

文章编号: 2095-4980(2023)01-0072-05

邻居发现协议在基于 FPGA 的 IPv6 over AOS 网关上的实现

张庆顺^{1,2}, 董晓臣², 张锁良^{*1,2}

(1.河北省机器视觉工程技术中心, 河北 保定 071002; 2.河北大学 电子信息工程系, 河北 保定 071002)

摘 要: 针对 IPv6 协议接入空间通信网络的需求, 重点讨论了邻居发现协议(NDP)在基于现场可编程门阵列(FPGA)的 IPv6 over CCSDS-AOS 网关上的实现。在 IPv6 over CCSDS-AOS 网关系统上搭建 NDP 协议模块, 实现网关地址解析; 通过状态机控制实现 NDP 协议模块功能。实验表明, 该设计解决了 IPv6 over CCSDS-AOS 网关主动和被动地址解析以及邻居缓存表查找和管理问题, 不需要网关对 NDP 进行协议转换和转发。目前已在 IPv6 over CCSDS-AOS 网关中应用。

关键词: 邻居发现协议; IPv6 协议; CCSDS-AOS 标准; 地址解析; 网关; 现场可编程门阵列

中图分类号: TN914.42

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020453

Implementation of NDP on FPGA-based IPv6 over AOS gateway

ZHANG Qingshun^{1,2}, DONG Xiaochen², ZHANG Suoliang^{*1,2}

(1.Hebei Machine Vision Engineering Technology Center, Baoding Hebei 071002, China;

2.Department of Electronic and Information Engineering, Hebei University, Baoding Hebei 071002, China)

Abstract: In response to the need for IPv6 protocol access to the spatial communication network, the implementation of the Neighbor Discovery Protocol(NDP) on the FPGA-based IPv6 over CCSDS-AOS gateway is discussed. It is proposed to build the NDP protocol module on the IPv6 over CCSDS-AOS gateway system to realize the gateway address resolution. The function of NDP protocol module is realized through state machine control. Experiments show that the design solves the problems of IPv6 over CCSDS-AOS gateway's active and passive address resolution, neighbor cache table lookup and management without requiring the gateway to perform protocol conversion and forwarding on the NDP protocol. It has been applied in IPv6 over CCSDS-AOS gateways.

Keywords: Neighbor Discovery Protocol; IPv6 protocol; CCSDS-AOS; address resolution; gateway; Field Programmable Gate Array(FPGA)

Internet 技术的进步引领了信息时代的发展, IPv6 协议由 IETF 设计, 用于替代现行的 IPv4 协议。随着空间网络技术的发展, 卫星内部设备之间的信息互通不再是点对点的通信, 而是网络的拓扑以及路由协议^[1]。IPv6 协议的应用可以实现将任何通信设备编上一个特有网址, 为空间组网增加许多优势。CCSDS-AOS 是 IP over CCSDS Space Links 中提出的一种高级在轨系统(Advanced Orbit System, AOS), AOS 协议适用于航天器之间以及航天器与地面之间的通信^[2-3]。AOS 协议可以实现高速率通信, 处理多种数据类型以及大容量信息数据, 实现高速的上行和下行链路。

建立空天网络一体化体系是目前航天通信的发展趋势。早在 2000 年, 美国航空航天局已经开始搭建空间通信网络; 2007 年, 国际空间数据系统咨询委员会发布 IP over CCSDS Space Links 红皮书^[3], 为之后的空间通信网络建设制定了标准, 并应用在航空航天发展中。目前我国的空间网络、深空探测以及空间站建设和发展对航天通信提出了新的技术要求, 尤其是网络传输协议向 IPv6 协议转变。IPv6 over CCSDS-AOS 网关可以解决 IPv6 协议与 CCSDS-AOS 协议的相互转换问题, 为 IPv6 协议加入空天网络一体化体系提供了设备支持^[4]。

IPv6 over CCSDS-AOS 网关系统接入 IPv6 网络是通过邻居发现协议(NDP)的链路层地址解析功能实现的, 因此设计的重点是 NDP 协议。本文基于此背景, 提出了基于 FPGA 的 IPv6 over CCSDS-AOS 网关功能模块的搭建方案, 并针对 NDP 在网关上的实现方案做了设计验证。

