千兆以太网图像传输例程使用说明

小梅哥编写，未经作者许可，严禁用于任何商业用途

2019 年 4 月 17 日

更新获取说明：

本文档如有更新，会发布在 www.corecourse.cn 网站。如您需查看并获取更新版本，只需要在该网站以本文档文件名为关键词搜索，即可查找到相关内容。

版本记录：

V1.0	首次发布	2019.04.17

文档所涉及文件说明：

本教程配套的文件压缩包名 AC6102_UDP_Camera.rar，解压后可以得到配套工程文件和 PC 端使用的图像接收软件。

以太网传图接收显示软件	AC6102 的千兆摄像头源工程
	

以太网介绍：

以太网（Ethernet）是一种计算机局域网技术。IEEE 组织的 IEEE 802.3 标准制定了以太网的技术标准，它规定了包括物理层的连线、电子信号和介质访问层协议的内容。

以太网是在 20 世纪 70 年代研制开发的一种基带局域网技术，使用同轴电缆作为网络媒体，采用载波多路访问和冲突检测(CSMA/CD)机制，数据传输速率达到 10MBPS 。随着技术的发展，当前以太网已经能够做到 100Gbps 的超高传输速率了。

自打问世以来，以太网就以其灵活的互联特性和强大的数据传输能力，成为了几乎所有电脑设备的标配。通过一根网线和一个网络访问账号，用户就可以在支持以太网的设备上访问世界各地服务器上的数据。从最开始的电话线传输，发展到 10M、100M、1Gbps 以太网，以及现在的 10G、40G、100G 以太网。从最早期只能传输简单文本信息，到现在可以实时传输超高清视频数据流，以太网一直是我们通过 Internet 进行工作、学习、生活、娱乐的强力支撑。

虽然目前以太网的传输速率已经可以达到 10Gbps、40Gbps、100Gbps 的速率，但是它们主要用于服务器内部进行高速数据交换，或者电信骨干网络。对于一般的消费级和工业应用，大部分都还是以百兆和千兆以太网为主。

上面提到，以太网主要规定的是物理层和介质访问层协议的内容，没有对更上层的协议进行定义。而我们常用的以太网通信应用，例如网络聊天，视频聊天，远程文件下载等，都是基于以太网物理层，通过定义上层的具体数据传输协议实现的。例如 QQ 聊天消息收发是基于 UDP 协议加腾讯自定义上层协议，实时视频数据的传输也多采用 UDP 协议，而文件传输则使用 FTP 传输协议。除开这些协议，还有应用非常广泛的网页传输协议 HTTP

和可靠数据传输使用的 TCP 协议等。

如今，工业以太网非常火热，使用较多的有 5 大主流协议，包括 Ethernet/IP、PROFINET、POWERLINK、EtherCAT、SERCOSIII。笔者了解较多的是 EtherCAT 协议，该协议主要用作于运动控制系统，很多的自动化应用系统都选择采用 EtherCAT 协议进行通信，完成多轴机械臂的协同控制。而使用 FPGA 实现 EtherCAT 从站，使用 SoC FPGA 实现 EtherCAT 主站，能够带来更高的实时效率。

除了工业控制，以太网在视频监控领域也使用较多，比较典型的一类就是工业相机。采用以太网接口的工业相机，能够使用网线连接到接收端，相较于使用 USB 传输方案的工业相机，采用以太网传输能够显著增加数据传输距离，一般的千兆工业相机在无中继情况下传输距离能够达到 100 米，而 USB 的可靠传输距离大概在 5M 左右。

千兆工业相机传输采用的是特定的协议标准，常见的协议标准为 GigE，GigE Vision 是由自动化影像协会 AIA(Automated Imaging Association)发起指定的一种基于千兆以太网的图像传输的标准。具有传输距离长（无中继时 100 米）、传输效率高并可向上升级到万兆网、通信控制方便、软硬件互换性强、可靠性高等优点。

开发基于 GigE 标准的工业相机，需要了解 GigE 的相关协议，图 1 为 TCP/IP 协议和 GigE Vision 协议的对比。可以看到，GigE 协议属于基于 UDP 协议定义的一种上层传输协议。因此，要想完成 GigE 协议的工业相机开发，必须先实现 UDP 协议。

