



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104821849 B

(45)授权公告日 2017.05.31

(21)申请号 201510239058.6

(22)申请日 2015.05.12

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 104821849 A

(43)申请公布日 2015.08.05

(73)专利权人 北京大学
地址 100871 北京市海淀区颐和园路5号

(72)发明人 王韬 李晓光 吴浩洋 吕松武

(74)专利代理机构 北京万象新悦知识产权代理
事务所(普通合伙) 11360
代理人 张肖琪

(51)Int.Cl.
H04B 10/2575(2013.01)

(56)对比文件
CN 103559156 A,2014.02.05,

CN 101399556 A,2009.04.01,
US 2013287070 A1,2013.10.31,
US 2004242261 A1,2004.12.02,
KR 20080052178 A,2008.06.11,
Jiahua Chen,etal..A High-performance
and High-programmability Reconfigurable
Wireless Development Platform.《2014
International Conference on Field-
Programmable Technology(FPT)》.2014,
吴浩洋等.GRT:高性能可定制无线网络底层
软硬件开放平台.《电子科技大学学报》.2015,
Tao Wang,etal..GRT: a Reconfigurable
SDR Platform with High Performance and
Usability.《ACM SIGARCH Computer
Architecture News》.2014,

审查员 刘兰

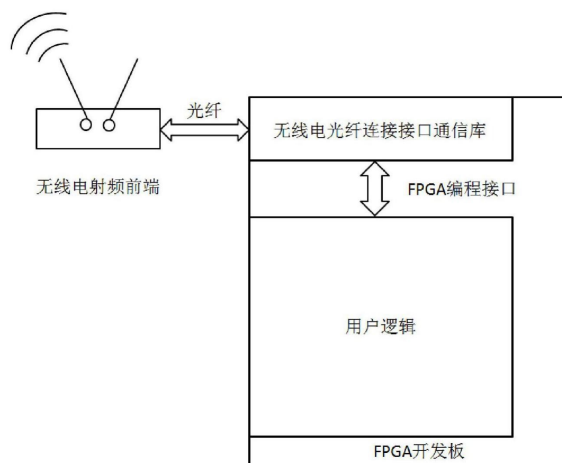
权利要求书2页 说明书6页 附图5页

(54)发明名称

一种基于FPGA的无线电光纤连接接口通信
库及其实现方法

(57)摘要

本发明公布了一种基于FPGA的无线电光纤
连接接口通信库及其实现方法,将FPGA与通用无
线电射频前端通过光纤接口连接,包括外部接口
和内部模块;通过外部接口分别与无线局域网可
重构物理层和无线电前端相连接;内部模块包括
外设管理模块、打包器、光纤接口模块、解包器
和数据传输模块。本发明通过采用高速率低延迟
数据传输方法、动态配置射频参数方法、基于速
率的流量控制方法和基于FIFO的时钟域转化等
方法,解决基于FPGA的软件无线电开发平台与射
频前端的连接问题,具备高速率、低延迟、易于
配置、支持多采样率、支持用户自定义时钟域
的特点。



1. 一种基于FPGA的无线电光纤连接接口通信库,包括外部接口和内部模块;其特征是,所述无线电光纤连接接口通信库通过外部接口分别与用户自定义无线电协议物理层和无线电射频前端相连接;内部模块包括外设管理模块、打包器、光纤接口模块、解包器和数据传输模块;外设管理模块包括初始化外设模块和参数配置模块;通过打包器将管理包和数据包进行打包得到统一格式的包;通过光纤接口模块将打包器打包好的统一格式的包转换成光纤接口的信号,并将光纤接口收到的信号转换为包的数据格式;通过解包器将收到的包分成控制包和数据包,分别发送给外设管理模块和数据传输模块;通过数据传输模块将用户请求发送的数据进行分片和添加包头后发送给打包器,并将收到的数据包传输给用户。

2. 如权利要求1所述基于FPGA的无线电光纤连接接口通信库,其特征是,所述外部接口包括FPGA编程接口和光纤接口;所述无线电光纤连接接口通信库的一端通过FPGA编程接口与用户自定义无线电协议物理层相连,另一端通过光纤接口连到无线电射频前端上。

3. 如权利要求2所述基于FPGA的无线电光纤连接接口通信库,其特征是,所述FPGA编程接口包括用于数据传输的数据收发接口和用于射频参数配置的参数配置接口。

4. 权利要求1~3任一所述基于FPGA的无线电光纤连接接口通信库的实现方法,所述通信库包括外部接口和内部模块;其特征是,内部模块包括外设管理模块、打包器、光纤接口模块、解包器和数据传输模块;外设管理模块包括初始化外设模块和参数配置模块;通过打包器将管理包和数据包进行打包得到统一格式的包;通过光纤接口模块将打包器打包好的统一格式的包转换成光纤接口的信号,并将光纤接口收到的信号转换为包的数据格式;通过解包器将收到的包分成控制包和数据包,分别发送给外设管理模块和数据传输模块;通过数据传输模块将用户请求发送的数据进行分片和添加包头后发送给打包器,并将收到的数据包传输给用户;所述实现方法包括如下步骤:

A) 设计外部接口,通过外部接口分别与用户自定义无线电协议物理层和无线电射频前端相连接;

B) 设计内部模块,通过内部模块将用户待发送数据转换为符合无线电射频前端和光纤接口所规定的的数据格式,将无线电射频前端从空气中接收到并通过光纤传到FPGA的信号转换为用户希望得到的数据格式,并提供接口给用户动态配置无线电参数。

5. 如权利要求4所述基于FPGA的无线电光纤连接接口通信库的实现方法,其特征是,步骤B) 通过初始化外设模块配置基本的射频收发和传输参数,通过参数配置模块实现动态配置参数。

6. 如权利要求4所述基于FPGA的无线电光纤连接接口通信库的实现方法,其特征是,步骤B) 在数据传输模块中采用高速率低延迟数据传输方法,分别通过流水线方法实现高速率传输,通过边发边算校验和方法实现低延迟传输。

7. 如权利要求6所述基于FPGA的无线电光纤连接接口通信库的实现方法,其特征是,步骤B) 通过数据传输模块将用户请求发送的数据进行分片,通过用户可调的分片长度来平衡高速率和低延迟。

8. 如权利要求4所述基于FPGA的无线电光纤连接接口通信库的实现方法,其特征是,步骤B) 参数配置模块中采用动态配置无线电参数方法,具体是通过采用参数寄存器方法提供一个用户可写的参数寄存器,通过检测所述参数寄存器,如果参数发生了变化,在可以配置

参数时将参数配置包发送到无线电射频外设。

9. 如权利要求4所述基于FPGA的无线电光纤连接接口通信库的实现方法,其特征是,步骤B)数据传输模块在传输数据包过程中采用基于速率的流量控制方法,具体是通过内部维护流量计时器,根据当前所需流量的不同初始化计时器,再根据当前计时器的状态决定是否发送当前数据包。

10. 如权利要求4所述基于FPGA的无线电光纤连接接口通信库的实现方法,其特征是,步骤B)数据传输模块和参数配置模块通过采用基于异步先入先出队列的时钟域转化方法,将用户自定义的时钟域转化为通信库的主时钟域,从而支持用户自定义时钟域。

一种基于FPGA的无线电光纤连接接口通信库及其实现方法

技术领域

[0001] 本发明属于无线电领域,涉及FPGA(现场可编程门阵列)与通用软件无线电射频前端,尤其涉及一种FPGA与通用软件无线电前端通过光纤连接的无线电光纤连接接口通信库及其实现方法。

背景技术

[0002] 软件定义的无线电是一种无线通信技术,使用通用可配置的无线电射频前端,通信协议由软件定义而不是硬件连接定义,具有高度的灵活性和开放性。软件无线电技术加速了无线通信系统的迭代,缩短了产品生产周期,在多种通信系统中得到了运用,如民用移动通信、军事通信等。现有软件无线电系统分成两个组成部分(见图1),包括作为开发者编程平台的计算机和一个可调多种射频参数的高性能硬件射频前端。计算机与硬件外设之间的接口完成射频参数的配置以及数据传输。在无线通信性能越来越高的今天,在软件无线电系统中,现有计算机的数据处理速度和延迟越来越难以满足实时无线通信系统的性能要求,因此研究人员希望寻求比计算机更高性能的通信协议开发平台。

[0003] 现场可编程门阵列(FPGA)是种可以编程的电路器件,与基于CPU运算的计算机相比,FPGA在大规模并行计算和异构数据处理上具有很好的性能。随着FPGA技术的发展,FPGA的运算能力和可编程性有了很大的提升,目前有软件无线电的开发者(如Tao Wang, Guangyu Sun, Jiahua Chen, Jian Gong, Haoyang Wu, Xiaoguang Li, Songwu Lu, and Jason Cong, "GRT: a Reconfigurable SDR Platform with High Performance and Usability", ACM SIGARCH Computer Architecture News (CAN), September 2014)选择在计算机和无线电射频前端之间采用FPGA对无线通信底层算法进行加速,称为基于FPGA的软件无线电系统,见图2。

[0004] 与现有的基于计算机的软件无线电系统相比,基于FPGA的软件无线电系统在结构上将计算机替换为FPGA开发平台,与通用无线电射频前端相连,具有高速率、低延迟的特点。基于FPGA的软件无线电领域面临的一个问题是,缺少一个易于使用的与通用射频前端进行直接连接的FPGA通信库。因此FPGA开发平台和通用无线电射频前端之间的FPGA通信库成为了新的需求。

[0005] 目前软件无线电平台与射频前端之间的通信库存在以下不足:

[0006] 1) 传输速率慢,延迟大,无法满足现代无线通信协议的要求。如在文献(Pei Huang, Xi Yang, Li Xiao, "WiFi-BA: Choosing Arbitration over Backoff in High Speed Multicarrier Wireless Networks", INFOCOM, 2013)中记载了通过计算机连接射频前端的软件无线电平台,其测试结果受限于计算机处理的延迟,测试值是数百微秒。而现代民用无线通信常用的WiFi 802.11协议规定的物理层延迟是在一百微秒以内,目前软件无线电平台无法满足现代无线通信协议的要求。