收稿日期: 2020-05-09; 修回日期: 2020-07-06

*通信作者: 张锁良 email:zhangsl@hbu.cn

1 NDP 协议简述

NDP 替代了 IPv4 协议中的地址解析协议(Address Resolution Protocol,ARP), 是 IPv6 协议实现地址解析的特定协议类型。NDP 协议解决了连接在同一条链路上的各设备节点与 IPv6 over CCSDS-AOS 网关的互操作问题, 并可以实现邻居可达检测、重复地址检测、路由发现、重定向等功能。

NDP 由 5 种报文: 路由请求报文、路由公告报文、邻居请求报文、邻居宣告报文和重定向报文交互实现。这 5 种报文属于 ICMPv6 报文, 故其发送和接收与其他的 ICMPv6 报文一样, 通过 IPv6 报文封装机制进行。ICMPv6 报文的封装如图 1 所示。

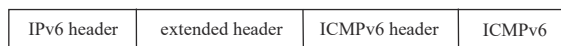


图1 封装在IPv6数据报中的ICMPv6报文

2 NDP 协议在网关上的实现

2.1 系统设计实现方案

为使网关可以正确地接收来自千兆以太网上的 IPv6 数据包和转发 IPv6 数据包到千兆以太网对应节点上，需要实现 NDP 协议中的地址解析功能。地址解析可以使系统通过 IPv6 地址获取对应的链路层 MAC 地址。这类类似于 IPv4 使用的 ARP 协议。由于系统在基于 FPGA 的 IPv6 over CCSDS-AOS 网关上实现，网关直接通过空间链路转发地址解析数据包可能会导致接收方无法正确接收到链路层地址，降低地址解析效率。为解决这一问题，需要在网关系统上搭建 NDP 协议功能模块实现网关的主动和被动地址解析功能。

```

graph TD
    RS232[RS232 configure interface] --> CM[configuration and management]
    CM --> HSLT[high-speed lookup table]
    IN[IPv6+ICMPv6+NDP] <--> HSLT
  
```

IPv6 over CCSDS-AOS 网关功能模块框图如图 2 所示。其中可通过 RS232 串口对 IPv6 over CCSDS-AOS 网关进行配置, 包括其高速查找表的配置。高速查找表是 IP 地址与 MAC 地址以及源端口和目的端口等映射关系, 可通过配置接口来改变优先级。由图可知, NDP 协议是 IPv6 over CCSDS-AOS 网关实现数据包转发的重要模块。IPv6+ICMPv6+NDP 模块可以实现 IPv6 数据报的接收和发送、ICMPv6 协议的处理以及 NDP 报文的定义和发送。NDP 协议模块主要负责处理来自 ICMPv6 协议的邻居请求报文、邻居宣告报文以及对邻居缓存表的管理和邻居查找。NDP 协议模块可以将接收到的报文通过地址校验后根据报文类型进行处理。NDP 协议模块根据协议定义了相关报文格式, 可以根据相关发送请求发送相应的报文类型。

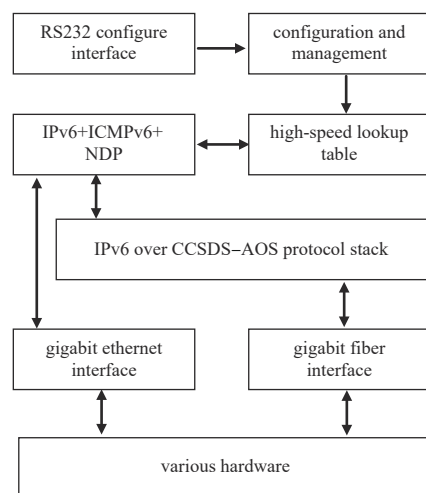


Fig.2 Block diagram of Pv6 over CCSDS-AOS gateway functional module
图2 IPv6 over CCSDS-AOS 网关功能模块框图

