

UDP 协议在微小卫星通信上的分析与实现

于世洁 徐勇航 张 帆

(清华大学精密仪器与机械学系精密测试技术及仪器国家重点实验室 北京 100084)

摘 要 TCP/IP 协议在卫星通信中的应用受到越来越广泛关注。传输层 TCP 协议在星间链路中存在诸多问题,而 UDP 协议的简洁、快速、高效的特点,可以符合卫星通信的需求。该星载计算机采用 MPC8260 处理器,集成 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 嵌入式实时操作系统,选用 LwIP 协议族,通信链路层采用 Slip 串口协议,利用 Nrf 24E1 ZigBee 无线通信模块,搭建星间链路通信实验测试平台,实现传输层基于 UDP 协议的 OBC 与 PC 间的无线通信。实验结果证明,UDP 协议具有较低的首部开销比,是一种较好的可选的星间链路协议。

关键词 UDP 协议, $\mu\text{C}/\text{OS-II}$, ZigBee, 微小卫星, MPC8260, Slip 协议

中图法分类号 TP393

文献标识码 A

Analysise and Realization of Micro-satellite Communication Based on UDP Protocol

YU Shi-jie XU Yong-hang ZHANG Fan

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract In these years, scientists have been paying more and more role on the satellite communication based on the TCP/IP protocol. There are many problems in the inter-satellite links when using the TCP protocol as the transport layer, while the UDP protocol is much more simple, convenient and higher efficiency which can meet the demand of the satellite communication well. The processor on the on-board computer (OBC) is MPC8260, which integrates the $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ embedded real-time operating system. It chooses the LwIP protocol as the communicating protocol, and the Slip protocol as the link layer protocol, the Nrf 24E1 ZigBee as the wireless communicating tool. It sets up the inter-satellite link communication test platform, realizes the wireless communication between the OBC and PC based on the UDP protocol. The result shows that the UDP protocol can perform well and is an optional protocol in the inter-satellite link.

Keywords UDP protocol, $\mu\text{C}/\text{OS-II}$, ZigBee, Micro-satellite, MPC8260, Slip protocol

随着小卫星技术的不断发展,分布式空间系统逐渐成为各国空间机构研究的热点。文献[1]列出了美国和欧洲从 2000—2020 年的分布式空间系统任务,其实现形式主要包括星座、星群、编队飞行等。2007 年,美国国防高级研究计划局(DARPA)提出 F6 概念,其英文全称为“Future, Fast, Flexible, Fraction, Free-Flying Spacecraft united by information exchange”^[2]。作为一种新的分布式空间系统形式,其目标是构建一个快速、灵活、自由飞行的模块化航天系统,建立一种面向未来的、高效的航天体系结构。在分布式空间系统中,各模块之间以信息交互为纽带,以网络化的形式协同完成空间任务。一个高效稳定的网络化协议对于空间系统的有效工作起着重要的作用,主要体现在需要保证较快的传输速率、较低的误码率、较少的传输延时、较合理的带宽比,能提供较稳定的应用开发平台等。目前,空间网络协议已越来越受到国内外的重视,以美国 NASA、DARPA 为代表的著名空间机构对该领域进行了广泛的研究。

1 UDP 协议分析及 API 函数的应用

小卫星网络各模块之间需要有一条可靠的星间链路,但由于太空环境的实际特点,例如星与星之间进行的是无线连接,间隔较远,相互位置不固定,信息数据量不对称,受外界干扰较大等,因此,在选择网络协议时,要综合考虑这些因素。

TCP/IP 协议作为地面成熟且广泛使用的网络协议,其稳健性和可靠性已经得到无数实际应用的验证,并在 Internet 网络中占有绝对的统治地位。国际上有多组织都在研究如何将 TCP/IP 协议应用到卫星网络中,著名的有 CCSDS 组织(Consultative Committee for Space Data Systems、空间数据系统咨询委员会、全球性空间技术协商性机构^[3,4])和 OMNI 组织(Operating Mission as Nodes on the Internet),其由 NASA 哥达德航天中心设立^[5],并已取得一定的成果。卫星网络的典型特点,包括高信道误码率、长延时、信道不对称等,导致标准的 TCP(Transmission Control Protocol,传输控制协议)协