[0007] 2) 不支持动态配置射频参数。如在文献(Humphries, J.R., "Software defined radio for passive sensor interrogation", European Frequency and Time Forum&

International Frequency Control Symposium,2013Joint)中通过使用Matlab脚本静态生成配置不同参数的Verilog HDL代码,每次生成后需要重新烧写FPGA,并不支持动态配置。这不适用于很多需要动态配置射频参数的应用,如认知无线电。

[0008] 3) 不含流量控制,不支持多种采样率切换。软件无线电的其中一个重要可调参数是采样率,如果要支持多采样率,就需要一套流量控制机制,以确保不同采样率时数据传输不会发生流量不匹配造成的错误。

[0009] 综上所述,目前现有的连接软件无线电平台与射频前端之间的通信库还不能提供支持高速率低延时的传输、支持不同采样率下的流量控制和支持运行时动态射频参数的配置。

发明内容

[0010] 为了克服上述现有技术的不足,本发明提供一种基于FPGA的无线电光纤连接接口通信库及其实现方法,将现场可编程门阵列(FPGA)与通用无线电射频前端通过光纤接口连接,用以解决基于FPGA的软件无线电开发平台与射频前端的连接问题,具备高速率、低延迟、易于配置、支持多采样率、支持用户自定义时钟域的特点。

[0011] 以下是对术语的约定:

[0012] FPGA:Field-Programmable Gate Array,现场可编程门阵列,一种可以编程的电路器件,广泛应用于集成电路的原型设计以及大规模并行数据处理的加速器设计。

[0013] SDR:Software Defined Radio,软件定义的无线电,简称软件无线电,是一种无线电通信技术,使用通用可配置的无线电射频前端,通信协议由软件定义而不是硬件连接定义,具有高度的灵活性和开放性。

[0014] 本发明提供的技术方案是:

[0015] 一种基于FPGA的无线电光纤连接接口通信库,包括外部接口和内部模块;所述无线电光纤连接接口通信库通过外部接口分别与用户自定义无线电协议物理层和无线电射频前端(USRP,Universal Software-defined Radio Peripheral)相连接;内部模块包括外设管理模块、打包器、光纤接口模块、解包器和数据传输模块;外设管理模块包括初始化外设模块和参数配置模块;通过打包器将管理包和数据包进行打包得到统一格式的包;通过光纤接口模块将打包器打好的统一格式的包转换成光纤接口的信号,并将光纤接口收到的信号转换为包的数据格式;通过解包器将收到的包分成控制包和数据包,分别发送给外设管理模块和数据传输模块;通过数据传输模块将用户请求发送的数据进行分片和添加包头后发送给打包器,并将收到的数据包传输给用户。

[0016] 针对上述基于FPGA的无线电光纤连接接口通信库,进一步地:

[0017] 所述外部接口包括FPGA编程接口和光纤接口;所述无线电光纤连接接口通信库的一端通过FPGA编程接口与用户自定义无线电协议物理层相连,另一端通过光纤接口连到无线电射频前端上。所述FPGA编程接口包括用于数据传输的数据收发接口和用于射频参数配置的参数配置接口。

[0018] 本发明还提供上述基于FPGA的无线电光纤连接接口通信库的实现方法,包括如下步骤:

[0019] A) 设计外部接口,通过外部接口分别与用户自定义无线电协议物理层和无线电射

频前端相连接；

[0020] 本发明通信库是基于FPGA设计的,对外有两个接口,提供给软件无线电开发者的FPGA编程接口和与通用无线电射频前端相连的光纤接口,见图3,包括:

[0021] A1.设计FPGA编程接口,包括两组信号,用于数据传输的数据收发接口,和用于射频参数配置的参数配置接口。

[0022] A2.设计光纤接口,使得无线电光纤连接接口通信库通过光纤接口与通用无线电前端相连。

[0023] B)设计内部模块,通过内部模块将用户待发送数据转换为符合无线电前端和光纤接口所规定的格式,将无线电前端从空气中接收到并通过光纤传到FPGA的信号转换为用户希望得到的数据格式,并提供接口给用户动态配置无线电参数;内部模块包括外设管理模块、打包器、光纤接口模块、解包器和数据传输模块;外设管理模块包括初始化外设模块和参数配置模块。

[0024] 图4是通信库的内部模块连接的示意图。针对上述基于FPGA的无线电光纤连接接口通信库内部模块的设计,进一步地:

[0025] 步骤B)通过初始化外设模块配置基本的射频收发和传输参数,通过参数配置模块实现动态配置参数。

[0026] 步骤B)中打包器通过双路合并器将来自外设管理模块的管理包和来自数据传输模块的数据包双路合并,并添加统一的包头,使后续模块看到的是统一格式的包。

[0027] 步骤B)中设计光纤接口模块,用来将打包器打好的包转换成光纤接口的信号,以及将光纤接口收到的信号转换为包的数据格式。

[0028] 步骤B)在数据传输模块中采用高速率低延迟数据传输方法,分别通过流水线方法实现高速率传输,通过边发边算校验和方法实现低延迟传输。

[0029] 具体地,高速率传输所应用的技术是流水线方法。低延迟传输运用的技术是边发边算校验和,为了保证数据的正确性,数据包中需要添加CRC32校验和,为了减少计算校验和的延迟,本发明采用了边发送边计算的技术,当需要发送校验和时计算完成即可,此技术可以减少约40%的延迟。为了在高速率和低延迟之间做平衡,本发明将分片长度设置为用户可调。在本发明实施例中,以太网单包报文分片长度选择为100个复数,既能满足速率可以达到采样率的最高要求,又保障了延迟在大多数通信协议可以接受的范围内。100个复数由分片的平均延迟约为 $100\text{复数} \times 4\text{字节} / \text{复数} \times 8\text{纳米} / \text{字节} / 2 = 1.6\mu\text{s}$,速率可以满足最高采样率100MSps的要求。

