



一种基于分组丢失率测量的差错容忍式拥塞控制算法

严军荣¹, 卢玉龙¹, 潘 鹏^{1,2}

(1. 杭州电子科技大学通信工程学院 杭州 310018; 2. 南京邮电大学通信与信息工程学院 南京 210003)

摘要:空间通信的 TCP 大多数是基于 Vegas 算法,该算法需要对往返时延进行较为精确的测量,这在具有极长且可变时延的信道特征的深空通信环境中很难实现。提出一种基于分组丢失率测量的差错容忍式拥塞控制算法,该算法采用数据块的形式发送数据,依据历史数据设定差错容忍度,利用分组丢失率测量值进行拥塞状态判断及发送窗口大小调整,从而使用较小的开销达到较高的传输效率。最后,利用数学建模方法,证明基于分组丢失率测量的差错容忍式拥塞控制算法的吞吐量比传统 TCP 的 Tahoe 算法提高 34%,比 Reno 算法提高 22%。

关键词:拥塞控制;数据块;分组丢失率;差错容忍

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015257

An Error Tolerated Congestion Control Algorithm Based on Packet Loss Rate Measurement in Deep Space Communication Network

Yan Junrong¹, Lu Yulong¹, Pan Peng^{1,2}

(1. School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China; 2. College of Telecommunications & Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: Congestion control algorithms of TCP protocol previously used in space communications are mostly based on TCP Vegas algorithm. They always require accurately measurement of RTT, but it's very difficult to achieve in deep space communication networks which have very long and variable delay channel characteristics. An errors tolerated congestion control algorithm is proposed based on packet loss rate measurement. The algorithm sends data in the form of data blocks and gives an errors tolerated degree based on the history data. It measures the congestion state based on the current packet loss rate measurement, so it can achieve a smaller overhead and higher transmission efficiency. In addition, the usage of mathematical modeling methods simplifies the networks and simulates the real network traffic. The mentioned algorithm is compared with the classical congestion control algorithm. Analysis and simulation prove that the throughput of improved algorithm is 34 percent better than Tahoe and 22 percent better than Reno, so it gets a better performance.

Key words: congestion control, data block, packet loss rate, error tolerated

收稿日期:2015-05-25;修回日期:2015-10-09

基金项目:浙江省自然科学基金青年基金资助项目(No.LQ13F010013),第 56 批中国博士后科学基金面上基金资助项目(No.2014M561693),国家自然科学基金青年科学基金资助项目(No.61401130)

Foundation Items: Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of Youth Fund Project(No.LQ13F010013),56th China Postdoctoral Science Foundation-Funded Projects(No.2014M561693),The National Natural Science Foundation of Youth Science Foundation(No.61401130)

论文引用格式:严军荣,卢玉龙,潘鹏.一种基于分组丢失率测量的差错容忍式拥塞控制算法.电信科学,2015257

Yan J R, Lu Y L, Pan P. An error tolerated congestion control algorithm based on packet loss rate measurement in deep space communication network. Telecommunications Science, 2015257



1 引言

随着空间技术^[1,2]的迅猛发展,火星探测等深空任务成为现实。未来的空间探测任务需要在行星、卫星、空间站、登陆车等之间进行通信,这种通信需要安全及时地传输数据。

深空通信网络存在重大挑战^[3,4]。深空通信链路一个重要的特点是往返时延相当长且变化较大,长时延会对以数据确认和超时重传为基础的拥塞控制带来很大的影响。数据确认返回的时间越长,信源端对拥塞的发生就越不敏感,拥塞发生的持续时间增长,数据分组丢失也就越多。另外,由于空间环境的影响,深空通信链路极易出现突发性错误而且链路误码率极高,这些都会大大降低信道利用率。