IPv6 over CCSDS-AOS 网关接收到来自 IPv6 网络的邻居请求报文时, NDP 模块进行目的 IP 地址校验, 若目的 IP 地址为本地 IP 地址, 则将报文中携带的地址信息更新到邻居缓存表, 并发送邻居宣告报文用于回应请求, 被动地址解析完成, 此时网关可以正确接收来自对应节点的 IPv6 数据包; 若不是本地 IP 地址, 则抛弃数据包。当 IPv6 over CCSDS-AOS 的空地网络协议栈模块有 IPv6 数据包需要发送时, 通过邻居查找, 若没有相邻节点的 MAC 地址, 此时需要启动网关的主动地址解析功能, 通过 NDP 模块发送地址解析请求来获得对应节点的 MAC 地址, 在获得相邻节点的 MAC 地址后再将 IPv6 数据包通过千兆以太网发送出去^[5-6]。

在网管每次发送 IPv6 数据包时都将进行地址查询，通过邻居缓存表中缓存的 IP 地址和 MAC 地址的映射关系，查找是否还有与即将发送的 IPv6 数据包中目的 IPv6 地址对应的 MAC 地址。

NDP 模块的数据流程关系如图 3 所示, 其中虚线框中为 NDP 协议的实现过程^[7]。当 IPv6_receive_buffer 接收到 NDP 协议报文时, 则将数据包发送给

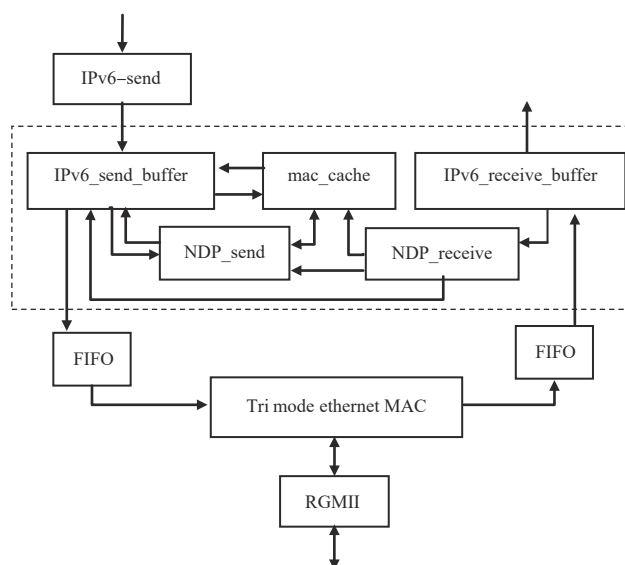


Fig.3 Function relationship of NDP module data flow
图3 NDP模块的数据流程关系

NDP_receive 处理。若为邻居请求报文，则通过 NDP_send 组装邻居宣告报文，同时更新邻居缓存表 mac_cache；若为邻居宣告报文，则缓存 IPv6 地址和 MAC 地址，同时发送 IPv6_send_buffer 中缓存的 IPv6 数据包。当来自上层协议栈的 IPv6 数据包需要发送时，通过邻居查找，没有发现相邻节点的 MAC 地址时，则启动主动地址解析，由 NDP_send 组装并发送邻居请求报文，在收到邻居宣告报文后缓存地址信息并发送等待发送的 IPv6 数据包。

2.2 NDP 协议设计实现

2.2.1 NDP 协议发送模块

NDP 协议数据的发送是以 ICMPv6 数据包形式携带于 IPv6 数据包中发送的，因此 NDP_send 模块是在 MAC 模块以及 IPv6 模块之后发送，作用是建立邻居请求报文和邻居宣告报文以及查找邻居缓存表。邻居缓存表的数据由 NDP 协议数据接收部分控制。NDP_send 发送模块的发送请求可以来自 IPv6_send 模块和 NDP_receive 模块，可以通过模式选择模块对其进行控制。