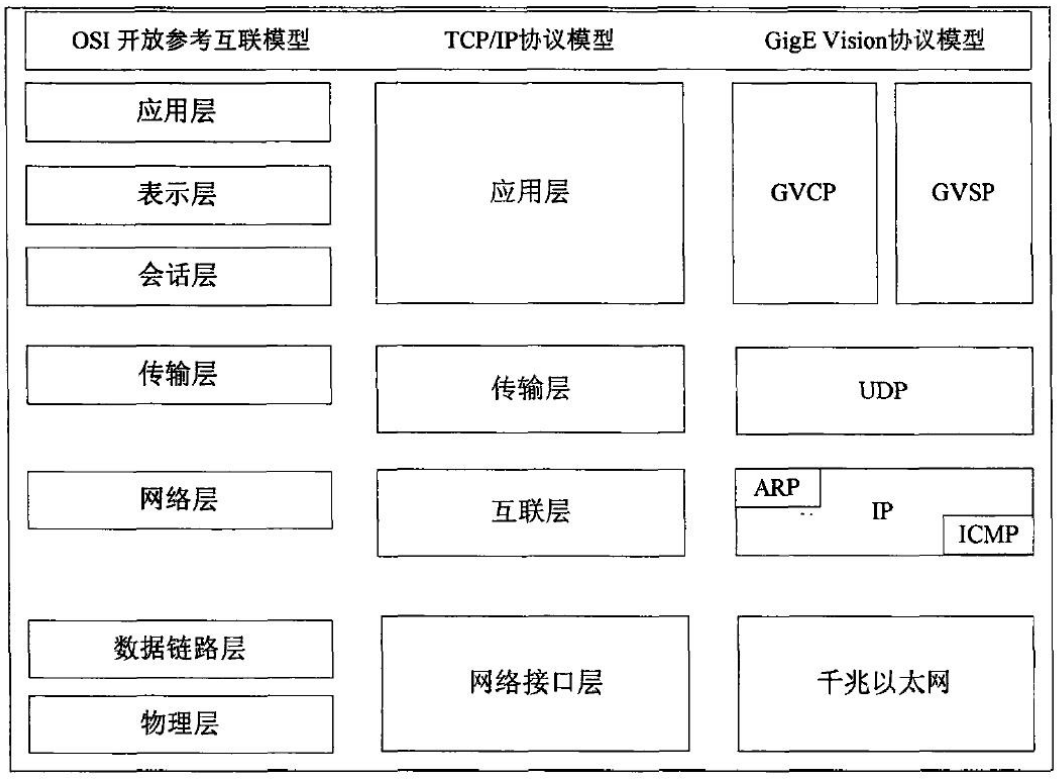


图 1 三种网络协议模型的比较

对于 FPGA 来说，实现 UDP、ARP、ICMP 协议还是比较方便的，而 GigE 协议，由于涉及到具体的产品应用，相对来说调试要复杂一点，因此我们在实现基于千兆以太网的图像采集系统设计时，并没有使用 GigE 协议的规范，而是基于 UDP 协议做了一个非常简单的图像数据流传输协议。直接将图像数据组成一个个的数据包通过 UDP 协议发送到 PC，而 PC 上使用相应的应用软件接收以太网数据包并重新组成一帧完整的图像显示在屏幕上。

关于千兆以太网协议 UDP 协议的具体实现，本手册不作为重点，希望了解详细的基于 Verilog 开发的以太网 UDP 协议的设计思路，可以在 www.corecourse.cn 网站上以“以太网

教程”为关键词查找相关资料。

实验平台：

1. AC6102 型 FPGA 开发板，板载千兆 GMII 接口以太网物理层芯片、CMOS 摄像头 DVP 接口
2. 带有千兆以太网接口的 PC 机（百兆网口的 PC 无法完成本实验）
3. OV5640 型 CMOS 摄像头，DVP 接口

实验过程

整个实验过程主要包含以下几个重点：

- 摄像头与 AC6102 开发板，AC6102 开发板与 PC 机网口的连接
- PC 机以太网设置
- FPGA 工程源码中网络参数设置或修改
- PC 端摄像头软件使用
- 实验现象演示
- FPGA 工程中摄像头分辨率设置修改

一、硬件平台连接

OV5640 摄像头：将 OV5640 摄像头插入 AC6102 开发板的摄像头接口，由于摄像头接口为 2*9 的排针，而开发板上为 2*10 的排母，所以插接时摄像头靠网口一侧对其即可。

