

# SCSRM: 分割连接的卫星可靠组播方案

刘功亮<sup>1</sup> 康文静<sup>1</sup> 顾学迈<sup>2</sup> 郭庆<sup>2</sup>

(哈尔滨工业大学(威海)信息科学与工程学院 威海 264209)<sup>1</sup>

(哈尔滨工业大学通信技术研究所 哈尔滨 150001)<sup>2</sup>

**摘要** 针对端到端方案在卫星可靠组播中存在的缺点,提出了一种分割连接的卫星可靠组播方案 SCSRM,并从差错控制机制、拥塞控制机制、反馈抑制策略等方面对运行于卫星网络部分的传输协议 Sat-MTCP 进行了详细的设计。仿真结果表明,即使在较差的信道条件下,SCSRM 方案也可以达到较好的 Goodput 性能;由于采用了有效的反馈抑制策略和差错恢复策略,当接收者数量增大时,Goodput 性能基本保持平稳,表现出良好的可扩展性;通过可用带宽的合理分配,保证了带宽公平性。

**关键词** 卫星通信,可靠组播,分割连接

**中图分类号** TN927+.2 **文献标识码** A

## SCSRM: A Splitting-connection-based Satellite Reliable Multicast Scheme

LIU Gong-liang<sup>1</sup> KANG Wen-jing<sup>1</sup> GU Xue-mai<sup>2</sup> GUO Qing<sup>2</sup>

(College of Information Science and Engineering, Harbin Institute of Technology (Weihai), Weihai 264209, China)<sup>1</sup>

(Communications Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)<sup>2</sup>

**Abstract** In order to overcome the shortcomings of end-to-end transport protocols in satellite networks, a novel splitting-connection-based satellite reliable multicast (SCSRM) scheme was proposed in this paper, and the transport protocol operating in space segment, Sat-MTCP was designed in detail from the aspects of error control, congestion control and feedback suppression, respectively. Simulation results show that this scheme achieves satisfying Goodput performance even if the channel condition gets worse; owing to the efficient feedback suppression policy and error recovery policy, the Goodput performance maintains smooth as the receivers increase; and fairness can be achieved by suitable bandwidth allocation.

**Keywords** Satellite communications, Reliable multicast, Splitting connection

从当前技术发展的趋势来看,下一代互联网(Next Generation Internet)将是天地一体化的综合网络。由于地面网络在建设成本、覆盖范围和网络配置灵活性等方面的局限性,作为下一代互联网天基部分的卫星互联网开始受到越来越广泛的关注。与地面网络相比,卫星网络具有覆盖面积广、信道广播性等优点,因而在 IP 组播应用中具有得天独厚的优势。

IP 组播是“尽力而为”类型的服务,不能保证可靠传输,因此高效可靠的组播传输控制协议一直是组播技术的研究重点。由于卫星网络具有延时长、误码率高、带宽非对称等特点,针对地面网提出的可靠组播协议不适用于卫星网络<sup>[1-4]</sup>。尽管目前提出了一些卫星可靠组播方案,在一定程度上提高了卫星可靠组播性能,但这些方案都是端到端解决方案<sup>[5-11]</sup>,存在两个主要的缺点:(1)对所有的地面组播信源和信宿进行针对卫星环境的适应性修改非常复杂;(2)端到端方案不能从根本上解决卫星信道的一些固有缺陷,如长延时和高误码率

等。鉴于此,本文根据卫星网络特点,提出了一种分割连接的卫星可靠组播方案 SCSRM (Splitting-Connection-based Satellite Reliable Multicast),并设计了卫星网关和卫星终端之间运行的可靠组播传输控制协议——Sat-MTCP。

## 1 卫星可靠组播结构

SCSRM 方案通过网关和卫星终端把网络分为 3 个部分:信源到网关、网关到卫星终端、卫星终端到用户。在信源和网关之间,执行 TCP 协议;在网关和卫星终端之间,执行本文提出的 Sat-MTCP (satellite-multicast transport control protocol) 协议;在卫星终端和用户之间,执行地面可靠组播网络中常用的 RMTP 协议。其协议栈结构如图 1 所示,图中的虚线表示可能存在的连接。这样,组播通信的流量控制、差错恢复等功能将主要由卫星网关来完成,而不是像端到端的可靠组播传输协议那样由信源完成。