1) 若 NDP_receive 模块接收到邻居请求报文时，NDP_receive 模块将发送地址解析回复请求给 NDP_send 模块，请求发送邻居宣告报文。目的 IPv6 地址在 IPv6_receive_buffer 模块获得，对应的 MAC 地址在邻居缓存表中查找获得。邻居宣告报文缓存完成后，NDP_send 模块向 IPv6_send_buffer 模块发送数据准备好通知，等待 IPv6_send_buffer 发送数据请求信号后发送邻居宣告报文。等待该报文发送完成后，通知 NDP_receive 模块邻居宣告报文已经发出。

2) 若 IPv6_send_buffer 模块发送 IPv6 数据包时，首先进行地址查询，若邻居缓存表中没有目的 IPv6 地址或不存在对应的 MAC 地址时，NDP_send 模块将生成邻居请求报文，并向 IPv6_send_buffer 模块发送数据准备好通知，等待 IPv6_send_buffer 发送数据请求信号后发送邻居请求报文。状态转移图如图 4 所示。

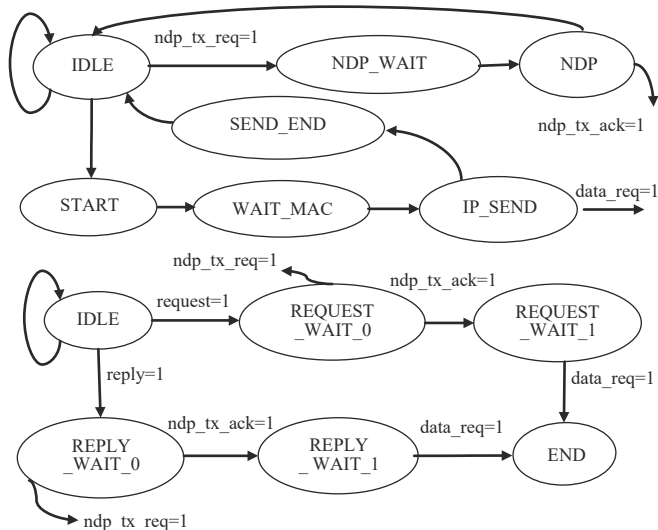


Fig.4 State transition diagram of NDP sending process

图4 NDP发送过程状态转移图

图中，request 为邻居请求的请求信号，reply 为邻居宣告的请求信号，当 NDP 发送状态机接收到发送请求信号后进入等待上层 IPv6 协议应答状态，同时发送 NDP 发送请求 ndp_tx_req 信号给 IPv6 协议层状态机，IPv6 协议层状态机向 NDP 发送状态机发送应答信号，使 NDP 发送状态机进入发送数据等待状态，当 IPv6 协议层状态机发送 MAC 头以及 IPv6 头数据后，向 NDP 发送状态机发送 NDP 数据请求信号，NDP 发送状态机接收到数据请求信号后发送邻居请求报文数据或邻居宣告报文数据。

2.2.2 NDP 协议接收模块

NDP_receive 模块负责接收邻居请求报文和邻居宣告报文，同时更新邻居缓存表中的地址对信息。若有新的地址对信息需要添加时，邻居缓存表将删除最后一个地址对。系统可通过增加缓存数量来增加邻居缓存表中存储地址对的数量。状态转移图如图 5 所示。

图中，当 NDP 接收状态机接收到 NDP 数据信号时，进入接收数据状态，判断接收到的是邻居请求报文还是邻居宣告报文。若为邻居请求报文，则校验 IPv6 地址是否为本地 IPv6 地址，若是，则发送邻居宣告报文，请求 reply 信号；若为邻居宣告报文，则校验 IPv6 地址以及 MAC 地址是否为本地地址，若是，则发送 NDP 接收邻居宣告报文正确信号，并将报文中的源 IPv6 地址和源 MAC 地址存入邻居缓存表中。