[0030] 步骤B)通过设计解包器分析收到的包,分成控制包和数据包,前者将会发送给外设管理模块,后者将会发送给数据传输模块。

[0031] 步骤B)通过数据传输模块将用户请求发送的数据进行分片,所述分片的长度既能够满足传输速率达到采样率的最高要求,又能够保障延迟在大多数通信协议可以接受的范围内。

[0032] 步骤B)参数配置模块中采用动态配置射频参数方法,具体是通过采用参数寄存器方法提供一个用户可写的参数寄存器,通过检测所述参数寄存器,如果参数发生了变化,在可以配置参数时将参数配置包发送到无线电射频前端。

[0033] 动态配置射频参数方法采用了参数寄存器的技术,即通信库提供一个用户可写的

参数寄存器,通信库检测此寄存器,如果参数发生变化,等待可以配置的时机,将参数配置包发送到无线电射频前端。

[0034] 步骤B) 数据传输模块在传输数据包过程中采用基于速率的流量控制方法,具体是通过内部维护流量计时器,根据当前所需流量的不同初始化计时器,再根据当前计时器的状态决定是否发送当前数据包。

[0035] 步骤B) 数据传输模块和参数配置模块通过采用基于异步先入先出队列(FIFO, First-in First-out)的时钟域转化方法,异步FIFO的输入与输出时钟可以设置为不同的频率,因此可以完成对异步时钟域信号的转化,将用户自定义的时钟域转化为通信库的主时钟域,从而支持用户自定义时钟域。

[0036] 与现有技术相比,本发明的有益效果是:

[0037] 通过本发明提供的FPGA与通用软件无线电前端通过光纤连接的无线电光纤连接接口通信库及其实现方法,用以解决基于FPGA的软件无线电开发平台与射频前端的连接问题,为基于FPGA的软件无线电开发者提供了与射频前端的高性能连接方式,缩短了无线通信协议物理层与无线射频前端的数据传输延迟,加快了无线通信产品的开发速度。本发明具备高速率、低延迟、易于配置、支持多采样率、支持用户自定义时钟域的特点。

附图说明

[0038] 图1是现有软件无线电系统的组成结构示意图。

[0039] 图2是基于FPGA的新型软件无线电系统组成结构示意图。

[0040] 图3是本发明无线电光纤连接接口通信库外部接口示意图。

[0041] 图4是通信库内部模块连接示意图。

[0042] 图5是在可重构无线局域网实例中外部接口示意图。

[0043] 图6是在可重构无线局域网实例中内部模块划分。

[0044] 图7是在可重构无线局域网实例中外设管理模块的状态机图。

[0045] 图8是在可重构无线局域网实例中数据传输模块自定的BURST握手信号接口图。

[0046] 图9是在可重构无线局域网实例中异步时钟域转换功能的实现方法示意图。

具体实施方式

[0047] 下面结合附图,通过实施例进一步描述本发明,但不以任何方式限制本发明的范围。

[0048] 本发明提供一种无线电光纤连接接口通信库,包括外部接口和内部模块,其中,外部接口包括提供给软件无线电开发者的FPGA编程接口和与通用无线电射频前端相连的光纤接口;无线电光纤连接接口通信库的一端通过FPGA编程接口与用户自定义无线电协议物理层相连,另一端通过光纤接口连到无线电射频前端上;FPGA编程接口包括两组信号,分别为用于数据传输的数据收发接口和用于射频参数配置的参数配置接口;内部模块包括外设管理模块、打包器、光纤接口模块、解包器和数据传输模块;外设管理模块包括用于配置基本的射频收发和传输参数的初始化外设模块和用于动态配置参数的参数配置模块;打包器用于将来自外设管理模块的管理包和来自数据传输模块的数据包通过双路合并器进行双路合并,并添加统一的包头,使后续模块看到的是统一格式的包;光纤接口模块用来将打包

器打好的包转换成光纤接口的信号,以及将光纤接口收到的信号转换为包的数据格式;解包器用来分析收到的包,通过双路多发器分成控制包和数据包,前者将会发送给外设管理模块,后者将会发送给数据传输模块;数据传输模块用来将用户请求发送的数据进行分片,添加包头发送给打包器,以及将收到的数据包传输给用户。

[0049] 本发明的一个应用实例是基于FPGA的可重构无线局域网(遵循802.11协议)软件无线电开发平台,通过本实例对本发明的具体实施方式进行了描述,以便本领域的技术人员更好地理解本发明。