到稿日期:2008-10-07 返修日期:2008-12-14 本文受 863 国家重点基金项目(2004AA001212),国家自然科学基金(60532030),哈尔滨工业大学(威海)校研究基金(HIT(WH)200720)资助。

刘功亮(1979-),男,博士,讲师,主要研究方向为卫星通信、无线通信网络,E-mail:liugl@hit.edu.cn;康文静(1978-),女,博士,主要研究方向为多媒体通信与编码;顾学迈(1957-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为卫星通信、无线通信;郭庆(1964-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为宽带卫星通信。

在上述结构中,卫星网关是系统的核心,完成协议转换、流量控制、差错控制以及组播组管理等功能,具体包括:

- (1) 截取并缓存发送端发来的 TCP 数据包,并对接收到的数据包进行确认,然后将 ACK 包返回给发送端;
- (2) 将接收到的 TCP 数据包转换为适合于卫星链路传说的数据包,将其记作 Sat-MTCP 数据包;
- (3) 将 Sat-MTCP 数据包经过卫星发送给卫星终端,并保留发送数据包的副本;
- (4) 根据来自卫星的综合比特图谱(Bitmap),清除被确认数据包的副本,并丢弃相应的 ACK 包;
- (5) 与发送端建立连接时,运行的是标准的 TCP 协议,按照 TCP 协议规范制定的原则检测并恢复丢失的数据包;
- (6) 与卫星终端通信时,运行的是适合于卫星链路的可靠组播传输控制协议,称为 Sat-MTCP 协议,执行 Sat-MTCP 协议规定的拥塞控制策略和差错控制策略;
- (7) 负责组播组成员的加入和离开登记,并将成员变动情况通知发送者。

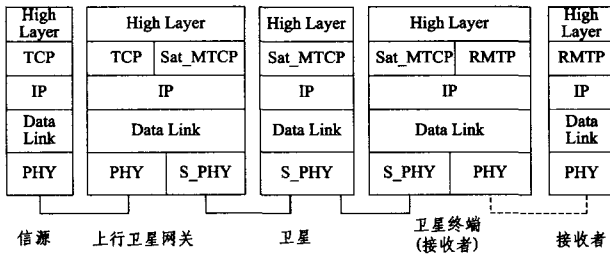


图1 SCSRM 方案协议栈

## 2 Sat-MTCP 协议描述

在分割连接的卫星可靠组播方案中,Sat-MTCP 是工作在上行卫星网关和卫星终端之间的协议,通过它把地面网络和卫星网络连接起来,并且对终端用户来说是透明的。一方面避免了所有地面终端用户为了适应卫星网络特性而进行协议修改的复杂工作;另一方面,这种分割连接的方案在很大程度上降低了卫星信道带来的影响,提高了卫星可靠组播传输的性能。具体地说,Sat-MTCP 协议主要包括以下方面。

### 2.1 基于异或编译码和重传矩阵预处理的差错恢复策略

为了避免高误码率、长延时环境下频繁重传造成的性能下降,Sat\_MTCP 采用基于异或编译码和重传矩阵预处理的差错恢复策略<sup>[12]</sup>。在该策略中,重传窗口 WR 的选择是一个问题;如果 WR 选择太小,就失去了 XOR 编码的意义;如果选择太大,就会过多地占用缓冲区空间,造成网络拥塞。

在 Sat-MTCP 协议中,设定一个重传窗口最大值  $W_R^{max}$ ,在组播通信过程中根据拥塞窗口的变化而动态调整实际的重传窗口  $W_R$ :

$$W_R = \min(cwnd, W_R^{max}) \quad (1)$$

### 2.2 拥塞控制机制

#### (1) 拥塞窗口动态进化策略

为了保证发送端不以大于卫星链路带宽的速率发送数据包,Sat-MTCP 协议规定,发送端的拥塞窗口尺寸  $cwnd$  根据当前可用带宽  $B_{ava}$  来动态调整。