网线：使用一根通用网线，一端接入 AC6102 开发板的网口，另一端接入 PC 机的网口即可。

开发板连接如图 2 所示。

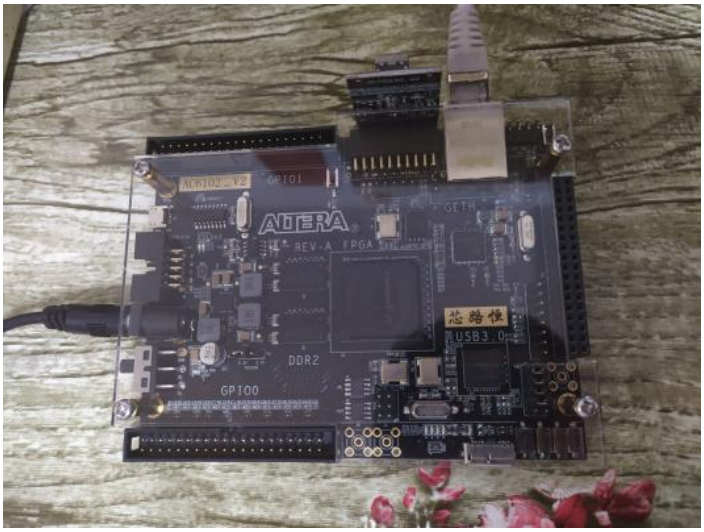


图 2 开发板与 OV5640 摄像头连接

二、 PC 机以太网设置

1、 IP 设置

由于大部分情况下，PC 机都是使用的自动获取 IP 地址的方式，因此当我们使用网线将 FPGA 开发板上的网口和 PC 网口连接到一起之后，PC 端是没有一个固定的 IP 地址的，为了能够正确的接收到 FPGA 发送的图像数据，需要先修改 PC 机的 IP 地址，给其指定一个确定的 IP 地址。我们提供的 FPGA 程序默认的目标 IP 为 192.168.0.3，因此，第一步为了快速成功运行试验，建议您也设置电脑的 IP 地址为 192.168.0.3、网关为 192.168.0.1，如图 3 所示。

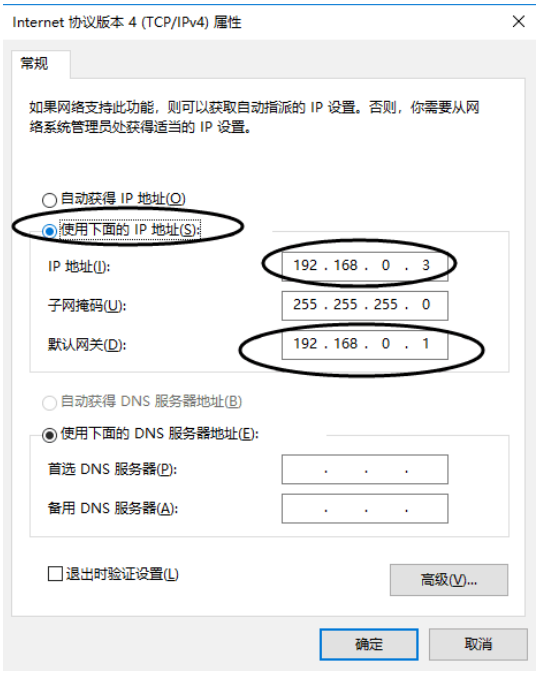


图 3　PC 网卡 IP 地址设置

2、 巨型帧设置

在本例中，每个像素的数据为 RGB565 模式，即一个像素由 16 位数据，2 个字节组成。我们的例程中目前可以提供 1280*720 分辨率的图像传输，图像是以行为单位进行 UDP 组包的，1280*720 分辨率的图像，每一行图像数据为 1280 个像素，既 2560 个字节数据，同时，为了实现行同步，在每一行数据包的开头都插入了 2 个字节的行号，所以实际一行图像的数据为 1280*2+2，即 2562 个字节。

