

基于 FPGA 的 1080P 低质视频实时增强系统

魏 苗¹, 刘 峰¹, 干宗良¹, 麦媛玲²

(1. 南京邮电大学 图像处理与图像通信江苏省重点实验室, 江苏 南京 210003;
2. 视频图像智能分析与应用公安部重点实验室, 广东 广州 510000)

摘 要:传统的图像增强算法对暗光、背光等低质图像的亮光区域有过度增强的不足,且算法复杂度较高,难以应用于嵌入式小型系统中。为此,设计并构建了一种基于 Xilinx XC7A200T FPGA 的 1080P 低质视频实时增强系统,在研究 IMSR (Integrated Multi-Scale Retinex) 算法及传统算法的过度增强等问题的解决途径基础上,提出了结合颜色估计方法的改进 IMSR 增强算法。该算法采用 Xilinx XC7A200T FPGA 来构建低质视频实时增强系统的处理框架,并优化改进了 IMSR 算法各个模块在 Vivado HLS (Vivado High Level Synthesis) 上的实现过程。为验证所建系统的有效性和可行性,搭建了实验环境并进行了应用测试。验证实验结果表明,所构建的增强系统实现了预期的 1080P 低质视频实时增强功能,基本解决了传统 Retinex 算法对 1080P 低质视频增强中的过度增强及“雾化”偏色问题,具有增强程度自适应调整功能,占用资源较少,增强效果良好。

关键词:1080P; 实时; IMSR 算法; 视频增强; FPGA

中图分类号: TP302

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2017)07-0126-05

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2017.07.029

1080P Low Quality Real-time Video Enhancement System with FPGA

WEI Miao¹, LIU Feng¹, GAN Zong-liang¹, MAI Yuan-ling²

(1. Key Lab on Image Processing & Image Communications of Jiangsu Province, Nanjing
University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;
2. Key Laboratory on Video Image Intelligent Analysis and Application of Ministry of
Public Security, Guangzhou 510000, China)

Abstract: Conventional image enhancement algorithms have an over-enhancement effect on low-light areas of low-light images such as dark light and backlight, which have high complexity and difficulties in applying in small embedded system. A 1080P low quality real-time video enhancement system with Xilinx XC7A200T FPGA has been designed and implemented, where the Integrated Multi-Scale Retinex (IMSR) and improved IMSR combined with color estimation model are contributed. Video processing architecture of the low quality real-time video enhancement system with Xilinx XC7A200T FPGA and the modules for improved enhancement algorithm have both been established in high level. The experiment system has been constructed to test and verify the effectiveness and feasibility of the established enhancement system. The experimental results show that the established system has solved the problems of excessive enhancement and color cast in traditional Retinex algorithm and enhanced degree of adaptive adjustment function, which takes up less resources and has good real-time performance and enhancement effect for 1080P low quality video.

Key words: 1080P; real-time; IMSR; video enhancement; FPGA

0 引言

暗光、背光图像质量提升技术是图像质量提升技术领域的研究热点之一,在城市交通、视频监控、智能

驾驶等领域具有的广阔的发展前景。随着视频的高清化趋势,对于视频增强系统提出了更高的实时要求。Fu H 等实现了基于 CEM (Color Estimation Model) 算

收稿日期: 2016-08-15

修回日期: 2016-11-24

网络出版时间: 2017-06-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61471201); 江苏省高校重大基础研究项目 (13KJA510004); 江苏省六大人才高峰资助计划 (RLD201402); 南京邮电大学“1311”人才资助计划; 广州市软件和信息服务业专项资金所属重点专项 (2060404)

作者简介: 魏 苗 (1991-), 男, 硕士生, 研究方向为图像处理与多媒体通信; 刘 峰, 博士, 教授, 博士生导师, 通讯作者, 研究方向为图像处理与多媒体通信、高速 DSP 与嵌入式系统; 干宗良, 副教授, 研究方向为视频编码、视频处理、视频分析。

网络出版地址: <http://cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20170605.1508.058.html>