本文提出一种基于分组丢失率判定(packet loss rate measurement, PLRM)的差错容忍式拥塞控制算法。首先将数据发送形式定义为数据块,并根据返回数据块中的分组丢失数计算分组丢失率,根据不同的分组丢失率进行链路拥塞状况的分段判断,从而进行不同处理,实现数据块的大小和窗口增长规律的合理控制。算法的核心是差错容忍,根据深空通信的高误码率的特点,将一定的分组丢失率作为正常情况处理,此时发送数据块仍以一定的比例进行增大。若拥塞状态正在加剧,则发送数据块将以一定的比例减小。为了对 PLRM 算法进行进一步的理论分析,利用数学建模方法,简化并模拟实际的网络通信,对算法进行了理论分析和仿真对比。

2 相关工作

网络拥塞是影响网络性能的重要因素之一,近年来空间网络中的拥塞控制问题引起了广泛的关注。相比传统网络,由于链路环境复杂、突发错误率高以及网络的时延不确定,传输控制协议(transmission control protocol, TCP)中基于端到端反馈的拥塞控制策略无法应用于深空通信网络环境。在已有的研究工作中,研究人员从不同的角度出发,寻求卫星网络环境下的拥塞问题的解决方案,并相应地提出了许多拥塞控制策略。

TCP-Westwood 算法^[5]的关键思想是一直在发送端对 TCP 链接的可用带宽进行估计,估计的方法是观察返回 ACK 的速度,估计得出的数据传输速率用于计算拥塞窗口和慢启动门限值。

TCP Vegas^[6]机制改变了以往根据分组丢失来改变拥塞窗口大小的处理模式,而是通过对一段时间内端到端传

输速率的变化进行判断来实现拥塞控制。Vegas 机制不断测量 RTT 值的变化来比较实际吞吐量与预期吞吐量,可以灵活调整拥塞窗口大小,并不一味地将窗口增大。

TCP-Peach 算法^[7]的思想如下:针对长时延对传输效率的影响,通过快速发送较多的虚报文段,更快地获得确认 ACK,从而加快 TCP 启动和重传后的恢复速率。在这里,虚报文段指的是由发送端产生的优先级较低的数据分组。对接收端来说,虚报文段不包含任何新的信息。TCP 发送端使用虚报文段来探测可用网络资源。TCP-Swift^[8]是在 TCP-Peach 的基础上改进的,使用未确认的数据分组代替 TCP-Peach 中的虚报文段。虚报文段仅仅是最后一个发送分组的备份,而未确认的数据分组是从已经发送但还没有收到确认的数据分组中随机选择出来的,因此,它可以作为已经发送的数据分组的备份,有利于在已发送的数据分组出现丢失时减少重传次数,进而增强网络性能。

TCP-Planet 协议^[9]用于在星际互联网内传输数据。TCP-Planet 使用了一种新颖的初始状态启动算法代替了原来效率低下的慢启动算法,使其能够更快地占用带宽。在经过初始状态启动算法后,TCP-Planet 协议就进入所谓稳定算法状态,算法中,协议采用了新的拥塞检测和控制机制,该机制可以区分单个数据分组的丢失和拥塞导致的数据分组丢失,可以将由于链路错误而导致的错误拥塞决策率降低到最小。

TCP Jersey 协议^[10]在发送端采用了可变带宽估计(available bandwidth estimation, ABE)算法和一种类 ECN 的拥塞通告(congestion warning, CW)。发送端采用 ABE 算法可以通过接收到的 ACK 速率更精确地估计网络可用带宽,从而可以优化 ownd(拥塞窗口)的大小,并且可以用较差的网络负载对发送数据速率进行调节。带宽计算方法如式(1)所示。