到稿日期:2012-03-12 返修日期:2012-06-12 本文受国家高技术研究发展计划(863 计划)(2012AA120603)资助。

于世洁(1976—),男,博士,副研究员,主要研究方向为微小卫星技术、微米纳米技术, E-mail: yu-sj@tsinghua. edu. cn; 徐勇航(1986—),男,硕士生,主要研究方向为微小卫星组网。

议在星上应用存在多种问题,无法充分发挥其性能^[6]。而 UDP(User Datagram Protocol,用户数据报协议)协议作为 TCP/IP 协议标准的传输层协议,其诸多特点却能较好地符合卫星通信,该协议尤其适用于请求-响应通信的过程,如消息控制等场合^[7]。

(1)实时性更高。无需建立连接的过程,没有握手协议,节省了由于连接造成的延时,传输速度更快。

(2)系统开支小。UDP 协议不需要进行连接状态的维护,也不需要为完成复杂通信而对相应的数据参数进行维护,因此可以节省更多的系统开支,尤其对资源有限的嵌入式系统显得尤为重要。

(3)与 TCP 传输控制协议相比,UDP 首部开销小(每个 TCP 报文段首部开销为 20B,而 UDP 报文段首部开销仅需 8B),尤其在大数据量传输的场合,可以大大提高传输效率。

(4)自带差错控制机制,即利用校验和检查数据的完整性来保证数据通讯的可靠性。

因此,UDP 协议在要求快速响应、小数据量传输等场合具有非常广泛的用途。在卫星通信中,各空间机构也投入了很大精力研究 UDP 协议在星间链路的通信情况。

考虑星上有限的资源空间,采用瑞典计算机学院提供的 LwIP(Light Weight Internet Protocol)协议作为星间通信的网络协议。LwIP 协议是剪裁版的 TCP/IP 协议,只需要几十 k 的 RAM 和 40k 左右 ROM 就可以有效运行,非常适合在嵌入式系统中使用。LwIP 协议之 UDP 流程如图 1 所示。

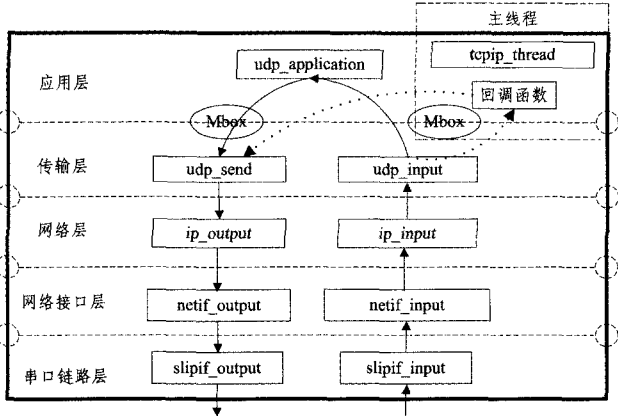


图 1 LwIP 协议之 UDP 通信流程图

LwIP 协议主要包括应用层、传输层、网络层、网络接口层和链路层,左边表示应用数据报经过 UDP 传输层和 IP 网络层打包,通过网络接口层发送给串口链路函数 slipif_output,右边表示串口数据经过 IP 网络层和 UDP 传输层解析发送给应用层。整个 tcp/ip 任务都在 tcpip_thread 主线程中运行,不同层之间的信息传递通过消息邮箱 Mbox 进行。