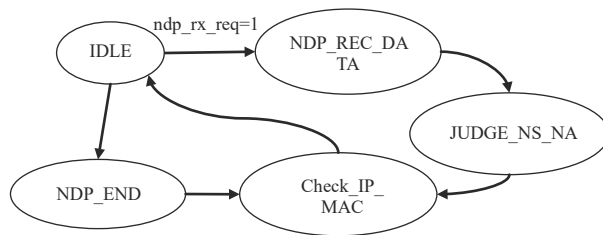


Fig.5 State transition diagram of NDP receiving process

图5 NDP接收过程状态转移图

3 测试与分析

通过搭建测试环境完成该设计的功能测试^[4-5]，如图 6 所示。开发环境是拥有千兆以太网口的 Xilinx ARTIX-7 FPGA 硬件平台和 Vivado 2017.4 软件平台。测试环境是一台 PC 台式机通过千兆以太网与 FPGA 评估板直接相连。在 PC 机上预装 Wireshark 以太网抓包软件，可以抓取 PC 机以太网口发送以及接收的数据包。使用 AnySend 发包工具可以向评估板发送地址解析请求数据包。受测的评估板 IP 地址为 2001:2001:2001:2001:2001::157，MAC 地址为 00:0a:

35:01:fe:c0。PC 机的 IP 地址为 2001:2001:2001:2001:2001::158，MAC 地址为 8c:16:45:0a:1a:b1。

修改并调试评估板 FPGA 内核代码，将其设置为发送由 IPv6 over CCSDS-AOS 协议栈模块转换得到的 IPv6 数据包^[8-10]，目的 IP 地址为 2001:2001:2001:2001:2001::158，下层协议为 UDP 协议类型，携带 HELLO WORLD TEST IPv6 数据字段。系统启动后，网关首先向 PC 机发起主动地址解析，得到链路层 MAC 地址后发送 IPv6 数据包。使用 AnySend 发包工具向评估板发送地址解析请求，可以测试网关的被动地址解析功能。

图 7 为通过连通性测试，在 PC 机上使用 Wireshark 抓包工具捕获的报文交互情况^[11]。由抓包工具抓取的地址解析过程中报文交互情况分析，在主动地址解析过程中，评估板首先向 PC 机发送邻居请求报文，得到 PC 机的邻居宣告报文后，向 PC 机发送 IPv6 数据包，携带的数据字段均被 PC 机接收，如图 7(a)所示。在被动地址解析过程中，PC 机不断向评估板发送邻居请求报文，均得到了评估板及时回应，评估板发出的邻居宣告报文携带的 MAC 地址为 00:0a:35:01:fe:c0，如图 7(b)所示。

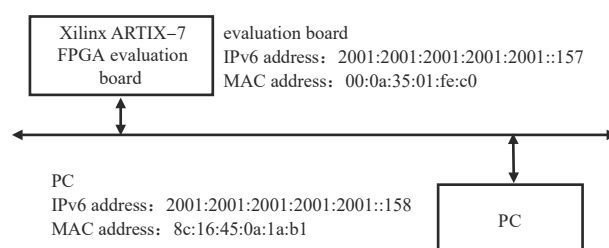


Fig.6 Diagram of test environment

图 6 测试环境图

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Info
1	0.000000	2001:2001:2001:2001:2001::157	ff02::1:ff00:158	ICMPv6	Neighbor solicitation
2	0.000169	2001:2001:2001:2001:2001::158	2001:2001:2001:2001:2001::157	ICMPv6	Neighbor advertisement
3	1.000576	2001:2001:2001:2001:2001::157	2001:2001:2001:2001:2001::158	UDP	Source port: http-alt

0000	8c 16 45 a0 1a b1 00 0a 35 01 fe c0 86 dd 60 00	..E....5....
0010	00 00 00 1c 11 ff 20 01 20 01 20 01 20 01	
0020	00 00 00 00 01 57 20 01 20 01 20 01 20 01	W....
0030	00 00 00 00 01 58 1f 90 1f 90 00 1c a5 59 48 45	X....YHE
0040	4c 4c 4f 20 57 4f 52 4c 44 20 54 45 53 54 49 50	LLO WORL D TESTIP
0050	56 36	V6

(a) active address resolution

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Info
44	30.841038	2001:2001:2001:2001:2001::158	ff02::1:ff00:157	ICMPv6	Neighbor solicitation
45	30.841126	2001:2001:2001:2001:2001::157	2001:2001:2001:2001:2001::158	ICMPv6	Neighbor advertisement
46	30.841359	2001:2001:2001:2001:2001::158	ff02::1:ff00:157	ICMPv6	Neighbor solicitation
47	30.841447	2001:2001:2001:2001:2001::157	2001:2001:2001:2001:2001::158	ICMPv6	Neighbor advertisement

