

改进的 CFDP 协议延时估算算法

拱长青, 李 莹

(沈阳航空航天大学计算机学院, 沈阳 110136)

摘 要: 为在深空环境下可靠地传输文件, 研究 CCSDS 的异步否定确认信息型文件传输协议 CFDP 的文件传输机理, 根据动态调整定时器的方法, 提出一种改进的 CFDP 协议延时估算算法。在带宽有限的情况下, 接收端通过预测单程时延判断网络状况, 根据网络状况优化设置 NAK 触发时刻和定时器时限值。在 NS2 下的分析结果表明, 改进算法的文件传输时间较少, 吞吐量较大。

关键词: 深空通信; CCSDS 文件传输协议; 定时器; 延时; 协议数据单元

Improved Algorithm of CFDP Delay Estimation

GONG Chang-qing, LI Ying

(School of Computer, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

【Abstract】 To support reliable file transfer in deep space communication environment, this paper studies the transporting mechanism of asynchronous NAK mode of CCSDS File Delivery Protocol(CFDP). According to the dynamic adjustment timer method, this paper proposes an improved algorithm of CFDP latency estimation. In asynchronous NAK mode under bandwidth constrain, the algorithm through the predicted one-way delay to judge the network condition, NAK trigger and timer rule is optimized. Analysis results in NS2 show that the file delivery time of this algorithm is less and the throughput is larger.

【Key words】 deep space communication; CCSDS File Delivery Protocol(CFDP); timer; delay; Protocol Data Unit(PDU)

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2011.17.023

1 概述

在多任务情况下, 深空通信面临着大传播延迟、间歇性连接链路、带宽限制、信道传输率非对称和有限的功率预算等困难。针对这些问题, 空间数据咨询委员会(CCSDS)^[1]制定了文件传输协议(CCSDS File Delivery Protocol, CFDP)标准。CFDP 是建立在存储发送模型上的一种延时网络点对点文件传输协议, 这种模型能够在更复杂的深空环境下提供可靠的数据传输功能^[2]。CFDP 有 3 个关键功能:

(1)基于文件的数据管理;

(2)存储转发继电器;

(3)在大传播延迟和间歇性等特点的链路上可靠地传输数据。

为在深空环境下可靠地传输文件, 本文提出一种改进的 CFDP 协议延时估算算法。

2 异步否定确认型 CFDP 传输机理

与 TCP/IP 协议相比, CFDP 最大特点是在选择确认传输模式时, 传输的协议数据单元(Protocol Data Unit, PDU)使用否认确定信息(NAK)而不是确认信息(ACK)的自动重传(Automatic Repeat Request, ARQ)机制。针对通信环境和空间任务要求的不同, CFDP 提供 4 种不同 NAK 模式: 延时 NAK 型, 即时 NAK 型, 触发 NAK 型和异步 NAK 型, 每种方式仅仅是发送 NAK 的时机不一样。文献[3-5]对延时 NAK 型和即时 NAK 型做了理论分析, 下面以异步 NAK 为例予以说明。异步 CFDP 的具体传输过程如图 1 所示。

CFDP 采用混合的应答机制, 当数据没有正确被传送时, 接收方向发送方发送 NAK 报文, 请求重传丢失的数据包, ACK 主要用于辅助数据的传送。利用此协议传输文件之前,

发送方首先将文件划分为若干个协议数据单元 PDU, 并首先发送元数据包 MPDU(Meta PDU), 内含本次事务 ID 号、源 IP 地址、目的 IP 地址以及文件名和文件大小等参数, 通知接收方开始传输文件。