在 UDP 通信中,应用层调用 API 函数进行数据的收发任务。struct netconn * netconn_new (NETCONN_UDP),主要用于建立一个新连接的 UDP 数据结构;int netconn_bind (struct netconn * conn,struct ip_addr * addr,unsigned short port),绑定 UDP 连接的本地主机的 IP 地址和 UDP 端口号;int netconn_connect (struct netconn * conn,struct ip_addr * addr,unsigned short port),通过该函数设定 UDP 消息要送达的远程主机的 IP 网络地址 ip_addr 和端口号 port;int netconn_send(struct netconn * conn,struct netbuf * buf),UDP 连接发送函数,数据包含在参数 conn 指定的网络缓存 netbuf 中;

struct netbuf * netconn_recv (struct netconn * conn),接收 UDP 连接返回的数据,并存放在参数 conn 指定的缓存中。信息的发送与接收通过系统邮箱 mbox 来传递,如图 2、图 3 所示。

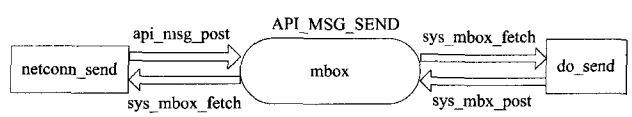


图 2 API 发送函数流程图

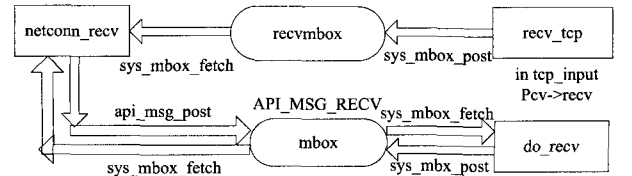


图 3 API 接收函数流程图

2 系统测试平台

星载计算机(On Board Computer,OBC)主要用于卫星的数据处理、星务管理、姿态控制以及有效载荷的控制,是地面与卫星通信的“桥梁”。星载计算机 OBC 如图 4 所示,处理器选用 PowerPC 体系的 MPC8260,能实现 250MIPS 的高处理性能以及对 HDLC、UART、RS-422、CAN 等多种通用总线协议的支持。程序移植时,代码镜像需小于 512kB,内存占用不得多于 1MB。

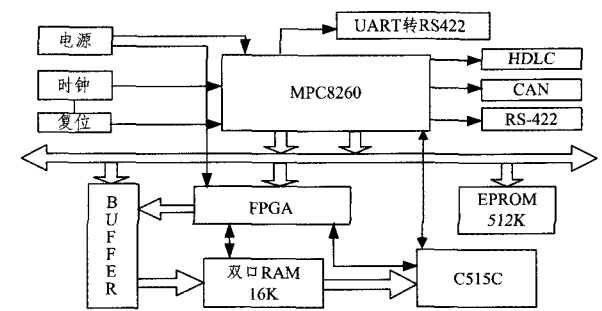


图 4 星载计算机 OBC

OBC 采用 $\mu C/OS-II$ 嵌入式实时多任务操作系统。2002 年 7 月, $\mu C/OS-II$ 得到了美国联邦航空管理局的标准认证,证实该操作系统在空间环境具有较高的可靠性和稳定性。该系统具有以下几个优点:源代码公开、代码结构清晰、可移植性好、可方便裁减、最多可开启 64 个任务。 $\mu C/OS-II$ 采用基于优先级的占先式实时内核,包含实时内核、时间管理、任务管理、任务间的同步(信号量、邮箱、消息队列)和内存管理等功能^[8]。

ZigBee 是基于 IEEE802.15.4 标准的低功耗网络协议,该协议支持的是一种短距离、低功耗的无线通信技术^[9,10]。本平台选用 Nrf 24E1 型号作为无线通信模块,来模拟实现星间链路。该模块支持点对点串口通信。

小卫星组网通信测试平台如图 5 所示。

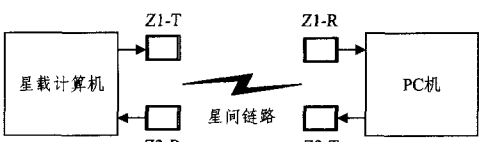


图 5 小卫星组网通信测试平台

图5中,用PC机模拟小卫星,实现与星载计算机的基于UDP协议的无线链路通信。Z1,Z2表示ZigBee模块,T,R分别表示发送和接收,Z1-T与Z1-R通信,Z2-T与Z2-R通信,以此实现小卫星网络星间通信。