但是，一般的 PC 网卡默认设置都是一个以太网帧的最大长度不超过 1500 个字节的，在这种设置下，如果一个以太网数据帧的长度超过了 1500 个字节，整个数据帧将被丢弃。此种设置主要是为了降低过长的数据帧一直占用网卡，导致其他网络无法及时获得网络资源而设置的。实际上，现如今大多数网卡已经支持巨型帧，所谓巨型帧，是指一帧以太网的数据长度可以超过 1500 个字节。这对于一些点对点连接的应用，能够显著提高网络利用率，提高传输效率。设置以太网巨型帧的方法非常简单，如图 4 所示。

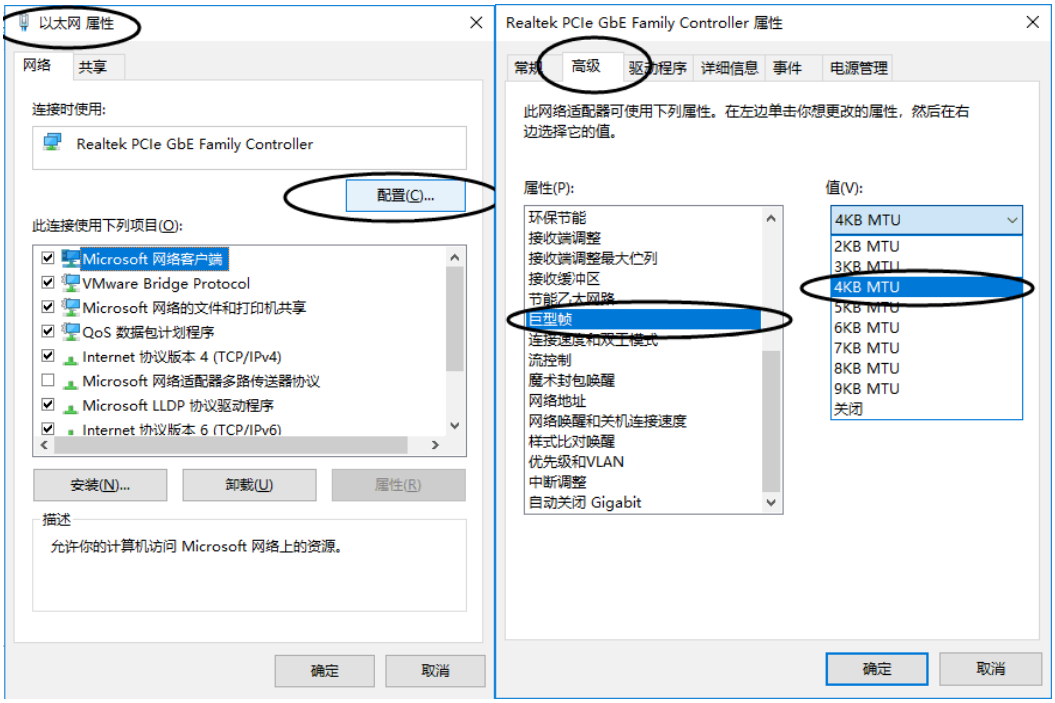


图 4　设置电脑网卡支持巨型帧

设置为 4K 字节的巨型帧，就能够支持到最高 1920 个行像素的图像传输了。

三、　FPGA 工程源码中网络参数设置

AC6102_OV5640_UDP_GETH.qar 文件为我们提供的 FPGA 工程文件一体化压缩文件，使用时，放置在非中文目录下，双击即可使用 Quartus II 软件打开并自动解压得到源工程文件。该工程包含的源码文件及功能说明如下表所述。

路径	文件名	文件功能说明
./rtl	OV5640_UDP_GETH.v	以太网摄像头工程顶层模块
	pll.qip	锁相环，产生摄像头模块工作所需的 24MHz 时钟和以太网发送所需的 125MHz 时钟信号
./rtl/iic	cmos_init.v	摄像头 I²C/SCCB 控制接口初始化模块顶层，通过例化 i2c_control 模块，实现通过 I²C 协议读写 CMOS 摄像头的各个配置寄存器
	-single_port_rom.v	一个单口 RAM 模块的 Verilog 形式描述，里面存储的是 CMOS 摄像头模块每个寄存器初始化时对应地址和应该写入的值。
	-i2c_control.v	I²C 控制器顶层文件，完成一次 I²C 读写操作
	--i2c_bit_shift.v	完成 I²C 一个字节数据收发的最基本位传输模块
./rtl/eth	UDP_Send.v	UDP 发送模块顶层文件，将 eth_dcfifo 缓存中的数据组建为完整的 UDP 数据帧，以广播或点对点形式发送到网络上的网络设备。
	-eth_dcfifo.v	双时钟 FIFO 缓存，写入端写入的是 CMOS 摄像头实时采集到的图像数据，读出端为 UDP 发送模块
	-CRC32_D8.v	以太网帧校验码生成模块