$$R_n = \frac{RTT \times R_{n-1} + L_n}{(t_n - t_{n-1}) + RTT} \quad (1)$$

其中, R_n 是 $n-1$ 时刻的估计带宽, RTT 是往返时延, L_n 是第 n 时刻数据分段的大小。通过带宽估计,优化的 ownd 由式(2)计算。

$$ownd = \frac{RTT \times R_n}{seg_size} \quad (2)$$

CW 是类似于 ECN 的拥塞通告,在数据分组头包含拥塞信息,从而能够通知终端数据分组丢失的原因,进而将拥塞和链路错误区分开来。

Split-TCP 算法^[1]通过将跨越多跳的过长 TCP 连接分割为短一些的本地连接段来解决跨越多跳的过长 TCP 连接的性能恶化问题。这样,原来完整的、端到端的差错控制,流量控制和拥塞控制,都被分裂成多个局部的、较短的差错控制、流量控制和拥塞控制,因此 TCP 性能得到了提高。在卫星网络中,该方法一般是将上行链路和下行链路分别处理。当然,分割 TCP 连接的解决方法也存在一些缺点,网网站需要大量的缓存和处理资源,而且会随着所支持的 TCP 连接数量的增加而增长,容易成为新的瓶颈而降低网络性能,为网络引入了单点失效危险,这是因为一个 TCP 连接的所有数据分组都必须经过特定网网站的路由而没有其他可替代的路由选择。如果使用 IP 安全机制(IPSec),将会制约分割 TCP 连接方法的使用,网网站可能无法获知经过加密的 TCP 分组头中的有关信息,如端口号和序列号等,或者需要具备相应的解密和认证能力,但这也会降低网网站对数据处理和协议转换的效率。

上述 6 种方法大体上分为 3 类:通过链路层差错控制来减小无线网络链路错误对 TCP 的影响、分割 TCP 连接以及端到端的增强和改进。这些类别的划分并非绝对的,在实际应用中也不是孤立存在的,通常多种方法同时使用,相互配合补充。虽然对于传统的 TCP 有较大改动,但都要求对 RTT 进行较为精确的测量,这在深空通信中难以实现^[2]。另外,上述方案并没有针对卫星链路高突发错误率的特点进行优化,链路的利用率较低。

3 PLRM 算法

3.1 算法基本原理

该算法针对深空通信的高误码环境实施差错容忍的处理方式,即在一定的分组丢失率范围内,仍然执行正常的窗口增长策略,并对不同的分组丢失率进行链路拥塞状况的划分,从而合理控制数据块的大小和窗口的增长规律。另外,将发送单位重新定义为数据块,数据块由发送数据段和重传数据段组成,而每个数据段又由 1 个或多个数据分组组成,从而简化卫星通信链路资源分配的复杂性,使发送窗口和拥塞窗口的大小转化为数据块中数据分组的个数,保证链路的通信量。

3.1.1 数据传输单位重新定义

(1) 发送数据块

定义发送数据块的结构为发送数据段长度为 M_i 、编号

为 1 到 M_i 的发数据段、编号为 1 到 N_i 的重传数据段,如图 1 所示。其中,初始发送数据块中 M_i 为发送端缓存中的最大窗口值 M ,且不包含重传数据段。

新发送数据段的长度	新发送数据段						重传数据段			
M_i	1	2			M_{i+1}	M_i	1	2		N_i
			...						...	

图 1 发送数据块

(2) 确认数据块

确认数据块的格式如图 2 所示,包括分组丢失起始序号 S_i 、数据接收指示队列(长度为 M_i)及分组丢失数 N_i 。其中,数据段接收指示队列是由接收端进行差错判断所形成的长度为 M_i 的 01 序列(正确接收的数据分组置为 0,未正确接收的数据分组置为 1)。假设重传数据段中的数据重传后不会再出现错误,故该 01 序列均只进行 1 到 M_i 的排列。

分组丢失起始序号	数据段接收指示队列	分组丢失数
S_i	10011010000000 II 001001 (共 M_i 位)	N_i

图 2 确认数据块

3.1.2 基于分组丢失率判定的差错容忍拥塞控制

算法根据深空通信环境进行一定的差错容忍,根据分组丢失率对网络环境进行情况划分,分别进行不同的数据段长度调整,从而实现链路利用率较高的拥塞控制。

首先根据确认数据块中的分组丢失数 N_i 和发送窗口 M_i 得到分组丢失率 X_i ,如式(3)所示。记下一次发送数据段的长度 M_{i+1} ,如式(4)所示,根据 X_i 的不同范围对 M_{i+1} 进行不同程度的调整。

$$X_i = \frac{N_i}{M_i} \quad (3)$$

$$M_{i+1} = \begin{cases} \beta \cdot M_i, & 0 \leq X_i \leq \alpha \\ (\beta - 1) \cdot M_i, & 0 < X_i \leq \varepsilon \\ (1 - X_i) \cdot M_i, & \varepsilon < X_i \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

