 7a、图 7d 和图 7c、图 7f 相对中心位置分别向左上和右下平移 80 个像素。如图 7 所示,光学系统中心位置畸变率较小,越靠近光学系统边缘畸变越大。由仿真结果可见,该算法对不同畸变特性的光学系统均适应,且在 1280 × 1024 分辨率的预畸变图像中原始输入图像清晰、无内容缺失,并完成适量的预畸变图形位置调整。

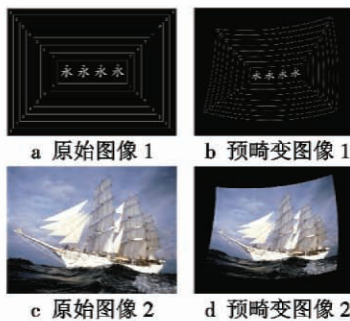
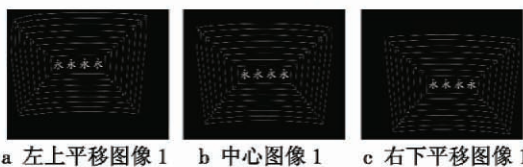


图 6 原始图像与预畸变图像

Fig.6 Original images and pre-distortion images



a 左上平移图像 1 b 中心图像 1 c 右下平移图像 1



d 左上平移图像 2 e 中心图像 2 f 右下平移图像 2

图 7 畸变图像的显示位置调整

Fig.7 Location adjusting of distortion images

### 5 结语

为了不丢失原始图像的边缘信息并使其具备一定的图像抗锯齿能力,同时让预畸变系统具有在安装公差内的调整能力,本文给出了可行的预畸变图像调整位置方法和改进的硬件架构设计,并就该架构实现的 16 个点的双三次插值算法给出了仿真结果。实验结果表明,本文方法可有效实现预畸变图像的位置调整,且 16 个点的双三次插值算法的效果可接受。下一步的工作将验证改进的硬件架构实效性。

### 参考文献

- [1] 刘航,郁道银,杜吉,等. 广角成像系统光学畸变的数字校正方法[J]. 光学学报,1998,18(8):1108-1112. (LIU H, YU D Y, DU J, et al. Distortion correction of the wide-angle optical system with digital technology[J]. Acta Optica Sinica, 1998, 18(8):1108-1112.)
- [2] 陈东青,谢洪波,徐智,等. 医用电子内窥镜图像畸变校正方法研究[J]. 中国生物医学工程学报,2001,20(1):89-94. (CHEN D Q, XIE H B, XU Z, et al. Study on correction of distortion in medical electronic endoscope image[J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2001, 20(1):89-94.)
- [3] 张树华,陈晓东,刘琳波,等. 基于 FPGA 的双线性内插方法实现 MEE 的畸变实时校正[J]. 传感技术学报,2004,17(4):594-599. (ZHANG S H, CHEN X D, LIU L B, et al. FPGA-based MEE distortion correction real-time system design using bilinear interpolation[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2004, 17(4):594-599.)
- [4] ZHENG H, LI J. Real-time correction of distortion image based on FPGA[C]//2010 International Conference on Intelligent Computing and Integrated System, 2010:167-170.
- [5] 郑永瑞,李洁,刘晓宏,等. 基于 FPGA 的视频图像实时几何畸变校正[J]. 电光与控制,2013,20(6):75-78. (ZHENG Y R, LI J, LIU X H, et al. FPGA based real-time geometric distortion correction for video images[J]. Electronics Optics & Control, 2013, 20(6):75-78.)

(下转第 114 页)