异步 NAK 模式(ANA)的文件传输分 2 个过程: 第 1 个过程为文件传输检测过程, 紧接的第 2 个过程为文件延时检测过程。在文件传输检测过程中, 无论 MPDU 是否被成功接收, 发送方都会在发出 MPDU 之后继续传输文件数据 PDU, 接收方通过正确接收到的 PDU 报文中的一些选项, 如序列号、起始字节和终止字节等来判断中途是否有 PDU 在传输中丢失。若有错误或丢失的 PDU, 则 NAK 信息由接收方的外部事件触发, 要求在此期间丢失的 PDU 进行重传, 同时启动重传定时器, 该重传定时器的定时时间及次数可以根据需要设定, 当重传定时器满时, 触发新的 NAK 信息。NAK 中特定的域标明了丢失后需要重传的 PDU 序列号, 当没有 PDU 丢失时, 该段内容为空。在发送方, 当最后一个 PDU 被发出后, 发送 EOF 给接收方, 被接收方成功接收到时, 接收方返回 ACK(EOF)并同时发送一个统计了全部 N 个 PDU 丢失信息的 NAK, 开始文件延时检测过程, 直到所有的 N 个 PDU 文件(包括 MPDU)被接收端正确收到。此时, 接收方发送 FIN PDU 给发送方, 表示所有 PDU 都已成功收到。发送方收到 FIN 后发送 ACK(FIN)并关闭链路, 接收方收到 ACK(FIN)后也关闭链路, 文件延时检测过程结束。

基金项目: 中航一集团航空基金资助项目(2007ZC54002)

作者简介: 拱长青(1965—), 男, 教授, 主研方向: 网络通信, 量子信息; 李 莹, 硕士研究生

收稿日期: 2011-03-22 **E-mail:** liying19860425@163.com

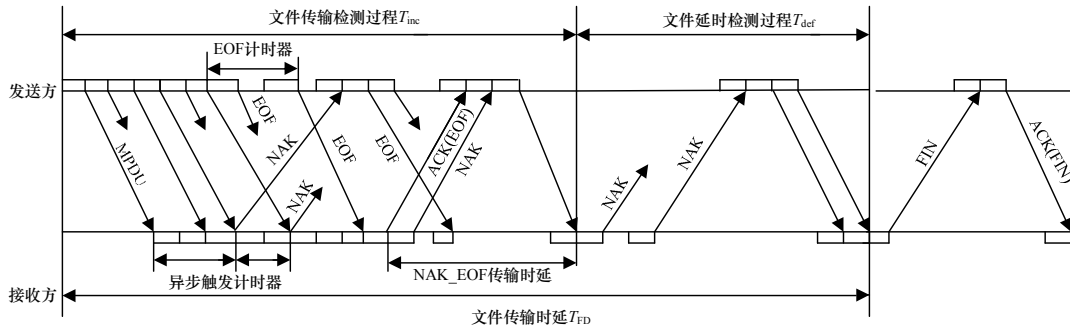


图1 异步否定确认型 CFDP 协议传输过程

3 改进的 CFDP 协议延时估算算法

3.1 算法思想

国外在定时器时限值的大小和设置准则方面做了很多工作^[3, 6], 为了保证对方能够准确接收到 EOF 报文和 FIN 报文, CFDP 采用了定时重传的机制, 维持 EOF 定时器和 NAK 定时器。如果给每个阶段产生的 NAK 的定时器的值都设置一个固定值, 则过早过晚的超时都会导致不必要的 NAK 超时重传, 这是因为在超时前一段时间内, 它迭代发送的数据所遇到的网络状况不一样, 另一方面因为深空网络非对称道的特性导致链路带宽是有限的^[4]。实际上, 定时器的时限值甚至在任何一个 NAK 定时器超时之前都可以动态的改变, 根据上面的思想, 本文提出了动态调整 NAK 定时器时限值的方法, 这个动态的 NAK 定时器时限值可以根据网络条件动态的调整, 有效地利用带宽, 并获得较大的吞吐量。