法的夜间图像增强技术^[1], Kyung W J 等提出了基于 IMSR 算法的暗光车载视频增强技术^[2],但都没有考虑算法对于亮光区域过度增强的问题。杨军等在 GPU 上实现了多尺度 Retinex 图像增强算法^[3],但难以在小型嵌入式系统上应用。文献[4]实现了基于 FPGA 的红外图像自适应分段线性增强算法,实现简单,对复杂场景的增强效果不好。王静轩等采用基于 DSP 与 FPGA 的视频增强设计方法^[5],但不太适用于低成本设备。文献[6]完成了 FPGA 实时图像增强系统的设计与实现,能够对 720 * 576 分辨率 PAL 制式进行图像增强,暂不支持 1080P 视频增强。朱婧雅等提出了基于相似场景的低照度监控图像增强^[7],需要进行多次迭代,计算量大,无法达到实时增强。文献[8]实现了基于 FPGA 的高清实时视频去雾系统的设计与实现,系统工作频率较低,暂不支持 1080P 视频增强。

为此,文中提出了一种基于改进 IMSR 算法的 FPGA 实时视频处理系统,实现了 1080P @ 30 Hz 实时视频增强,并具有增强程度自适应调整、增强程度开关功能,且开发成本较低。

1 低质视频的图像质量提升算法

1.1 IMSR 算法

暗光图像和背光图像是最常见的低质视频图像。暗光图像由于照射光强度弱,物体反射后进入图像传感器的光线不足,造成图像亮度偏暗、对比度偏低、细节大量不可见。背光图像则是在强光源照射下的高亮度区域及阴影、逆光等相对低亮度区域在场景中同时存在时形成的,传感器输出图像会出现明亮区域因曝光过度成为白色,而黑暗区域因曝光不足成为黑色的情况,严重影响图像质量。

在暗光和背光等低质视频图像的质量提升算法中,Retinex 是最常用的方法之一。但大部分基于 Retinex 的方法都是在对数域中处理的,而在对数域中处理暗光区域时,会增大噪声以及处理图像输出范围扩展的不确定性。而 IMSR 算法是在线性空间中处理的,可以避免以上问题。

IMSR 算法定义为:

$$SR_{sum}(x,y) = A \times \frac{I_i(x,y)}{S_{sum}(x,y)} \tag{1}$$

其中, $I_i(x,y)$ 为输入图像的 RGB 表示, i 表示 RGB 三个通道; $S_{sum}(x,y)$ 为集成环绕图像; $SR_{sum}(x,y)$ 为 Retinex 算法计算得到的输出图像。

$S_{sum}(x,y)$ 由不同环绕图像 $S_m(x,y,\delta_m)$ 加权集成得到,如下:

$$S_{sum}(x,y) = \sum_{m=1}^M \omega(\delta_m) \times S_m(x,y,\delta_m) \tag{2}$$

$S_m(x,y,\delta_m)$ 由照度通道 Y 与高斯滤波卷积得到,如下:

$$S_m(x,y,\delta_m) = G_m(x,y) * Y(x,y) \tag{3}$$

$$\sum_{m=1}^M \omega(\delta_m) = 1 \tag{4}$$

最佳条件的增益系数 A 及权重 ω 是由基于人类视觉系统的“Trial and Error”方法^[9]获得的。IMSR 算法对于低质视频图像增强效果显著,图像对比度恢复较好,但对于复杂光照情况下的图像处理结果并不能让人满意,增强后图像黑暗区域质量有所提升,而明亮区域过度增强,降质严重,细节大量损失。

1.2 改进的 IMSR 算法

在 IMSR 算法基础上融合颜色估计方法进一步提升图像质量,并使用单尺度环绕图像及环绕图像全局均值的加权和计算出的多尺度照度集成环绕图像来近似实现照度图像,最终通过 Retinex 算法得到提升后图像。算法流程如图 1 所示。