- signal processing algorithms for pulse' & inter-pulse binary phase coded radar altimeter [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2004. )
- [3] 田黎育, 高梅国. 一种二相码信号多普勒补偿方法的研究与实现[J]. 北京理工大学学报, 2002, 22(6): 757-760. (TIAN L Y, GAO M G. A Doppler compensation method for bi-phase coded signals [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2002, 22(6): 757-760. )
- [4] 田孝斌. 二相编码信号的多普勒特性及其补偿算法研究[J]. 电子科技, 2013, 26(9): 31-33. (TIAN X B. Research on Doppler characteristics and a compensation method for bi-phase coded signal [J]. Electronic Science and Technology, 2013, 26(9): 31-33. )
- [5] 张海, 陈惠连, 彭定之, 等. 天线主瓣照射圆内的多普勒分布[J]. 系统工程与电子技术, 2001, 16(1): 113-116. (ZHANG H, CHEN H L, PENG D Z, et al. Doppler spectrum from the ground circle radiated by antenna main-lobe [J]. Systems Engineering and Electronics, 2001, 16(1): 113-116. )
- [6] 王兆华, 黄翔东, 杨尉. 全相位 FFT 相位测量法[J]. 世界科技研究与发展, 2007, 29(4): 28-32. (WANG Z H, HUANG X D, YANG W. The measuring phase method of all-phase FFT [J]. World Sci-tech R & D, 2007, 29(4): 28-32. )
- [7] 王兆华, 黄翔东. 基于全相位谱分析的相位测量原理及应用[J]. 数据采集与处理, 2009, 24(6): 777-782. (WANG Z H, HUANG X D. Principle of phase measurement and its application based on all-phase spectral analysis [J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2009, 24(6): 777-782. )
- [8] 黄翔东, 王兆华. 全相位时移相位差频谱校正法[J]. 天津大学学报, 2008, 41(7): 815-820. (HUANG X D, WANG Z H. All-phase time-shift phase difference correcting spectrum method [J]. Journal of Tianjin University, 2008, 41(7): 815-820. )
- [9] 黄翔东, 王兆华. 全相位 DFT 抑制谱泄漏原理及其在频谱校正中的应用[J]. 天津大学学报, 2007, 40(7): 882-885. (HUANG X D, WANG Z H. Principle of all-phase DFT restraining spectral leakage and application in correcting spectrum [J]. Journal of Tianjin University, 2007, 40(7): 882-885. )
- [10] 黄翔东, 王兆华. 基于全相位频谱分析的相位差校正法[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(2): 293-297. (HUANG X D, WANG Z H. Phase difference correcting spectrum method based on all-phase spectrum analysis [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(2): 293-297. )

(上接第 79 页)

- [6] 王健, 陈文艺, 王波, 等. 投影图像畸变的一种校正方法[J]. 西安邮电学院学报, 2011, 16(1): 65-69. (WANG J, CHEN W Y, WANG B, et al. A method of correcting to distorted projection [J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2011, 16(1): 65-69. )
- [7] 周秉锋. 一种基于线性变换的数字图像自由拉伸算法[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 1997, 33(6): 93-98. (ZHOU B F. A free-form digital image stretching algorithm based on linear transformations [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 1997, 33(6): 93-98. )
- [8] 马广彬, 章文毅, 陈甫. 图像几何畸变精校正研究[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(9): 45-48. (MA G B, ZHANG W Y, CHEN F. Study on image accurate geometric correction [J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(9): 45-48. )
- [9] GONZALEZ R C, WOODS R E. Digital image process [M]. New Jersey: Prentice Hall, 2007.
- [10] FOLEY J D, DAM A V, FEINER S K, et al. Computer graphics: principles and practice [M]. 2nd ed. New York: Addison-Wesley Publishing Company Inc, 1993.

(上接第 92 页)

- S. Survey of fibre channel [J]. Application Research of Computers, 2006(2): 9-13. )
- [4] 刘鑫, 陆文娟. 光纤通道在航空电子环境的应用及关键技术研究[J]. 光通信技术, 2006(6): 55-58. (LIU X, LU W J. Application and research of fiber channel in the avionics environment [J]. Optical Communication Technology, 2006(6): 55-58. )
- [5] 朱志强. ARINC818 协议特性分析[J]. 电子技术, 2013(6): 30-32. (ZHU Z Q. Analysis of characteristics of ARINC 818 protocol [J]. Electronic Technology, 2013(6): 30-32. )
- [6] Airlines Electmnic Engineering Committee. Draft 1 of supplement 1 to ARINC specification 818: avionics digital video bus [DB/OL]. [2007-05-10]. <http://www.arinc818.com/specification.html>.
- [7] 王红春. 基于 FC 的航电数字视频传输技术研究[J]. 计算机技术与发展, 2010, 20(5): 250-253. (WANG H C. Research on digital video transfer technique of fibre channel in avionics environment [J]. Computer Technology and Development, 2010, 20(5): 250-253. )
- [8] 李玉伟, 潘明海. 8B/10B 编码对高速传输的影响分析[J]. 通信技术, 2011(3): 41-43. (LI Y W, PAN M H. Analysis on 8B/10B code in high-speed transmission [J]. Communications Technologies, 2011(3): 41-43. )