3 LwIP在 μ C/OS-II上的移植

在 μ C/OS-II操作系统中,LwIP所有协议栈都通过tcpip_thread进程进行通信,该进程以一个系统任务的形式存在。应用层程序既可以驻留在tcp/ip进程中,也可以以单独的进程形式出现。如果是前者,则应用程序利用内部回调函数接口Raw API与tcp/ip协议栈通讯;如果是后者,则可以通过 μ C/OS-II操作系统的邮箱(Mbox)、消息队列(Message Queue)、信号量(Semaphone)等与tcp/ip进程进行通信。

3.1 主任务初始化

创建LwIP任务优先级为4,待OBC上电启动,驱动初始化后,即运行LwIP任务。

OSTaskCreate(lwip_init_task, (void *) 0, &Task6 [TASK_STK_SIZE-1], 4)

在lwip_init_task(void * pParam)中,完成动态内存初始化和网络接口链表初始化,创建进程信号量。同时创建主线程tcpip_thread任务,优先级设为5。分别设定PC机的IP地址为192.168.0.1,OBC的IP地址为192.160.0.2。通过netif_add函数添加UDP任务支持。在初始化过程中,sys_int必须在tcpip_thread创建前被调用。

3.2 操作系统封装层移植

在LwIP协议栈中,操作系统封装层主要为操作系统服务(包括进程同步、定时、消息传递等),利用协议栈中的对外接口与 μ C/OS-II操作系统融合。主要实现函数有:

```
void sys_init(void)
//系统初始化
sys_thread_t sys_thread_new(void (* function)(void * arg), void * arg, int prio)
//创建一个新进程
sys_mbox_t sys_mbox_new(void)
//创建一个邮箱
void sys_mbox_free(sys_mbox_t mbox)
//释放并删除一个邮箱
void sys_mbox_post(sys_mbox_t mbox, void * data)
//发送一个消息到邮箱
void sys_mbox_fetch(sys_mbox_t mbox, void * * msg)
//等待邮箱中的消息
sys_sem_t sys_sem_new(u8_t count)
//创建一个信号量
void sys_sem_free(sys_sem_t sem)
//释放并删除一个信号量
void sys_sem_signal(sys_sem_t sem)
//发送一个信号量
void sys_sem_wait(sys_sem_t sem)
//等待一个信号量
void sys_timeout(u32_t msecs, sys_timeout_handler h, void * arg)
//设置一个超时事件
void sys_untimeout(sys_timeout_handler h, void * arg)
//删除一个超时事件
```

在移植过程中,需要将以上函数进行结构体封装,并初始化,使之与 μ C/OS-II操作系统相结合。使用OSQ进行消息

队列的管理,使用 μ C/OS-II操作系统中的内存管理模块对消息进行创建、使用、删除和回收等。在LwIP中,每个任务模块均需进行时间管理,一系列的定时事件组成一个单向链表,每个链表的起始指针存于lwip_timeouts的对应表项中。移植时需要实现struct sys_timeouts * sys_arch_timeouts (void)函数,该函数返回值为目前正处于运行态的线程所对应的timeout队列指针。

3.3 网络接口层Slip协议移植

本平台星间链路采用RS-422串口通信,因此链路层协议选择Slip协议。Slip协议作为一种广泛使用的协议,主要用于支持TCP/IP网络控制协议,封装简单,运行可靠^[7]。在发送时,到达链路层的已经是从应用层经过传输层和网络层封装好的数据包,然后报文通过netif->output(struct netif * netif, struct pbuf * p, struct ip_addr * ipaddr)指针指向链路层发送函数slipif_output(struct netif * netif, struct pbuf * p, struct ip_addr * ipaddr),并传递给串口函数scc3_serial_putc(a)输出给ZigBee内存;在接收方面,scc3_serial_getc(a)接收来自ZigBee内存的串口数据,经过Slip链路层数据封装后,通过slipif_input(struct netif * netif)函数指向netif->output指针,并最终传递给ip_input(struct pbuf * p, struct netif * inp)函数到达网络层以上继续处理。