根据异步 NAK 型传输模式的特点, 当接收端要触发 NAK 信息时, 首先通过测量此次接收到的发送端发送的重传的 PDU 的单程延时来判断网络状况, 再根据此时的网络状况动态调整定时器的值, 之后本文根据动态调整重发时限算法^[5], 通过第 n 个 PDU 的单程延时动态的预测第 $n+1$ 个 PDU 的单程延时, 进而测量第 $n+1$ 个 PDU 是否超时, 若超时说明网络发生拥塞, 本文采用与之对应的估算单程延时的波动来预测网络状况。当接收端预测出网络处于拥塞或欠载情况下, 而且此时的时限大于往返延时, 将动态调整此时定时器的时限值。

动态调整定时器算法的核心是首先在接收端通过预测单程延时来判断网络状况, 再根据网络状况动态调整 NAK 触发时刻和定时器时限值。

3.2 基于预测单程延时的网络状况判断方法

在文献[5]的算法中, 需要维护几个变量, 它采用估计往返延时和往返时限来测量下一个包是否超时, 若超时说明网络发生拥塞。根据该算法, 当收到第 n 个 PDU 时, 用如下公式来估算第 $n+1$ 个 PDU 的单程延时 $SLDelay_{n+1}$:

$$SLDelay_{n+1} = \alpha \times SLDelay_n + (1 - \alpha) \times M_n \quad (1)$$

$$T_{RTO} = 2SLDelay_{n+1} + 4D_{n+1} \quad (2)$$

另外, 令 $SLDelay_{n+1} = M_1$, 此处, M_n 为每次测量出的单程延时即 $M_n = T_{Dn} - T_{Sn}$, 其中, T_{Dn} 和 T_{Sn} 分别为第 n 个 PDU 的接收时间戳和发送时间戳。

根据每次测量的传输过程中单程延时比较出最大和最小单程延时, 然后再根据如下公式计算网络状况:

$$WDelay = (SLDelay_{\max} - SLDelay_{\min}) \quad (3)$$

$$L = (SLDelay_{n+1} - SLDelay_{\min}) / WDelay \quad (4)$$

显然 $L \in [0, 1]$, 它直接反映了包在网络的延迟程度, 间接反映了网络状况。L 越小则说明包的延迟小, 网络比较空闲,

L 越大则说明包的延迟大, 网络比较繁忙。把 L 的取值范围划分为 3 个等级, 如表 1 所示。其中, $dload$ 为低负载状态的上限值; $uload$ 为轻度拥塞状态的下限值。在实验中取 $dload$ 为 0.25, $uload$ 为 0.6。它们的取值对拥塞状态的判断会有所影响。接收端在收到每个包时计算网络状况 L, 根据不同的 L 值来设置定时器的时限值, 算法策略完全在端点完成。

表1 L 的取值范围

网络状况	L 的取值范围
空闲	$[0, dload]$
良好	$[dload, uload]$
拥塞	$[uload, 1]$

3.3 算法流程

在接收端预测网络状况的算法流程如下:

Step1 初始化, 将最大和最小单程时延、单程时延的变化范围以及定时器的时限设置为 0。

Step2 记录第 1 个 PDU 的发送时间戳和接收时间戳, 这 2 个时间之差就得到了第 1 个 PDU 的单程延时 M_1 , 算法对第 1 个 PDU 的接收并不预先设定时限, 并将测到的第 1 个包的延时直接作为下一个包的预测延时。并将异步触发计时器第 1 次触发设定的时长为: $2M_1$, 直到定时器归零, 检测并发送第 2 个 NAK。

Step3 测量每一个 PDU ($n > 1$) 的单程延时, 并找出其中的最大和最小单程延时, 通过式(3)进而计算出单程时延的变化范围。

Step4 当接收方触发 NAK 时, 首先测出收到的发送端发送的重传的 PDU 单程延时, 然后再判断是否是最大或者是最小单程延时, 若是, 则将最大或者最小单程延时改为此值, 再利用此值计算出时延的变化范围; 然后利用此值, 根据式(1)计算并预测出下一次的单程延时, 再通过式(4)计算出网络状况 L。