Frame 45: 86 bytes on wire (688 bits), 86 bytes captured (688 bits)

Ethernet II, Src: Xilinx_01:fe:c0 (00:0a:35:01:fe:c0), Dst: IPv6mcast_ff:00:01:58 (33:33:ff:00:01:58)

Internet Protocol Version 6, Src: 2001:2001:2001:2001:2001::157 (2001:2001:2001:2001:2001::157), Dst: 2001:2001:2001:2001:2001::158 (2001:2001:2001:2001:2001::158)

0000	33 33 ff 00 01 58 00 0a 35 01 fe c0 86 dd 60 00	33...X..5....
0010	00 00 00 20 3a ff 20 01 20 01 20 01 20 01	...:..
0020	00 00 00 00 01 57 20 01 20 01 20 01 20 01	W....
0030	00 00 00 00 01 58 88 00 01 c1 00 00 00 00 20 01	X....
0040	20 01 20 01 20 01 20 01 00 00 00 00 01 57 01 01	W....
0050	00 0a 35 01 fe c0	

(b) passive address resolution

Fig.7 Message interaction of active and passive address resolution

图 7 主被动地址解析报文交互情况

通过测试得到表 1 中的结果。测试结果表明，系统实现了邻居发现协议在基于 FPGA 的 IPv6 over AOS 网关上的地址解析、邻居查找以及邻居缓存表项的管理等功能。

表 1 主被动地址解析测试结果

Table1 Test results of active and passive address resolution

PC neighbor table status	resolution address exists	resolution address does not exist
	update completed	update failed
number of neighbor requests sent by the evaluation board	≤2	2
whether the PC receives a NS	yes	no
number of NS sent by PC	100	0
number of NA sent by the evaluation board	100	0
whether the PC receives the NA	yes	no

在图 8 中可看出 FPGA 资源利用情况，LUT 使用了 19%；FF 使用了 11%；BRAM 使用了 16%，IO 使用了 35%，BUFG 使用了 16%。设计中 FPGA 的重要资源占用较少，为实现网关的其他功能提供了充足的 FPGA 资源。

端到端的卫星通信中存在高延时、空间信道带宽非对称性、高误码率、连接间断性等问题。在一些文献中地址解析是通过 ARP 数据包进行封装转发的方式实现的,这种方式并不符合 CCSDS 相关规范,另外由于卫星通信的高丢包率以及高延时,使得这种地址解析的方法可能会导致接收方无法正确接收到地址解析请求或应答,同时也会降低地址解析效率。本文提出在 IPv6 over CCSDS-AOS 网关系统上搭建 NDP 协议模块实现 IPv6 地址到链路层地址的映射,这样就无需对地址解析相关数据包进行空间链路的转发,可以避免因卫星通信性能的影响导致地址解析的失败,同时可以提高系统的地址解析效率。

4 结论

通过上述分析,该设计方法可以达到 IPv6 over CCSDS-AOS 网关接入 IPv6 网络的要求^[12]。利用顶层模块对各个子模块连接,以及使用模式选择的方式控制发送模块发送 NDP 协议数据包类型,解决了网关主被动地址解析问题。在运行过程中,高层协议数据在送入对应子模块时需要缓存在特定空间中,因此在设计中要对各个缓存空间进行控制,避免其相互之间发生冲突。该方案没有占用过多的 FPGA 资源,设计完全可行,目前运用于 IPv6 over CCSDS-AOS 网关系统中。

参考文献:

- [1] 杨晓剑. IP 协议与 CCSDS 协议的转换[D]. 南京:南京理工大学, 2006. (YANG Xiaojian. Conversion of IP protocol and CCSDS protocol[D]. Nanjing, China: Nanjing University of Science and Technology, 2006.)
- [2] CCSDS 702.1-r-3. IP over CCSDS Space Links[S]. 2008.
- [3] CCSDS 133.0-B-1. Space Packet Protocol[S]. 2003.
- [4] 安国臣, 王晓君, 刘毅夫, 等. 基于 FPGA 的万兆协议转换系统设计与实现[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020, 18(2): 202-205. (AN Guochen, WANG Xiaojun, LIU Yifu, et al. Design and implementation of 10 gigabit protocol conversion system based on FPGA[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020, 18(2): 202-205.)
- [5] 吴长瑞, 徐建青, 蒋景红, 等. 基于 FPGA 的千兆以太网接口应用研究与实现[J]. 现代电子技术, 2018, 41(9): 1-5. (WU Changrui, XU Jianqing, JIANG Jinghong, et al. Applied research of gigabit ethernet interface and its implementation based on FPGA[J]. Modern Electronics Technique, 2018, 41(9): 1-5.)
- [6] 熊光阳, 王野, 李志茹, 等. 基于 FPGA 的千兆 UDP/IP 协议栈的实现及其在高速图像传输中的应用[J]. 仪器仪表用户, 2020, 27(3): 38-41. (XIONG Guangyang, WANG Ye, LI Zhiru, et al. FPGA implementation of gigabit UDP/IP protocol stack and its application in image transmission[J]. Instrumentation Customers, 2020, 27(3): 38-41.)
- [7] 胡艳, 司彬彬, 兰巨龙, 等. 邻居发现协议在高性能 IPv6 路由器上的实现[J]. 计算机工程, 2005, 31(14): 48-50. (HU Yan, SI Binbin, LAN Julong, et al. Implementation of ND protocol in high-performance routers[J]. Computer Engineering, 2005, 31(14): 48-50.)
- [8] 张亚生, 彭华, 谷聚娟, 等. IP over CCSDS 网关 TCP 增强关键技术研究[J]. 载人航天, 2012, 18(4): 85-89, 96. (ZHANG Yasheng, PENG Hua, GU Jujuan, et al. Research on TCP performance improvement of IP over CCSDS space links gateway[J]. Manned Spaceflight, 2012, 18(4): 85-89, 96.)
- [9] 魏凌. CCSDS AOS 建议的研究[J]. 无线电通信技术, 2004, 40(5): 34-36. (WEI Ling. Research on CCSDS AOS recommendations[J]. Radio Communications Technology, 2004, 40(5): 34-36.)
- [10] 李少宾, 张亚生, 宋春晓. IP over CCSDS 协议转换技术研究[J]. 载人航天, 2012, 18(6): 13-19. (LI Shaobin, ZHANG Yasheng, SONG Chunxiao. Research on protocol conversion of IP over CCSDS[J]. Manned Spaceflight, 2012, 18(6): 13-19.)
- [11] 尹虎, 刘伟, 李昌杰, 等. 基于 FPGA 的万兆光纤以太网高速传输系统设计[J]. 中国新通信, 2018, 20(4): 91-92. (YIN Hu, LIU Wei, LI Changjie, et al. Design of high-speed transmission system of 10 gigabit fiber ethernet based on FPGA[J]. China New Communication, 2018, 20(4): 91-92.)
- [12] 赵国桦. 基于 IPv6 的医学影像在线诊断系统设计与实现[J]. 计算机应用与软件, 2019, 36(12): 12-18. (ZHAO Guohua. Design and implementation of an on-line medical image diagnosis system based on IPv6[J]. Computer Applications and Software, 2019, 36(12): 12-18.)

作者简介:

张庆顺(1979-), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向为高速数据通信。

董晓臣(1995-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为高速数据通信。

张锁良(1966-), 男, 硕士, 教授, 主要研究方向为高速数据通信。

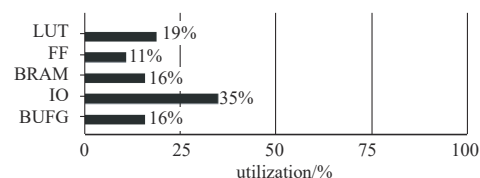


Fig.8 Analysis on FPGA resource utilization

图8 FPGA 资源利用分析