4 实验结果及结论

经测试,当OBC主动发起与PC机的连接请求并发送255字节的有效数据时,PC端接收到287个字节,其中32个字节为各层传输协议所增加的报头和报尾。经过PC机解码,能有效提取出255个有效数据,表明基于UDP的通信连接已经建立。

C0 00 45 80 00 00 00 00 40 11 FF FA 19 01 00 A8 DB DC 01 00 A8 DB DC 00 10 58 1B 6C 00 36 1E 00 01 02 03 04 05 ... FD FE FF C0

其中,01 00 A8 DB DC表示服务器地址192.160.0.2,01 00 A8 DB DC表示客户端地址192.160.0.1。首字节和末字节均为Slip协议规定的C0字节。

当PC机主动发起与OBC连接请求并发送255字节有效数据时,OBC端应用层能准确接收287个字节数据,并提取有效数据。

数据帧中首部开销内容包括IP首部、UDP首部和SLIP标识。定义数据帧总长度为S,有效数据长度为E,首部开销为K,数据有效传输率为P,首部开销率为Q,5者之间的关系如下:

$$S = E + K \quad (1)$$

$$P = E/S \quad (2)$$

$$Q = K/S \quad (3)$$

在千字节数据传输下,LwIP-UDP占用首部开销比仅为3.1%。同时,NASA开展的OMNI项目致力于TCP/IP协议在空间应用的研究,该项目重点研究了UDP/IP协议在星间通信的情况,对UDP协议的应用进行了积极的探索,在底层链路采用HDLC的情况下,UDP/IP协议的首部开销远小于TCP/IP协议的开销。以传送1000字节的数据包为例,UDP/IP/HDLC的开销约为3.6%,而TCP/IP/HDLC的首部开销为4.9%。LwIP数据传输首部开销与OMNI项目首

部开销的比对如图 6 所示,由图中可以看出,LwIP-UDP 首部开销要小于 OMNI-UDP 首部开销,UDP 首部开销要小于 TCP 首部开销。

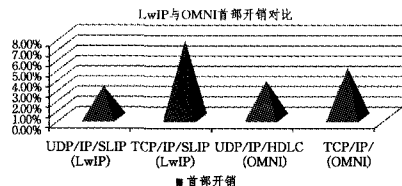


图 6 LwIP 与 OMNI 首部开销对比

与 OMNI 项目相比,LwIP-UDP 协议在与微小卫星系统的通信中进行数据传输时具有更小的首部开销比,可以显著提高在通信过程中的有效数据传输效率。

本文通过模拟小卫星间链路,利用 ZigBee 无线通信技术,搭建了星载计算机和 PC 间的系统测试平台,实现了基于 UDP 协议的星间通信,为 UDP 协议在微小卫星上的进一步研究提供了很好的试验和测试平台。在下一步工作中,将对 LwIP 协议进行优化和二次开发,例如利用多种校验和重传等方式,提高数据传输可靠性;提高系统数据传输能力,研究 TFTP 或 FTP 等大文件传送的功能;针对不同的可靠性需求,采用不同的传输层协议,例如遥控指令采用 TCP 传输,大容量数据可考虑采用 UDP 通信,如图像数据等。

参 考 文 献

[1] 林来兴. 分布式小卫星系统的技术发展与应用前景[J]. 航天器

工程,2010,19(1)