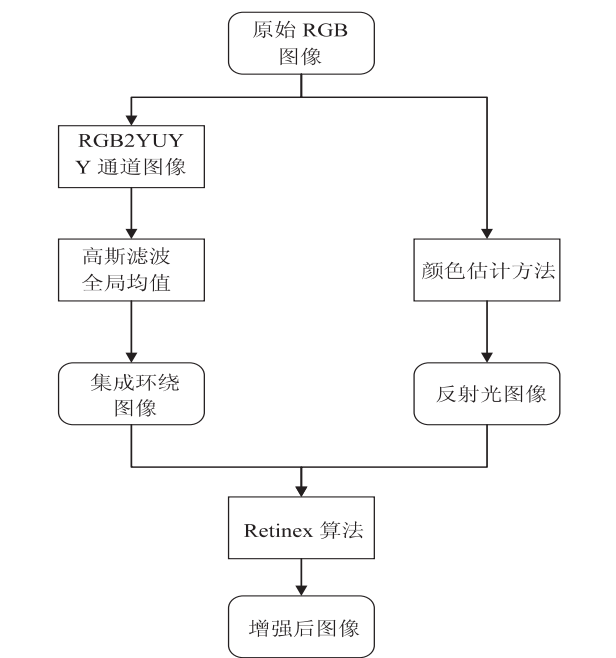


图 1 改进的 IMSR 算法流程

首先,将得到的原始低质图像通过颜色估计方法进行增强^[10],利用颜色估计方法既能增强黑暗区域又能尽可能保护明亮区域不被过分增强的特性,提升原始低质图像黑暗区域的对比度和可见度,适度增强明亮区域,提升后的图像作为原始 Retinex 算法的反射光图像。

该颜色估计方法的定义如式(5)~(7):

$$\alpha_{R(x,y)} = R(x,y)^{\lambda R(x,y)+\lambda} \tag{5}$$

$$\beta_{G(x,y)} = G(x,y)^{\lambda G(x,y)+\lambda} \tag{6}$$

$$\theta_{B(x,y)} = B(x,y)^{\lambda B(x,y)+\lambda} \tag{7}$$

其中, $R(x,y)$, $G(x,y)$, $B(x,y)$ 表示原始图像

的 RGB 通道分量; $\alpha_{R(x,y)}$, $\beta_{G(x,y)}$, $\theta_{B(x,y)}$ 表示增强图像的 RGB 通道分量;参数 λ 用来控制增强程度。

使用颜色估计方法处理后的图像黑暗区域的对比度和可见度都有所改善,明亮区域增强适度。但图像整体存在一定的“雾化”现象,这是由于该方法在中值区域增强效果较为平缓,使此部分对比度下降,降低了此部分的细节可见性。

集成环绕图像可以看作是 Retinex 算法对空间中的照度图像的计算。原始 IMSR 算法中,照度通道 Y 与带有不同标准偏差的高斯滤波卷积形成环绕图像,并对环绕图像进行加权和得到多尺度照度环绕图像。为了使改进 IMSR 算法在 FPGA 上快速实现,在增强的效果和系统性能上做了一些折中。采用一个 3×3 的高斯模糊滤波器得到环绕图像,并通过该环绕图像及环绕图像全局均值的加权和近似实现集成环绕图像 $S_{sum}(x,y)$,如式(8)所示:

$$S_{sum}(x,y) = \omega_1 \times S_m(x,y) + \omega_2 \times GM \tag{8}$$

$$GM = \frac{\sum_{x=0}^N \sum_{y=0}^M S_m(x,y)}{N \times M} \tag{9}$$

其中, $S_m(x,y)$ 为高斯模糊滤波后的环绕图像; GM 为环绕图像全局均值; N 、 M 为图像的尺寸参数; ω_1 、 ω_2 为调节参数。

最后利用式(1)得到提升后图像。在此过程中,

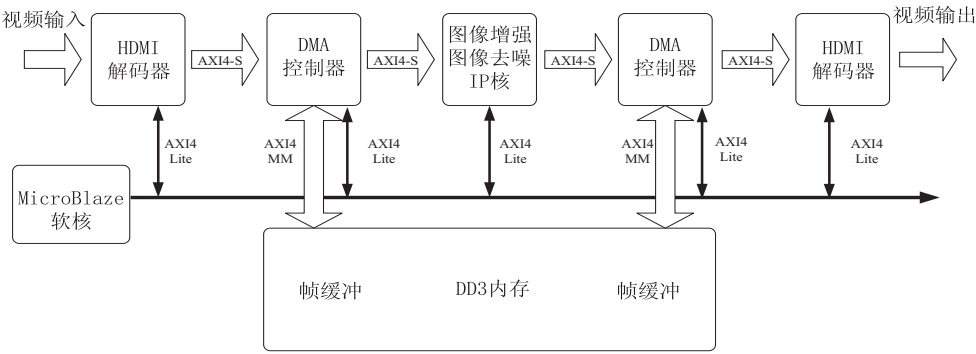


图 2 视频处理框架

2.2 算法的 FPGA 实现

改进 IMSR 算法的逻辑实现如图 3 所示。实现过程分成三个模块:反射图像计算模块 A、集成环绕图像计算模块 B 和增强图像生成模块 C。为了提高图像处理速度及满足 vivado_hls^[14] 全局处理的要求,采用图像处理的流水线操作,同时为进行各个模块之间的数据缓冲,配合使用 FIFO,有利于实现高带宽、低时延的 IP 核。下面介绍各个模块的实现过程。