其中, α 、 β 、 ε 为预设的固定值, $0 < \alpha < \varepsilon < 1$, $1 < \beta < 2$ 。其具体取值是根据长期的历史数据训练得到,取值范围如式(5)所示, α 为正常通信时的分组丢失率, ε 为通信状况较差时的分组丢失率, β 为链路状况参考值。当 $X_i \leq \alpha$ 时,进行差错容忍处理,发送数据段的长度增大 β 倍,并不进行普通拥塞情况下的缩小窗口处理;当 $\alpha < X_i \leq \varepsilon$ 时,链路恶化但程度较轻,发生轻微拥塞状况,从而使发送数据段的长度减小;当 $X_i > \varepsilon$ 时,链路状况极度恶化,拥塞严重,发送数据



段长度与分组丢失率成反比进行调整, 分组丢失率越大, 发送数据段长度越短, 窗口越小。

PLRM 算法的流程如图 3 所示。终端 A 为发送端, 终端 B 为接收端。

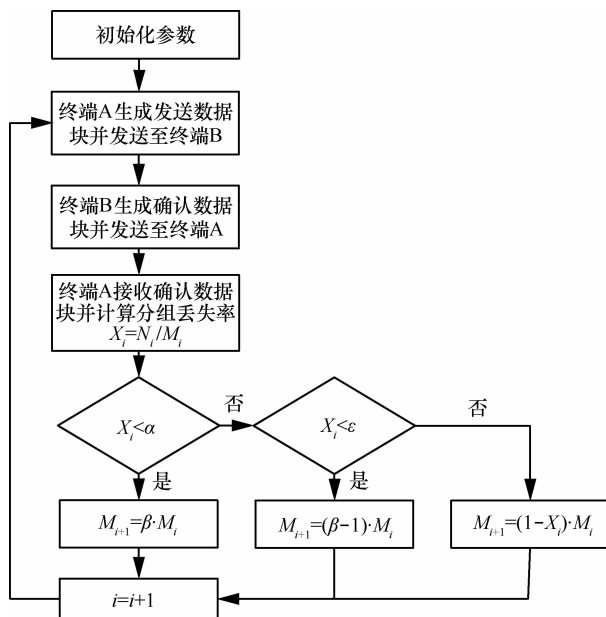


图 3 PLRM 算法流程

3.2 算法实现与测试

Vegas 算法是基于时延进行拥塞处理, 而 PLRM 算法是基于分组丢失进行拥塞处理, 在仿真中, 采用同是分组丢失处理的 TCP 经典算法进行对比更具有一致性和说服力。故分别对 TCP Tahoe 算法、TCP Reno 算法和 PLRM 算法进行数学建模仿真对比。

3.2.1 经典算法与 PLRM 算法的数学模型测试

TCP Tahoe 算法^[13]简化成数学模型为数列 1, 2, 4, 8, 16 (16 为原门限窗口), 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24 (发生超时, 即网络发生拥塞, 更新的门限窗口为 12), 1, 2, 4, 8, 12, 13, 14, 15...

TCP Reno 算法简化成数学模型为数列 1, 2, 4, 8, 16 (16 为原门限窗口), 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24 (发生超时, 即网络发生拥塞, 更新的门限窗口为 12), 12, 13, 14, 15...