Step5 以后触发的 NAK 时, 通过 Step4, 得到网络状况 L 的值, 再根据式(2)计算出的第 n 次重置的异步触发计时器的值与此次测量到的 $2M_n$ 进行比较, 若此时网络正处于空闲或者拥塞, 并且此时定时器的时限值大于 $2M_n$, 将定时器的时限值改为 $2M_n + RT_i$, 其中, RT_i 表示在延时检测过程中 NAK 请求第 i 次重传的 PDU 发送时间; 若小于, 则定时器的时限值根据式(2)设置。如果没有检测到 PDU 丢失, 接收端不返回 NAK。对于发送端, 每次收到 NAK 后, 优先发送 NAK 所请求重传的 PDU, 然后继续发送文件。

Step6 接收方成功接收到 EOF 时, 在返回 ACK(EOF)同时还发送一个统计了全部 N 个 PDU 丢失信息的 NAK, 开始文件延时检测过程, 在 T_{def} 阶段, 设定 NAK 计时器的最小值为: $T_{NAK} = 2 \times T_{prop} + RT_i$ 。

4 算法性能分析

文件传输时延 T_{FD} , 即从发送端发出 MPDU 的第 1 个比特到接收端成功收到所有 PDU 单元所花费的时间。定义 T_{inc} 为文件传输检测过程的时延, EOF 传输时间 T_{time_EOF} 为第 1 次发出 EOF 到接收端成功接收并发送 ACK(EOF)所花费的时间, T_{def} 为文件延时检测过程的时延, P_{ePDU} 为传输 PDU 时的误码率, P_{eNAK} 为传输 NAK 时的误码率, L_{PDU} 为每个 PDU 长度, L_{EOF} 为 EOF 长度, T_{prop} 为信号从发送方到接收方的单程传播时间, T_{PDU} 为发送任何一个 PDU 所用的时间。由于深空探测器的功率预分配和传输带宽极其严格, 为保证信道吞吐量的最大有效性, 尽量避免不必要的重传, 假设所有文件数据 PDU 的长度、传输时间和误码率相同; 设 EOF、EOF ACK、NAK 等辅助 PDU 的长度和误码率相同, 和文件数据 PDU 相比, 这些 NAKS 的长度很小, 所以本文忽略这些 PDUS 的传输时间。

4.1 模拟拓扑

在实验过程中, 本文用一个由 2 个节点组成的简单星网络拓扑结构, 以地球-火星通信为例, 研究从火星探测器到地面站的下行链路中利用协议传输数据的传输延时和吞吐量效率, 使用 NS2 进行仿真, 传输延时单位为 480 s。数据从发送方到接收方的单程传输时间为: $T_{prop} = d/c$, 其中, c 为光速; d 为火星到地球的平均距离。本文在传输层使用不可靠的 UDP 协议, 因为数据传输的可靠性由 CFDP 协议提供, 目的是提供一个低网络开销机制。文中对采用此算法的 CFDP 协议(DATA-ANA CFDP)与异步否定确认型的 CFDP 协议(ANA CFDP)的文件传输时延和吞吐量进行了比较和评估。

4.2 对称信道上的性能评估结果

对协议进行仿真时, 取 $M=10$ Mb, $L=1$ Kb, 传输速率 $R=1$ Mb/s, $P_e=10^{-4} \sim 10^{-7}$, 图 2 显示了在对称信道(20 Kb/s: 20 Kb/s)、不同误码率情况下采用 DATA 算法和没有用此算法的 CFDP 协议的文件传输时间, 当误码率很低时, DATA-CFDP 并没有显示出任何显著的性能改善, 但随着 BER 的增加, DATA-CFDP 的性能略有改善, 因为带宽是对称的, 在返回链路上没有瓶颈, 该算法对文件传输时间, 没有太大影响, 在对称信道的仿真条件下表现得不是很敏感。