工程中对网络参数的设置是在 OV5640_UDP_GETH.v 文件中，例化 UDP_Send 模块时，通过直接给对应的端口设置确定值实现的，其中与网络参数相关的例化如下表所示。

端口例化	参数说明

.data_length(1280*2+2),	指定每个 UDP 包数据部分长度，值为行像素个数的 2 倍（每个像素 2 个字节）再加 2（行号）
.des_ip(32'hc0_a8_00_03),	接收端(PC)机的 IP 地址，这里为 192.168.0.3，可以自由修改为 PC 端网卡的实际 IP 地址
.des_mac(48'hFF_FF_FF_FF_FF_FF),	接收端（PC）机的 MAC 地址，设置为全 F 则代表广播模式，所有连接在同一网络上的网卡都能收到数据，
.des_port(16'd6000),	接收端端口号，PC 端软件绑定该端口号以接收图像数据
.src_ip(32'hc0_a8_00_02),	发送端（FPGA）IP 地址，这里默认设置的是 192.168.0.2
.src_mac(48'h00_0a_35_01_fe_c0),	发送端（FPGA）MAC 地址，由于是自行测试，不作为通用型产品销售，因此无需申请国际认证的 MAC 地址，自己随意填一个就可以
.src_port(16'd5000),	发送端（FPGA）端口地址

实际在使用时，用户可以自行设定上述所有参数，不过在设置时需要牢记以下规则：

- des_ip 指定的是 PC 端的 IP 地址，因此该数值必须和 PC 上的有线网卡的 IP 地址完全一致
- des_mac 指定的是 PC 的 MAC 地址，由于每个电脑的 MAC 地址都不一样，我们的程序在发布时，为了方便用户在不对 FPGA 工程做任何修改的情况下就能直接进行实验，因此在程序里直接写的是广播地址。如果需要实现点对点连接，可以将此处改为用户实际的 MAC 地址。
- des_port 指定的是 PC 端的网络端口地址，该地址表明了 PC 端软件使用哪个网络端口接收图像数据。
- PC 和 FPGA 的开发板的网络地址段必须保持一致。所谓网络地址段，就是 IP 地址的前 3 个数字，例如本例中 192.168.0.3 和 192.168.0.2 处于同一网段，他们的网段都为 192.168.0。如果用户需要修改程序中的 IP 地址以匹配自己电脑上的 IP 地址，那么 des_ip 和 src_ip 的网段必须都修改为一致，且最后一个数据不能相同，即 des_ip 和 src_ip 不能都为 192.168.0.3。

四、 PC 端摄像头软件使用

图 5 为小梅哥开发的千兆以太网图像接收显示的 PC 端软件，使用 VC++基于 MFC 开发。使用时需要先设置相关网络参数，才能正确的接收到图像数据。



图 5　以太网图像接收软件功能说明

- 本机 IP，指 PC 机网卡的 IP 地址，这个需要与电脑的实际 IP 地址相同。
- 本机端口，指 PC 机接收图像数据时需要监听的本地网络端口号，在 FPGA 中，des_port 指定的就是这个端口号。
- 远程 IP，指图像发送设备（这里指 AC6102 开发板）的网卡的 IP 地址，对应 FPGA 代码中的 src_ip。
- 远程端口，指图像发送设备（这里指 AC6102 开发板）发送图像数据时使用的端口号，对应 FPGA 代码中的 src_port。
- 分辨率，本软件支持多种分辨率图像的接收显示，包括 640*480、800*480、800*600、1024*768、1280*720 分辨率的图像，具体选择那个分辨率，需要与 FPGA 代码中的设置相对应，关于修改 FPGA 代码中分辨率设置，后面会提到。FPGA 工程默认输出的是 1280*720 分辨率的图像，所以实验时软件中分辨率选项应该选择 1280*720。
- 一切就绪后，点击连接即可开始接收并显示图像，再次点击该按钮停止接收。点击保存图片可以将当前界面上的图像以 BMP 格式保存到电脑上。