假设初始参数 $M=16$, $\alpha=0.1$, $\beta=1.5$, $\varepsilon=0.5$ 。PLRM 算法可简化为数学模型为数列 16 (16 为原门限窗口), 24 ($16 \times 1.5=24$), 15 (分组丢失 3 个得到分组丢失率为 12.5%, 故 $24 \times (1.5-1)+3=15$), 18 ($12 \times 1.5=18$), 28 (分组丢失 1 个得到分组丢失率为 5.6%, 故 $18 \times 1.5+1=28$), 27 (分组丢失 15 个得到分组丢失率为 55.6%, 故 $27 \times (1-0.556)+15 \approx 27$),

18 ($12 \times 1.5=18$), 27 ($18 \times 1.5=27$), 24 (分组丢失 10 个得到分组丢失率为 37%, 故 $27 \times (1.5-1)+10 \approx 24$), 21 ($14 \times 1.5=21$), 32 ($21 \times 1.5 \approx 32$), 26 ($32 \times (1.5-1)+10=26$), 24 ($16 \times 1.5=24$), 32, 26, 24, 20...

3 种算法模型测试结果对比如图 4 所示。

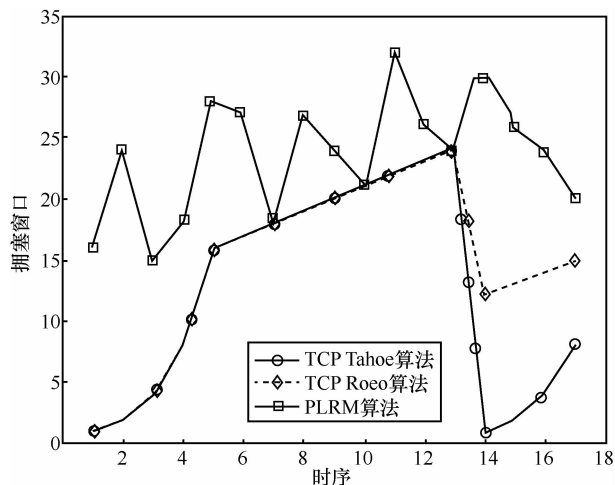


图 4 算法测试结果对比

从图 4 中可以明显看出, PLRM 算法在吞吐量上远远高于其他两种算法。

3.2.2 性能分析

通过建立数学模型来简化模拟实际的网络, 比较各算法稳定循环阶段内的期望和方差。期望体现信道利用率水平, 方差体现通信流量的稳定性。

TCP Tahoe 算法稳定循环阶段等同于 1~13 阶段, 循环阶段整体期望为 15、方差为 7.937。

TCP Reno 算法稳定循环阶段等同于 5~18 阶段, 循环阶段整体期望为 18、方差为 3.742。

PLRM 算法稳定循环阶段等同于 1~13 阶段, 循环阶段整体期望为 23、方差为 4.899。

计算可得, PLRM 算法的期望相比 TCP Tahoe 算法提高 34%, 相比 TCP Reno 算法提高 22%。直观的性能对比如图 5 所示。

TCP Reno 算法在网络出现拥塞时, 所有通信拥塞窗口都置为更新的门限窗口的一半, 在信道利用率上有较大提高。但 PLRM 算法在信道利用率方面具有较大优势, 比 TCP Tahoe 算法约提高 34%, 比 TCP Reno 算法提高 22%。

由于深空通信中时延及分组丢失的可变性, PLRM 算法也相应呈现出容许范围内的波动, 这极大抑制了通信状况的恶化, 保证了极高的吞吐量和较为稳定的环境。

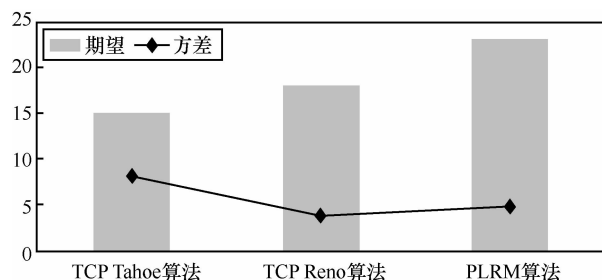


图5 算法性能对比

4 结束语

本文首先介绍了多种应用于空间通信的TCP拥塞控制算法,然后提出了PLRM算法,最后对PLRM算法与传统算法进行了性能对比,仿真结果证明了新算法的传输效率比TCP Tahoe算法约提高34%,比TCP Reno算法提高22%。