(1)反射图像计算模块。

用颜色估计方法处理原始图像,得到 Retinex 算法计算的反射光图像 $I_i(x,y)$ 。为了能在 FPGA 上快速处理,减小计算量,采用快速查找颜色估计方法的查找

将形成的集成环绕图像应用到每一个颜色通道中来保持颜色的平衡,克服颜色估计方法出现的“雾化”现象。

2 改进 IMSR 算法的 FPGA 实现

2.1 FPGA 平台上的视频处理框架

视频增强系统以 Xilinx 的最新一代 7 系列 XC7A200T FPGA^[11]为核心,内部集成了 33 650 个逻辑单元,每个单元有 4 个 6-input LUT 和 8 个触发器,13 Mbits RAM,740 个 DSP Slice,内部时钟速度超过 450 MHz,集成了内存控制器硬核。整个系统的输入输出是基于 HDMI 接口,采用 TI 的 TMDS141 和 AD8195 作为驱动器,兼容 HDMI 1.3a 标准,最高可支持 1080P 分辨率。

增强系统的视频处理框架如图 2 所示。首先整个处理框架使用的是 AXI4 Stream 协议,它无需传输地址,并且具有无限长突发传输等特点,适宜于宽带信号互联。因此整个视频处理框架是基于 ARM AMBA AXI4^[12]协议,使得整个框架具有高带宽、低时延、扩展性好等特点,满足视频处理的实时性以及高分辨率要求。最后在 FPGA 内部还综合了一个 MicroBlaze^[13]软核,提供额外运算能力来辅助图像增强 IP 核工作并通过 AXI4-Lite 协议配置 IP 核的寄存器。

表,对原始图像中各个通道的每个像素应用颜色估计方法,并且针对不同的参数值 λ ,建立不同的查找表。为方便加快后续模块的计算速度,在查找表中存储的都是定点数,以代替浮点数。系统将增强程度的调节留给了 MicroBlaze 软核,由软核负责根据增强程度更新参数 λ 。 λ 通过 AXI4-Lite 映射到 MicroBlaze 地址空间。

(2)集成环绕图像计算模块。

集成环绕图像可以看作是通过计算图像中像素点与周围区域的相似度再加权平均来估计图像照度的变化,并将计算结果传输到增强图像生成模块,得到增强图像。

为此,借助于 Artix 7 的 DSP Slice 实现了流水线乘法运算,将图像从 RGB 空间转换 YUV 空间,得到照度通道分量 Y 。为了在 FPGA 上快速实现改进算法,通过一个 3×3 的高斯模糊滤波器与照度通道分量 Y 卷积得到环绕图像。环绕图像的实现借助于 vivado_hls 工具中的 Filter_2D 函数,环绕图像的全局均值借助 Artix 7 的 DSP Slice 实现的高速除法器及流水线加运算得到。并利用 Artix 7 的 DSP Slice 实现了流水线乘

加运算计算环绕图像及环绕图像全局均值的加权和。

(3) 增强图像生成模块。

增强图像生成模块是利用得到的集成环绕图像以及经颜色估计方法处理后的图像由 Retinex 算法计算出增强图像。借助于 Artix 7 的 DSP Slice 实现的高速除法器,能够实现 Retinex 算法中的除法运算。同时为了实现除法器的流水化,需要进行逻辑上的优化。通过 MicroBlaze 软核配置更新增益参数 A 。