[0050] 本实例选择使用FPGA(FPGA开发板KC705)作为可重构无线局域网系统的开发平台,本发明提供的无线电光纤连接接口通信库的一端与无线局域网协议的可重构物理层(802.11协议规定的物理层)相连,另一端通过板上光纤接口模块连到了通用软件无线电外设USRP上。本发明的通信库在本实例中实现方法如下:

[0051] A.通信库的外部接口设计

[0052] 本实例中,FPGA用户逻辑是可重构无线局域网物理层,无线射频前端是USRP,通信库的一端通过FPGA编程接口与无线局域网协议的可重构物理层相连,另一端通过一个板上的光纤模块与光纤相连,再连到USRP上,见图5。

[0053] A1.设计FPGA编程接口,该编程接口包括两组接口信号,分别是用于数据传输的数据收发接口和用于射频参数配置的参数配置接口。

[0054] A2.设计与通用无线电前端相连的光纤接口,通过该光纤接口与板上的光纤模块相连接,遵循了万兆以太网协议标准。

[0055] B.通信库的内部模块设计

[0056] 本实例中,内部模块将会被更细致地呈现,见图6所示,包括外设管理模块、打包器和数据传输模块。

[0057] B1.外设管理模块在图6中对应的是五种设备管理包生成器和一个多路选择器,五种设备管理包生成器包括设备初始化包、中心频率配置包、采样率配置包、发送增益配置包和接受增益配置包。外设管理的状态机见图7,当硬件复位后,通信库自动完成对USRP的初始化配置,配置完成之后可以进行数据的正常收发。当开发者希望动态配置参数时,修改一个32位参数寄存器的值即可,通信库会自动检测并完成配置。当开发者不再希望接收到数据时,将STOP停止信号置为一周期的有效,通信库会通知USRP停止接收。

[0058] B2.打包器遵循UDP协议和IP协议,把前面外设管理模块组好的配置包和数据包加上包头标识信息,如图6中对应的添加UDP头部(包括包长度、端口号和校验和)、添加IP头部(包括长度、校验和和IP地址)、添加MAC地址、CRC32校验等。

[0059] B3.数据传输模块,包括图6中的发送和接收,其中,发送端使用了自定义的BURST信号进行握手,见图8,当可重构物理层准备好要发送的数据时,就把无线电IQ两路数据放入通信库提供的一个32位宽的发送FIFO中,但此时并没有真正发出去。可重构物理层将BURST_START信号置为有效时,同时把该帧长度放入BURST_LENGTH向量中,通信库会读取长度,开始分片,发送。当通信库从通用软件无线电前端接收到数据时,会放入32位宽的接收FIFO中,物理层即可从接收FIFO中读取数据。

[0060] 本实例实现本发明的通信库的方法中,包括下列关键的实现方法:

[0061] C1.数据传输模块采用高速率低延迟传输方法,无线局域网802.11系列的协议中,

目前使用最广泛的是802.11n协议,所需满足的与射频前端之间最大传输带宽是1.28Gbps(40MHz带宽,IQ两路各16位采样),本实例的最高传输速率是3.2Gbps,可以满足需求,并有足够的剩余带宽。其中,高速率的实现方法是三级流水线方法和高效的数据处理方法,三级流水线方法具体包括在发送端分别从物理层取数据并转换数据格式、添加UDP包头和IP包头、添加MAC包头,高效数据处理指的是每级流水线只用一个周期完成数据处理的步骤。针对低延迟,802.11协议中数据链路层规定的回复确认包的延迟不得超过16微秒,本实例通过减小以太网单包报文分片长度至100个复数、优化校验位计算方式边发送边计算、减少数据通路长度等途径,将通信库的延迟降低到2.528微秒,其中包括发送数据延迟2.408微秒,接收数据延迟0.12微秒,为物理层其他部分留了足够的延迟余量。经测试,该系统可以与商用无线接入点相连接完成通信,充分证明延迟满足802.11协议中的规定。

[0062] C2. 外设管理的参数配置模块中设计动态配置射频参数接口,无线局域网工作在多个不同的频段,且在运行过程中有动态修改频段的需求。本实例中提供了易用的动态配置射频参数的接口,无线局域网物理层开发者修改一个32位参数寄存器的值,通信库就可以自动检测到参数发生变化,进而对USRP进行配置。如果当前802.11数据链路帧没有被发完时参数发生变化,通信库会记录本次变化,待发送结束后完成动态配置。

[0063] C3. 数据传输模块采用基于速率的流量控制方法,为了支持无线局域网在不同采样率下,仍能以均匀的速率与USRP相连,本实例采用了基于速率的流量控制,使用计时器阻断数据的传输过程,提供了多达8个档位的流量级别,对应的AD/DA采样率分别是25MSps、20MSps、12.5MSps、6.25MSps、3.125MSps、1MSps、500kSps、300kSps。

[0064] C4. 数据传输模块和参数配置模块支持用户自定义时钟域的方法,在本实例中,为了提高无线局域网物理层计算速率,用户自定义时钟域将发送端和接收端设为不同的时钟,且都与通信库的时钟不同。通信库利用异步FIFO加握手信号控制方法,针对与802.11物理层的接口信号做了异步时钟域转换的特殊处理,见图9。