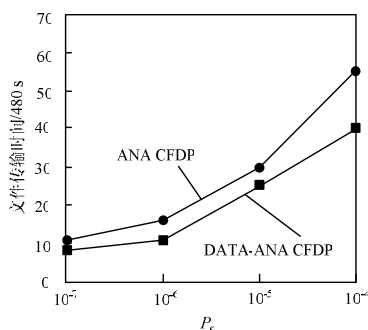


图2 对称信道中的文件传输时间比较

4.3 非对称信道上的性能评估结果

图 3 显示了相同参数下在非对称信道(128 Kb/s:20 Kb/s)上文件的平均传输时间。带宽不对称影响了 CFDP 可靠性的性能, 因为 CFDP 依靠反馈机制去保证可靠和平稳的传输。虽然带宽在数据传输的链路上(即下行链路)是足够的, 可以快速到达接收方(地面站), 但是反馈包经常会在相反方向的瓶颈处出现拥塞, 导致不能及时到达发送方, 进而导致整个性能下降, 从图 3 中可以观察到采用 DATA 算法后文件传输

时间有了显著的改善, 因为 DATA 算法通过动态的调整定时器的值去减少重传额外的冗余数据包所花费的不必要的时间, 进而减少了文件传输时间。

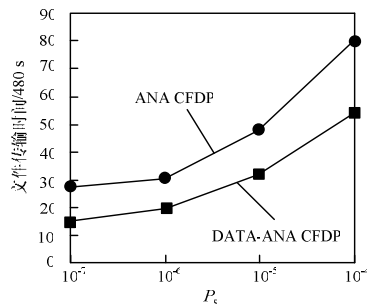


图3 非对称信道中的文件传输时间比较

4.4 间歇性链路上的性能评估结果

为了了解 DATA 算法在间歇性链接链路上产生的性能影响, 将大小为 1 MB 的 CFDP 协议文件在空中通信状况良好 ($P_e=10^{-6}$) 的对称信道上传输, 并且估算出上行和下行链路上不同的链路中断数的情况下的有效吞吐量, 结果如图 4 所示。

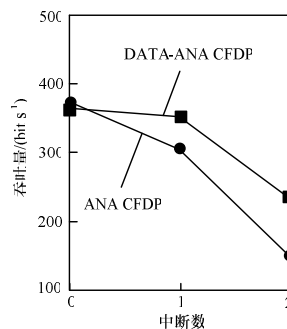


图4 间歇性链路上的吞吐量比较

可以看出, 本文算法在 2 个链路中断数的情况下获得了较好的吞吐量, 而且当中断数增加到 1 个中断时, 吞吐量并没有受到很大影响。当中断数为 0 时, DATA-ANA CFDP 协议与 ANA CFDP 协议获得了几乎相同的吞吐量, 因为当接收实体发送 NAK 信息之后, 在定时器计时到时后还没有收到任何新的 PDU, 则可能在这段时间内出现间歇性链接或无连接, 或由于带宽拥塞丢失了 PDU 造成的, 这时本文算法会根据预测下一个单程时延来判断网络状况, 进而在出现间歇性链接的情况下将定时器的值设置的大一些。

5 结束语

CFDP 协议是一种适合于深空网络应用的协议, 本文采用异步否定确认型传输模式, 实现了一种改进的 CFDP 延时估算法, 通过对 NAK 发送次数和频率的控制, 在较小的传输时延代价下使重传次数大大减少, 从而提高了链路效率, 减少了链路拥塞的可能。本文算法在网络模拟器 NS2 上的仿真结果表明, 与没有采用本文算法的 CFDP 协议相比, 改进算法的性能有了显著提高。将本文算法应用到 CFDP 协议的其他可靠方式中是下一步的研究方向。

参考文献

- [1] CCSDS 650.0-B-1-2002 Reference Model for an Open Archival Information System(OAIS)[S]. 2002.
- [2] CCSDS 727.0-B-4-2007 CCSDS File Delivery Protocol(CFDP) Recommendation for Space Data Systems Standards[S]. 2007.

(下转第 89 页)