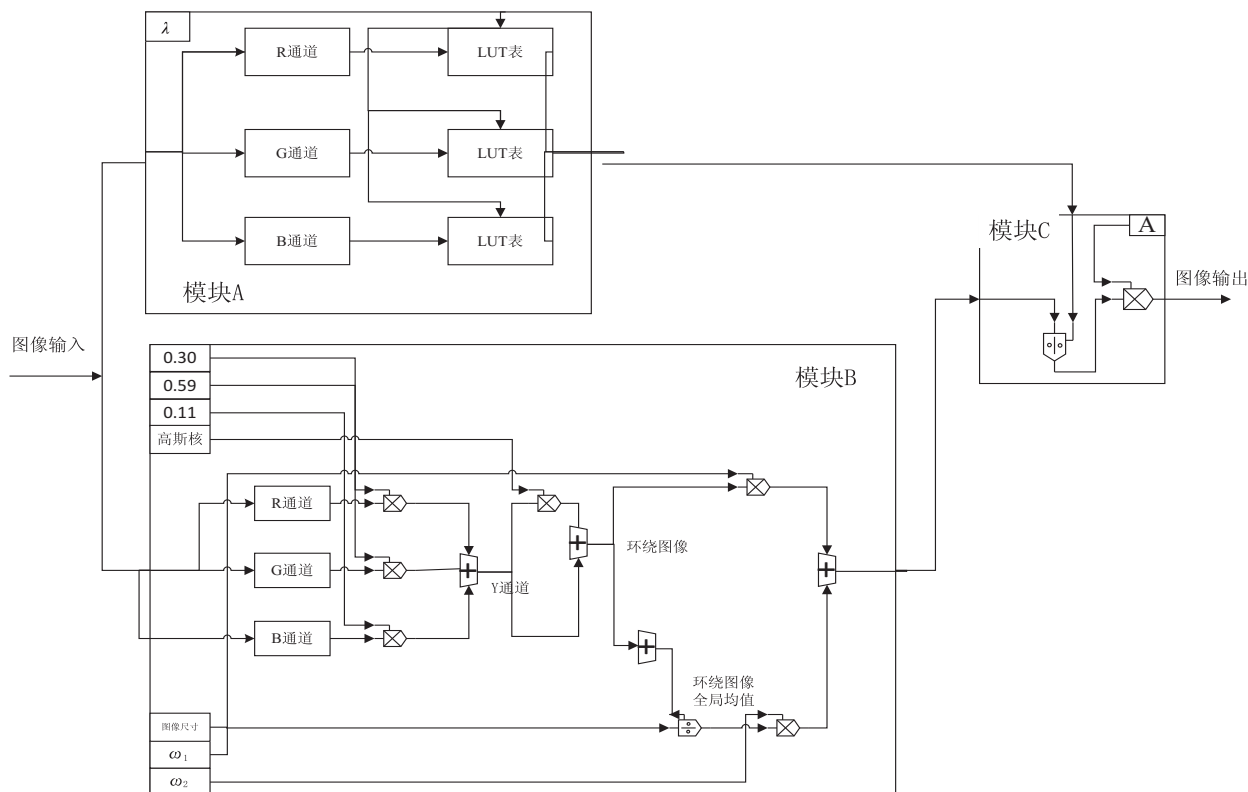


图3 改进 IMSR 算法的逻辑框图

2.3 增强程度自适应调节功能

系统采用的是 MicroBlaze 嵌入式软核,为 32 位 MPU,工作频率为 100 MHz,进行 IP 核工作方式、寄存器及驱动的配置,还能调节增强 IP 的参数实现增强程度的改变及增强开关。

(1) 增强图像增强程度调节。

视频帧之间的亮度可能有较大差异,如果不考虑这种情况,对于每帧都采用相同的增强程度,增强后视频帧之间的亮度差较大,视频发生闪烁,影响用户的实际体验。所构建系统考虑每隔 10 帧计算一次增强后图像的平均亮度,如果两次增强的亮度差大于设定的阈值,则动态调节参数 λ 、 ω_1 和 ω_2 ,反之亦然。

暗光或者背光图像对于亮度较为敏感,如果对于不同亮度的图像采用相同的增强程度,则会使得图像过亮或过暗,所以系统利用 MicroBlaze 求取暗光或者背光图像以及增强后图像的平均亮度,估计出增强前后图片的亮度数据差,并自动调节参数 λ 、 ω_1 和 ω_2 ,

从而对不同亮度的图像进行不同程度的增强。

(2) 增强开关。

针对正常日间图像与暗光图像的像素值差异,系统设计了自适应图像增强开关。利用 MicroBlaze 求取暗光图像的像素平均值,与事先存储在 MicroBlaze 中的正常日间图像的像素平均值求取差值,并与设定的阈值进行比较,自适应地决定是否对图像进行增强。