综合全文分析,PLRM算法采用数据块为发送单位,直接采用历史最大窗口值启动,并且将每次需要重传的数据加入下次发送数据块中,再通过算法的反馈特性,使窗口快速逼近临界值,大大加快了算法的启动速度。同时,通过对分组丢失率的计算进行差错容忍式的拥塞情况判断,按不同比例对发送窗口进行调整,大大提高了深空通信的传输效率,确认数据块的结构体现了分组丢失的位置和顺序,发送端易于对下次需要重传的数据分组进行识别和重组,降低了算法的复杂度。

参考文献

- 李纪舟,路璐,郭利民.空间互联网技术发展现状及趋势.通信技术,2015,48(1):1~7
Li J Z, Lu L, Guo L M. Development status and trend of space internet technology. Communications Technology, 2015, 48(1): 1~7
- Hu J L, Wang R H, Sun X, *et al.* Memory dynamics for DTN protocol in deep-space communications. Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2014, 29(2): 22~30
- Wang C Q, Wang W, Sohraby K, *et al.* Deep space communication relay services under energy constraint with optimal power control. Proceedings of the IEEE Global Communications Conference, Atlanta, GA, USA, 2013
- Wu T, Yan Y, Li Y C, *et al.* Deep space communication channel characteristics under solar scintillation. Proceedings of the International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC), Harbin, China, 2014
- Casetti C, Gerla M, Mascolo S, *et al.* TCP westwood: bandwidth estimation for enhanced transport over wireless links. Proceedings

of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, New York, USA, 2001

- 戴帅,肖楠,梁俊. SCPS-TP在卫星网络中的传输控制算法研究. 现代防御技术, 2013, 41(6): 83~87
Dai S, Xiao L, Liang J. Congestion control algorithm of SCPS-TP in satellite network. Modern Defense Technology, 2013, 41(6): 83~87
- Akyildiz L F, Morabito G, Palazzo S. TCP-peach: a new congestion control scheme for satellite IP networks. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2001, 9(3): 307~321
- Kui F L, Yeung K L. TCP swift: an end-host enhancement scheme for TCP over satellite IP networks. Proceedings of the 9th International Symposium on Computers and Communications, Alexandria, Egypt, 2004
- Akyildiz I F, Akan O B, Chen C, *et al.* InterPlaNetary internet: state-of-the-art and research challenges. Computer Networks, 2003, 43(2): 75~112
- Li S, Ansari N. TCP-jersey over high speed downlink packet access. Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference, Saint, Louis, MO, USA, 2005
- Kopparty S, Krishnamurthy S, Faloutsos M, *et al.* Split TCP for mobile Ad Hoc networks. Proceedings of IEEE GLOBECOM, Taipei, China, 2002
- 韩磊,赵尚弘,李勇军等.空间通信协议及其在卫星光网络中的应用研究.光通信技术, 2012, 36(11): 15~18
Han L, Zhao S H, Li Y J, *et al.* Study on SCPS and application in optical satellite networks. Optical Communication Technology, 2012, 36(11): 15~18
- 吕冠桥,柳寒冰,邓晓红.基于TCP协议的网络拥塞控制算法设计.软件导刊, 2014, 13(1): 56~58
Lv G Q, Liu H B, Deng X H. The design of network congestion control algorithm based on TCP protocol. Software Guide, 2014, 13(1): 56~58

[作者简介]



严军荣,男,博士,杭州电子科技大学讲师,主要研究方向为无线通信与计算机网络。

卢玉龙,男,杭州电子科技大学硕士生,主要研究方向为卫星通信协议。

潘鹏,男,博士,杭州电子科技大学副教授,南京邮电大学在站博士后,主要研究方向为多用户检测技术、协作通信理论与技术。