五、　实验现象演示

上述过程都正确的进行之后，给开发板上电，使用 Quartus II 软件的 Programer 下载预先已经编译好的配置文件“OV5640_UDP_GETH.sof”，可以看到开发板的网口黄色灯开始急速闪烁，打开 PC 显示软件，设置正确的网络参数，并选择分辨率为 1280*720，点击连接，即可接收到摄像头采集的图像并实时显示在 PC 机软件上，如图 6 所示。

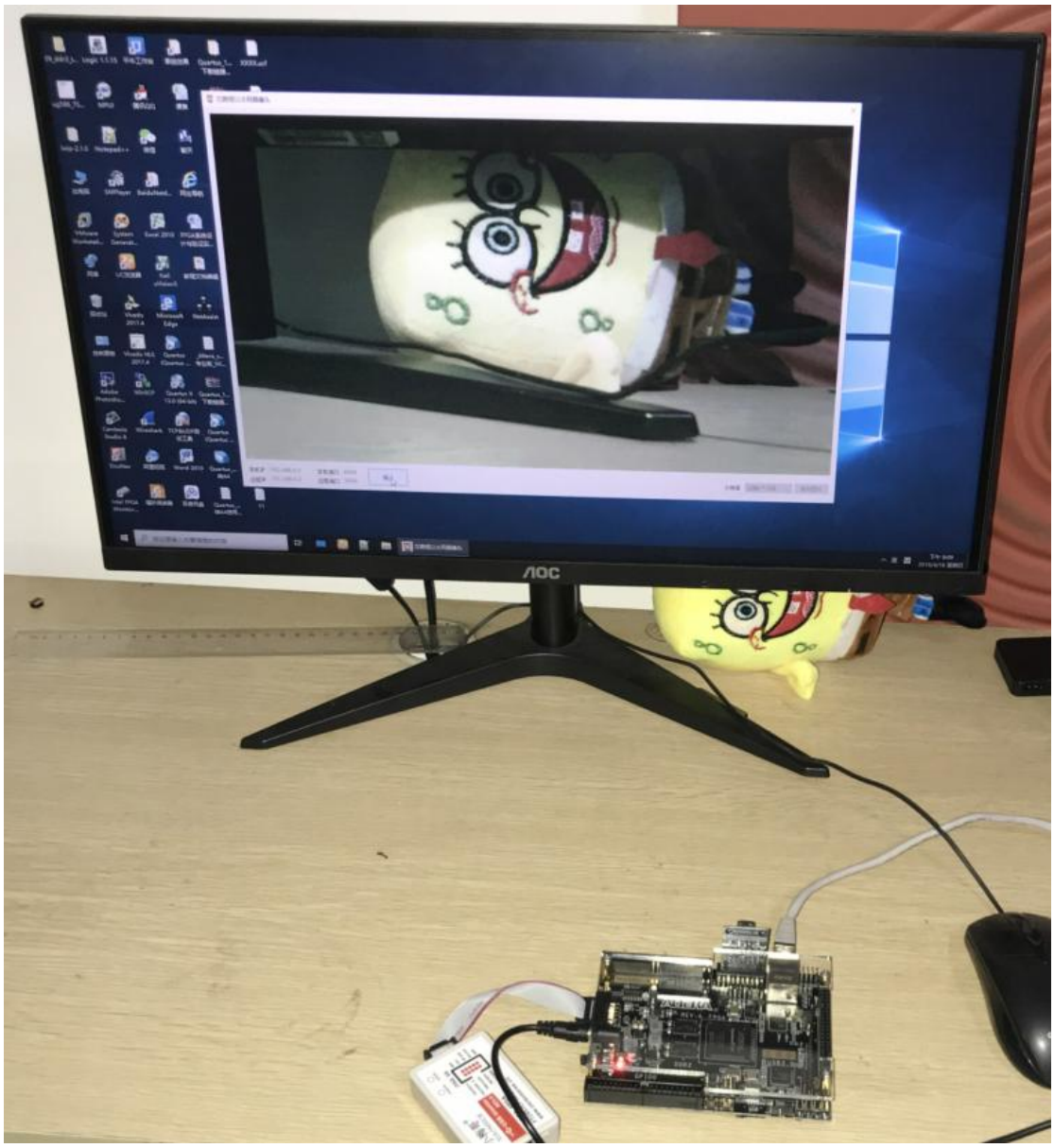


图 6　实时采集显示 1280*720 分辨率图像

六、　修改摄像头输出图像分辨率

OV5640 摄像头是一款能够输出高达 500W 像素图像的高性能数字摄像头，使用时，可以通过配置其寄存器以输出小于等于 2592*1944 分辨率的多种分辨率图像，下表为 OV5640 能够输出的常见的分辨率定义和其对应的实际像素矩阵大小：