[0065] 需要注意的是,公布实施例的目的在于帮助进一步理解本发明,但是本领域的技术人员可以理解:在不脱离本发明及所附权利要求的精神和范围内,各种替换和修改都是可能的。因此,本发明不应局限于实施例所公开的内容,本发明要求保护的范围以权利要求书界定的范围为准。

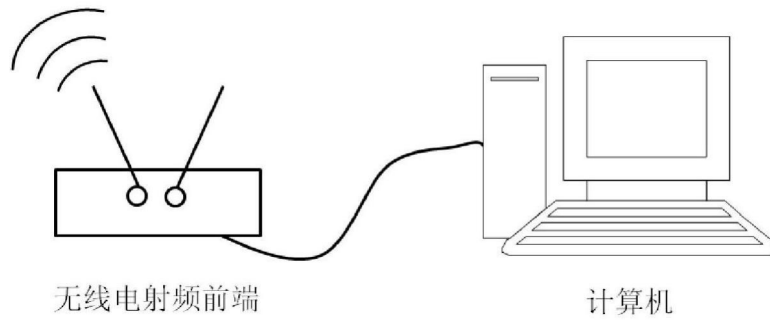


图1

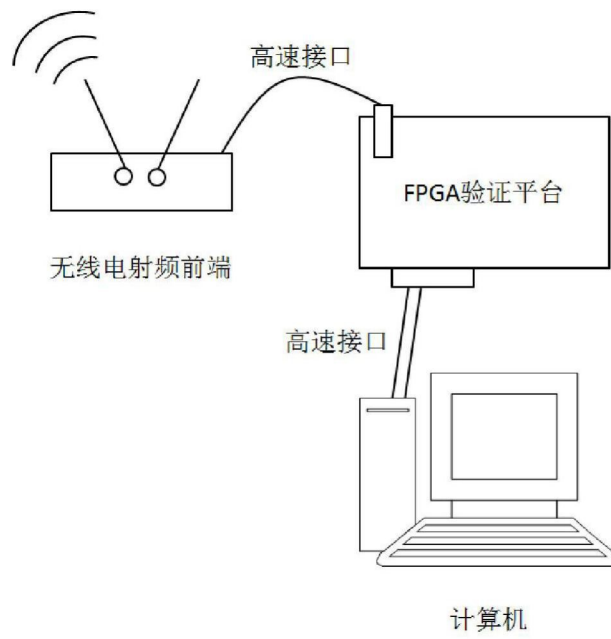


图2

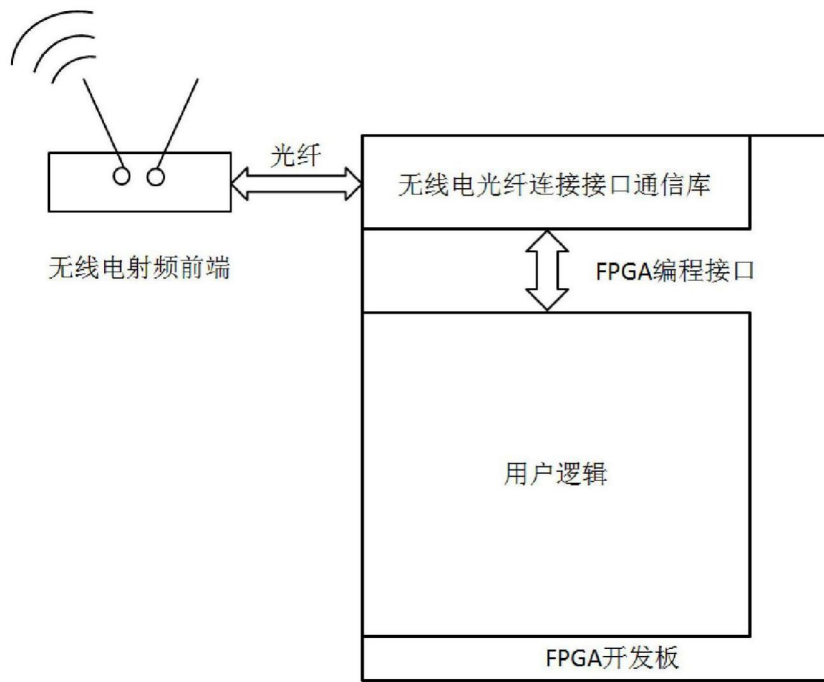


图3

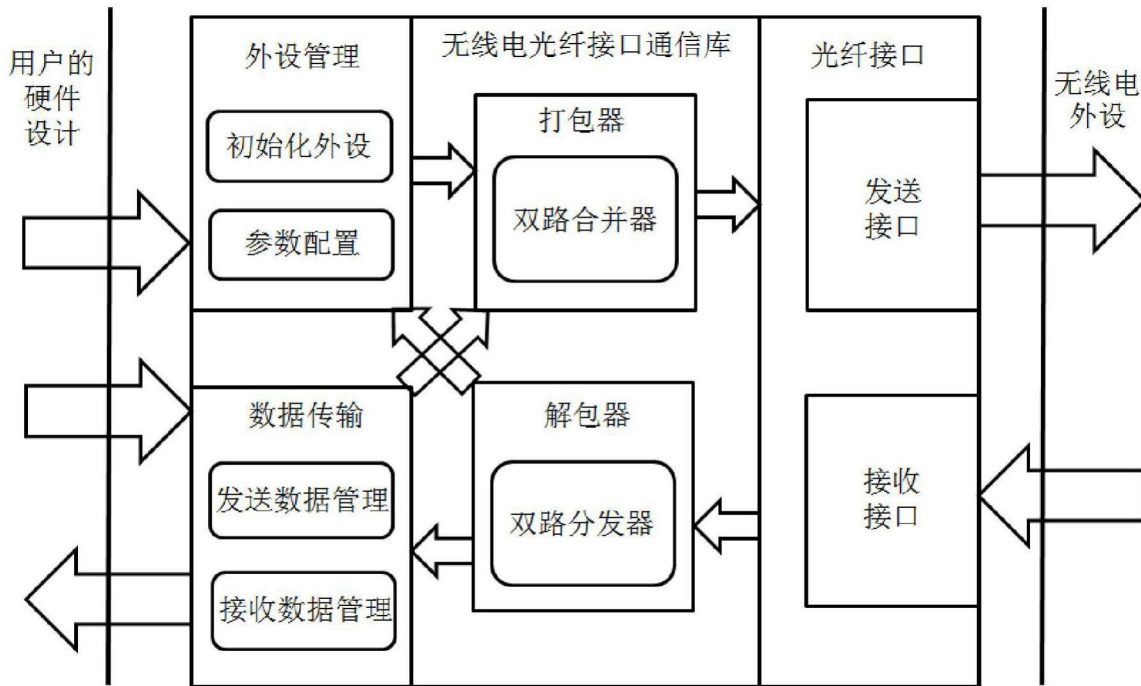


图4

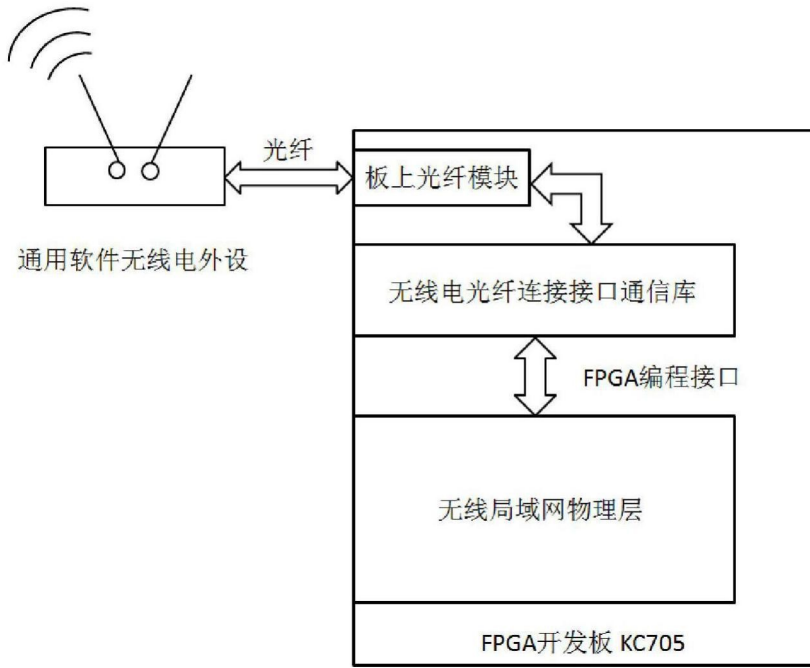


图5