3 实验结果

为了验证系统对于暗光、背光视频的增强效果,搭建了基于 HDMI 接口的实验环境,如图 4 所示。将事先录制好的暗光、背光视频通过 HDMI 输入接口输入视频增强系统,再将视频增强系统的输出接口连接到 Acer 高清显示器中。为了进行对比,同时也将暗光背光视频输出到另一台 Acer 高清显示器中。经验证,该系统能够实时处理 1080P @ 30 Hz 的暗光背光视频,实验处理视频为 1080P @ 30 Hz 暗光、背光彩色图像,

视频图像截图如图 5 和图 6 所示。



图 4 实验环境实物图

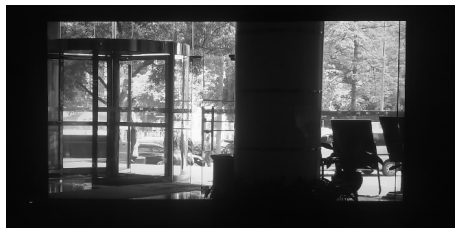


(a) 暗光原始视频图像



(b) 暗光增强后视频图像

图 5 暗光视频增强结果



(a) 背光原始视频图像



(b) 背光增强后视频图像

图 6 背光视频实验结果

4 结束语

为解决传统 Retinex 算法对 1080P 低质视频增强中的过度增强及“雾化”偏色问题,进一步增强算法在嵌入式小型系统上的实现,提出了一种改进 IMSR 的

增强算法,对其进行优化并实现了基于改进 IMSR 的 FPGA 实时增强。实验结果表明,基于该算法的图像增强系统实现了 1080P 低质图像的 28 ms 执行效率,满足了 1080P @ 30 Hz 低质视频的实时增强,且构建的系统设计简单,增强效果良好,成本较低,并且具有自适应增强程度调整及开关功能,具有一定的实用价值。

参考文献:

- [1] Fu H, Ma H, Wu S. Night removal by color estimation and sparse representation [C]//21st international conference on pattern recognition. [s. l.]: IEEE, 2012; 3656–3659.
- [2] Kyung W J, Kim D C, Ha Y H. Real-time multi-scale Retinex to enhance night scene of vehicular camera [C]//17th Korea-Japan joint workshop on frontiers of computer vision. [s. l.]: IEEE, 2011; 1–4.
- [3] 杨 军, 曹 静, 张正孝, 等. 基于 CUDA 的并行多尺度 Retinex 视频增强算法[J]. 计算机工程与科学, 2012, 34(4): 37–42.
- [4] 乔 陆, 陈 静. 红外图像自适应分段线性增强算法的 FPGA 实现[J]. 电脑知识与技术, 2015, 11(2): 228–230.
- [5] 王静轩, 尹传历. 基于 DSP 和 FPGA 的嵌入式实时图像增强系统[J]. 液晶与显示, 2013, 28(3): 459–463.
- [6] 程 岳, 杨立成, 谢建春. FPGA 实时图像增强系统的设计与实现[J]. 内蒙古师范大学学报: 自然科学版, 2015, 44(3): 322–327.
- [7] 朱婧雅, 王中元. 基于相似场景的低照度监控图像增强[J]. 计算机应用与软件, 2015, 32(1): 203–205.
- [8] 曹亚辉, 刘 峰. 基于 FPGA 的高清实时视频去雾系统的设计与实现[J]. 电视技术, 2015, 39(7): 48–51.
- [9] Wang L. High dynamic range image compression by fast integrated surround Retinex model[J]. Journal of Imaging Science & Technology, 2007, 51(1): 34–43.
- [10] 戴 岩. 夜间彩色图像增强技术研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2014.
- [11] Artix-7 FPGAs datasheet; DC and AC switching characteristics [EB/OL]. 2016. https://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds181_Artix_7_Data_Sheet.pdf.
- [12] AMBA AXI and ACE protocol specification [EB/OL]. 2013. <http://www.arm.com/zh/products/system-ip/amba/amba-open-specifications.php>.
- [13] Micro Blaze soft processor core [EB/OL]. 2011. <http://www.xilinx.com/products/design-tools/microblaze.html>.
- [14] Vivado high-level synthesis [EB/OL]. 2014. <http://www.xilinx.com/products/design-tools/vivado/integration/esl-design.html>.