定义	分辨率	定义	分辨率
QSXGA	2592*1944	XGA	1024*768
QXGA	2048*1536	SVGA	800*600
UXGA	1600*1200	VGA	640*480
SXGA	1280*1024	QVGA	320*240
WXGA+	1440*900	QQVGA	160*120
WXGA	1280*800		

关于 OV5640 摄像头输出图像大小可以通过 4 个寄存器修改，4 个寄存器的地址和功能

说明如下表所示。

寄存器地址	寄存器名称	寄存器功能
3808h	DVPHO	Bit[7:4]调试模式 Bit[3:0]DVP 接口模式输出图像水平宽度值的[11:8]
3809h	DVPHO	Bit[3:0]DVP 接口模式输出图像水平宽度值的[7:0]
380ah	DVPVO	Bit[7:4]调试模式 Bit[3:0]DVP 接口模式输出图像垂直高度值的[11:8]
380bh	DVPVO	Bit[3:0]DVP 接口模式输出图像垂直高度值的[7:0]

这些寄存器的配置在本 FPGA 工程源码中位于 single_port_rom.v 文件的 263 行附近。

在本程序中，默认设置的输出分辨率为 1280*720。1280 的 16 进制值为 500h，720 的 16 进制值为 2D0h，所以 3808 = 05;3809 = 00; 380a = 02;380b = d0; 下表为常见的几种分辨率对应的各个寄存器需要设置的值的对应表。

分辨率	3808	3809	380a	380b
640*480	02	80	01	E0
800*480	03	20	01	E0
800*600	03	20	02	58
1024*720	04	00	02	D0
1280*720	05	00	02	D0

所以，要想使 OV5640 摄像头输出指定分辨率的图像，首先需要在代码中修改上述 4 个寄存器的值。

上述修改只是完成了 5640 输出图像的设置，要想以太网能够将数据通过 UDP 发送到 PC 端，还需要修改以太网每次发送 UDP 数据包的长度。因为一旦修改分辨率，修改了水平宽度，每行图像的像素个数就变了，所以需要修改 UDP 发送模块每次发送数据包的数据长度值。

UDP 发送模块每次发送数据包的数据长度值在 OV5640_UDP_GETH.v 文件的 100 行左右，直接修改 UDP_Send 模块例化时 data_length 的值为 2 倍的行宽像素值加 2 即可。

图 7 所示为修改整个工程采集并输出 640*480 分辨率图像配置的该部分代码截图：

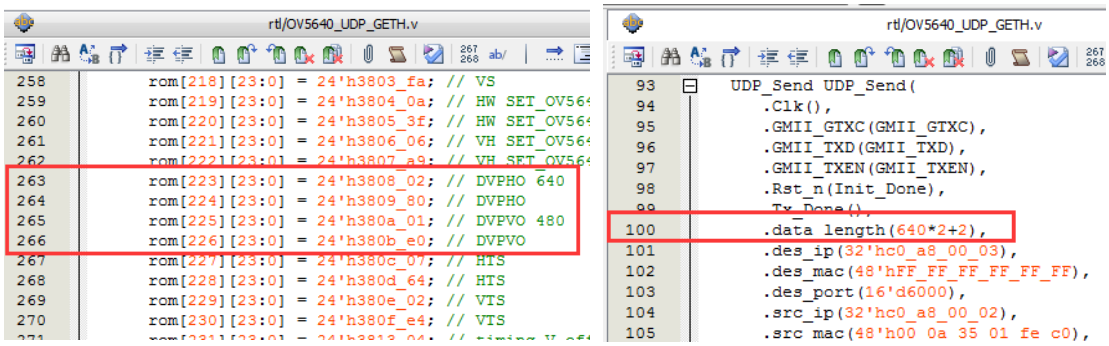


图 7　640*480 代码修改方式

修改完成后，对工程全编译，下载生成的 sof 文件到 FPGA 开发板中，会发现 PC 端显示软件会仅显示 640*480 区域的图像了，即使当前分辨率设置还是 1280*720，如图 8 所示。也就是说，当软件设置的分辨率大于等于图像的实际分辨率时，是能够正常显示图像的。但是反过来就不行了。