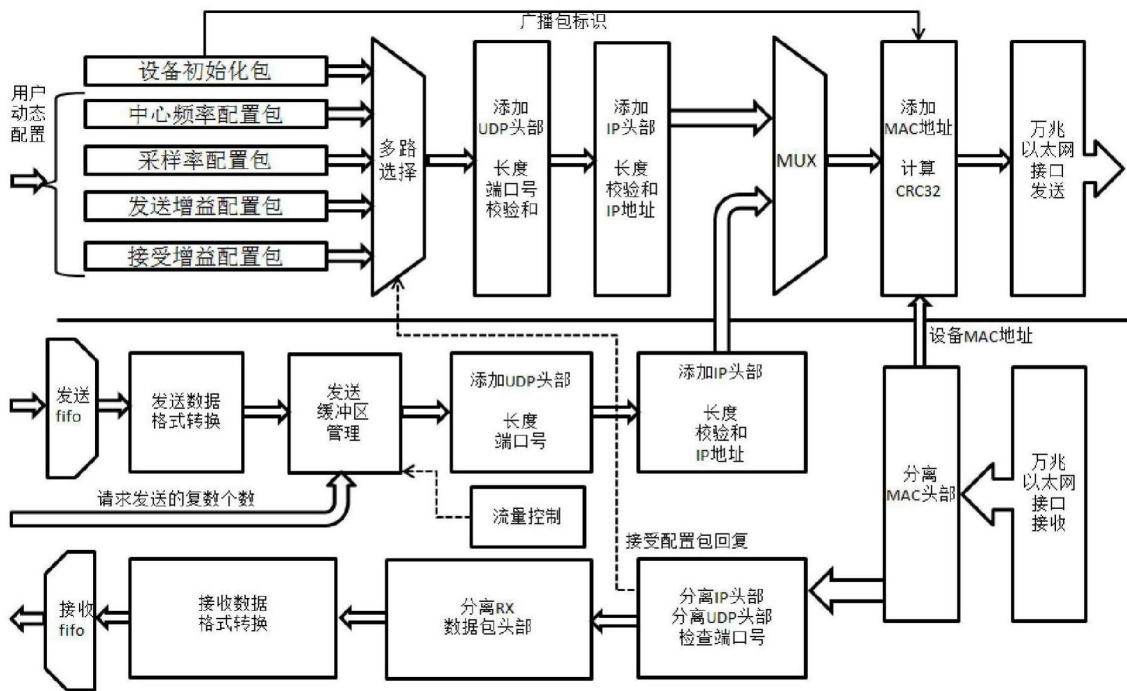


图6

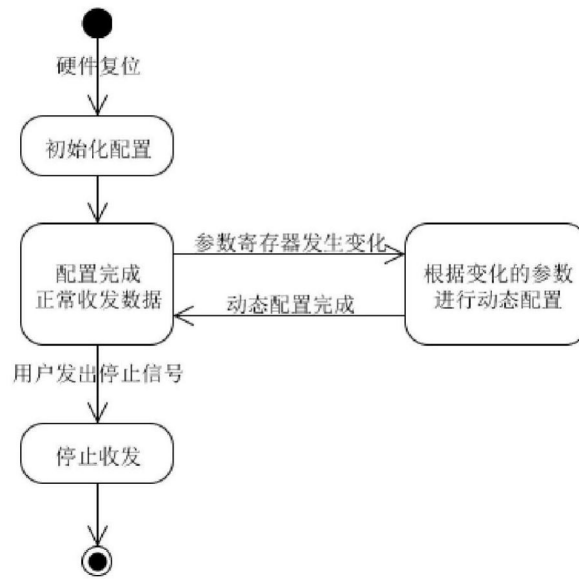


图7

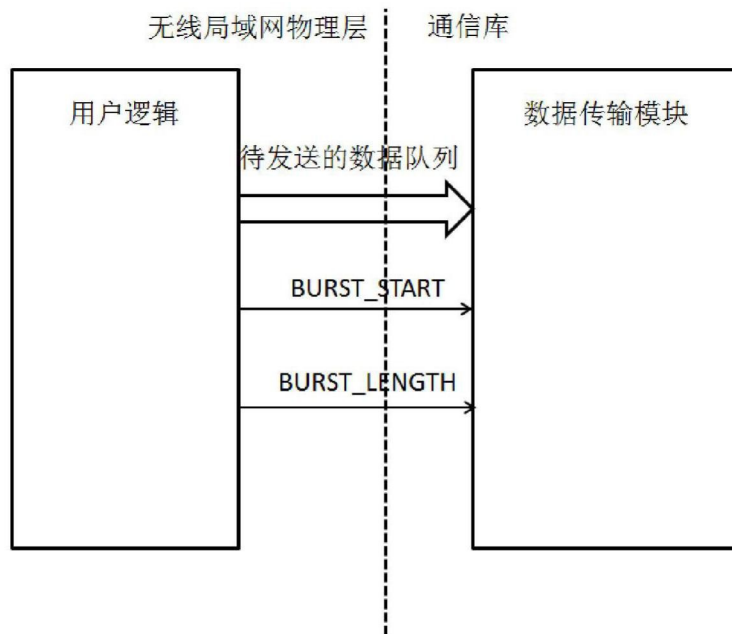


图8

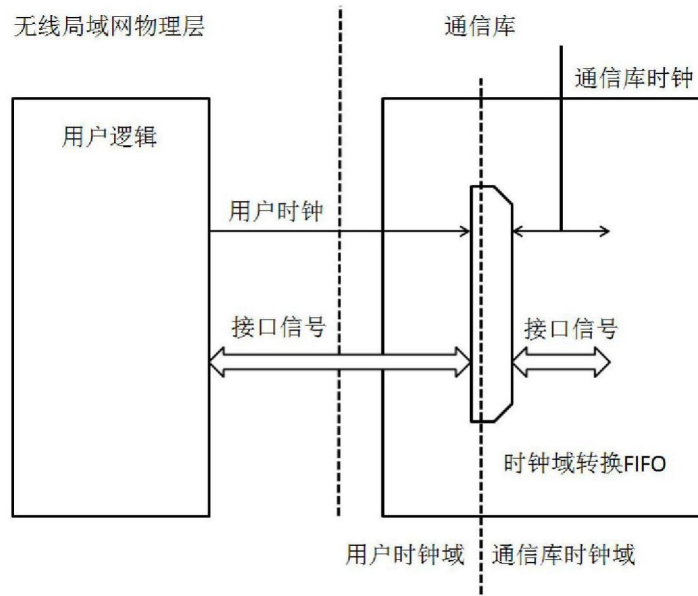


图9