- [2] 刘豪,梁巍. 美国国防高级研究计划局 F6 项目发展研究[J]. 航天器工程,2010,19(2)
- [3] Demangel F, Fau N, Charot F. A Generic Architecture of CCSDS Low Density Parity Check Decoder for Near-Earth Applications [C]//Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition, 2009 (DATE'09). 2009; 1242-1245
- [4] 叶晓国,肖甫,孙力娟,等. SCPS/CCSDS 协议研究与性能分析[J]. 计算机工程与应用,2009,45(4)
- [5] 黄薇,吴伟陵. OMNI—实现空间通信系统标准化的新思路[J]. 电讯技术,2003(5)
- [6] Roseti C, Luglio M, Zampognaro F. Analysis and Performance Evaluation of a Burst-Based TCP for Satellite DVB RCS Links [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2010, 18(3)
- [7] Stevens W R. TCP/IP Illustrated, TCP/IP 协议详解[M]. 北京:机械工业出版社,2004
- [8] Jean. μ C/OS-II—源码公开的实时嵌入式操作系统出版社[M]. 邵贝贝,译. 北京:中国电力出版社,2001
- [9] Sahinoglu G D Z, Bhargava B. Reliable broadcast in ZigBee networks[C]//Proceedings of Second Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad hoc Communications and networks. 2005; 510-520
- [10] Khan M, Amini F, Misic J. The Cost of Security: Performance of ZigBee Key Exchange Mechanism in all 802.15.4 Beacon Enabled Cluster[J]. Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS), 2006(5): 876-881

(上接第 4 页)

的每个陈述也是一件不容易的事情。形式化关系通常是低形式化的。这里的低形式化是指,没有区分一个属性的论域和该属性在一个关系中的取值范围;没有区分顶值概念和顶元组概念;没有定义一个顶概念为顶 α 值概念与顶元组概念的并,等等。

为了把数据库中关系的表示扩展到 ER 模型中 ER 模式的表示,应该更多地关注关联 (relationship) 和元组之间在主体上的不同,其中一个元组是一个从属性到属性值的函数,一个关联是一个从元属性到元组的函数。因此,需用一个顶概念表示关联,一个顶概念表示元组;对每个元属性,需要一个角色,它连接一个关联与一个元组;对每个属性,需要一个角色,它连接一个元组和一个属性值。

参 考 文 献

[1] Baader F, Calvanese D, McGuinness D L, et al. The Description Logic Handbook[M]. Cambridge University Press, 2002

[2] Baader F, Laux A. Terminological Logics with Modal Operators [C]//Proceedings of the International Workshop on Description Logics-DL-95. 1995; 6-12

[3] Baader F, Laux A. Terminological Logics with Modal Operators [C]//IJCAI-95. 1995; 808-814

[4] Beneventano D, Bergamaschi S, Lodi S. Terminological logics for schema design and query processing in OODBs[C]//KRDB-94. 1994

[5] Beneventano D, Bergamaschi S, Sartori C. Subsumption for Semantic Query Optimization in OODB[C]//DL-94. Bonn, Germany, 1994

- [6] Borgida A. Description Logics for Querying Databases[C]//DL-94. Bonn, Germany, 1994
- [7] Borgida A. Description Logics in Data Management [J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 1995, 7(5): 671-682
- [8] Borgida F, Lenzerini M, Rosati R. Description logics for data bases[Z]
- [9] Calvanese D, Giacomo G D, Lenzerini M, et al. Source Integration in Data Warehousing[C]//Proceedings of the Ninth International Workshop on Database and Expert Systems Applications. Vienna, 1998; 192-197
- [10] Calvanese D, Lenzerini M, Nardi D. Description logics for conceptual data modeling[C]//Logics for Databases and Information Systems. Kluwer Academic Publisher, 1998; 229-263
- [11] Lenzerini M. Description logics and their relationships with databases[C]//ICDT'99, LNCS 1540. 1998; 32-38
- [12] Lutz C. Reasoning with concrete domains[C]//Proc. of the 16th IJCAI. Stockholm, Sweden, 1999; 90-95
- [13] Wolter F, Zakharyashev M. Modal description logics; Modalizing roles[Z]. Fundamenta Informaticae, 1999; 411-438
- [14] Wolter F, Zakharyashev M. Temporalizing description logics [C]//Proceedings of Fro-CoS'98. Amsterdam, 1998
- [15] Wolter F, Zakharyashev M. Dynamic description logics[Z]. Advances in Modal Logic II, 2000; 449-463
- [16] Ma Y, Shen Y, Sui Y, et al. The description logic for relational databases[M]. Intelligent Information Processing, 2010; 64-71
- [17] Ma Y, Shen Y, Cao C, et al. The description logic for relational databases[C]//The 6th International Conference on Intelligent Information Processing. regular paper