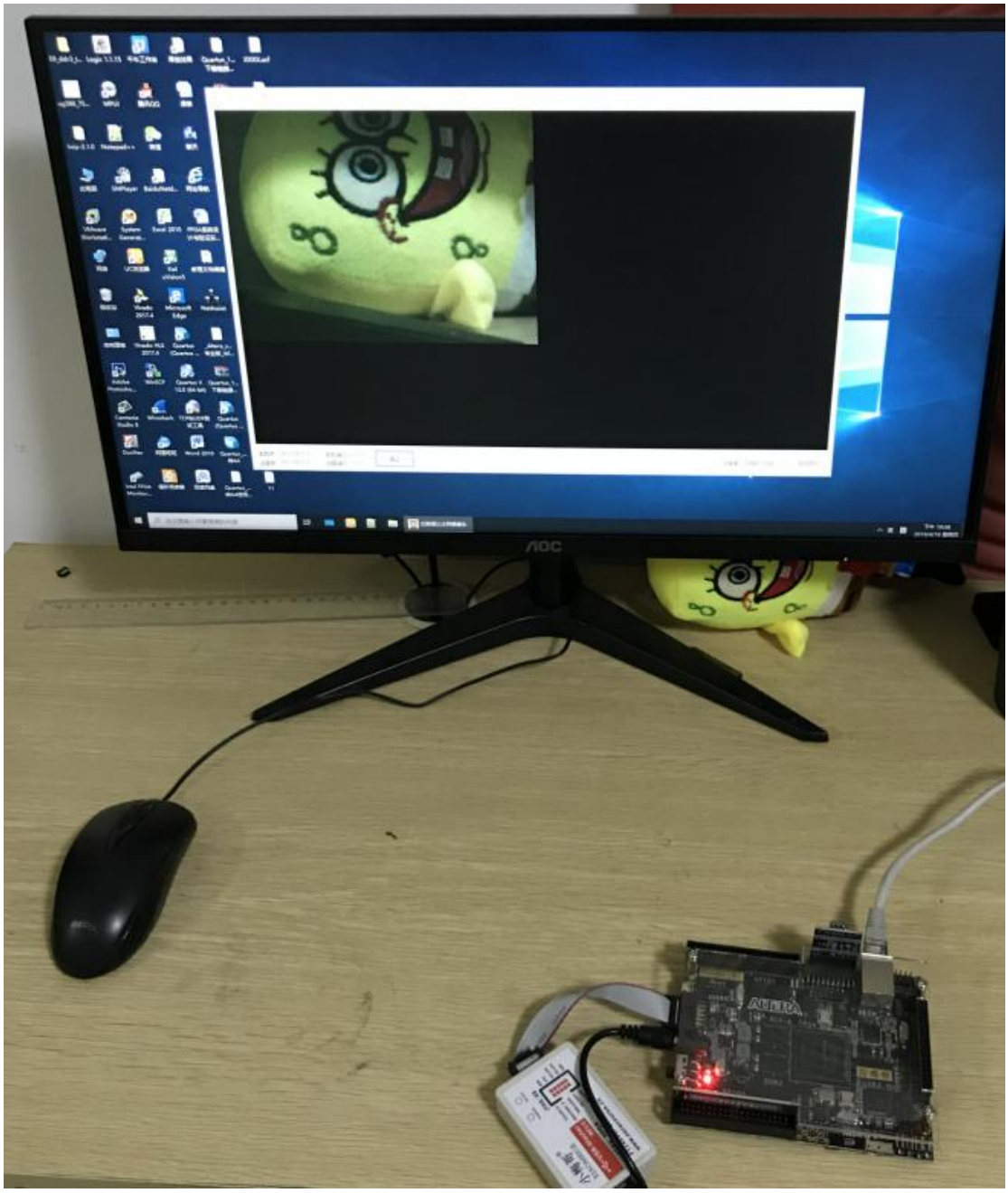


图 8　实时采集显示 640*480 分辨率图像

更多内容，敬请关注芯路恒电子论坛 www.corecourse.cn