Sat-MTCP 协议的接收端,即卫星终端,可以利用时间戳选项(timestamp)来计算各个数据包的往返时间,并统计发送

端发送的数据包数量,由此可知卫星链路的使用情况。对某一组播 Session,选择各个卫星终端测得的已用带宽的最大值作为该 Session 已用卫星链路带宽  $B_{use}^i$ ,则剩余的卫星链路可用带宽为

$$B_{ava} = B_{tot} - \sum_{i=1}^N B_{use}^i \quad (2)$$

其中,  $B_{tot}$  为卫星链路的总带宽,  $N$  为经过卫星网关的数据流数目(包括单播和组播)。

可用带宽在各个 Session 之间如何分配,主要考虑两个原则:一是要保证发送速率不大于卫星链路负载能力,二是要满足各 Session 公平地共享可用带宽。根据这两个原则,采取如下拥塞窗口调整策略:

假设有  $N$  个 Session 经过卫星网关,在理想的稳定状态下,  $N$  个 Session 公平地共享卫星链路的带宽资源,则各个 Session 得到的带宽资源是

$$\overline{bw}_i = \frac{B_{tot}}{N}, (i=1, 2, \dots, N) \quad (3)$$

此时,各个 Session 的拥塞窗口尺寸为

$$\overline{cwnd}_i = \left[ \frac{B_{tot} \cdot RTT}{N \cdot p_{size}} \right], (i=1, 2, \dots, N) \quad (4)$$

为了使各个连接尽快地达到公平共享卫星带宽的稳定状态,在增加拥塞窗口时,给具有较小拥塞窗口的 Session 分配较大的权重,使其尽快汇聚到  $\overline{cwnd}_i$  值。设  $cwnd_i$  表示第  $i$  个 Session 的拥塞窗口尺寸,  $\Delta cwnd_i$  表示该 Session 的拥塞窗口增量,令

$$\Delta cwnd_i = \frac{B_{ava} \cdot RTT}{p_{size}} \cdot \frac{1}{cwnd_i \cdot \sum_{j=1}^N \frac{1}{cwnd_j}} \quad (5)$$

则  $N$  个动态连接总的拥塞窗口增量为

$$\sum_{i=1}^N \Delta cwnd_i = \frac{B_{ava} \cdot RTT}{p_{size}} \quad (6)$$

通过上面的拥塞窗口动态调整策略,可以实现可用带宽的有效、公平分配。

#### (2) 网络层辅助的拥塞早期探测和通告机制

Sat-MTCP 采用卫星网关和卫星协作控制的方式实现对网络早期拥塞的检测和控制,该算法以 RED<sup>[13]</sup> 和 ECN<sup>[14]</sup> 算法为基础。在卫星网关处,执行随机早期丢弃策略(RED),在拥塞发生之前,按一定概率丢弃数据包,并通过向信源端反馈丢包信息来驱动拥塞控制算法。通过这种方式,可以加快信源对卫星网关处拥塞情况的检测和反应,避免造成持续性的拥塞情况,并且这种基于丢包的拥塞检测机制并不需要信源端的修改,可移植性强。

在星上队列处,执行改进的 ECN 策略:检测到网络的早期拥塞(即  $th_L < Q_{avg} < th_H$ )时,以概率  $p$  直接向 Sat-MTCP 协议的源端(即卫星网关)发送拥塞指示消息(congestion indicating message, CIM),而无须经接收端的反馈后才将拥塞情况通知卫星网关,  $p$  随  $Q_{avg}$  增大而增大;检测到  $Q_{avg} \geq th_H$  时,丢弃该数据包并向卫星网关发送 CIM。卫星网关收到卫星发来的拥塞指示后,执行拥塞控制算法,降低发送流量,从而缩短了拥塞检测和通告的时间,可以在较短的时间内缓解网络的拥塞现象。

卫星在向 OBB 存入数据包副本之前,需要首先检查 OBB 的占用情况,根据其占用率  $\eta_{OBB}$  进行相应操作。设定两个门限  $th_1$  和  $th_2$  ( $th_1 < th_2$ ),如果  $\eta_{OBB} \leq th_1$ ,则将数据包副本存入

OBB; 如果  $th_1 < \eta_{OBB} < th_2$ , 则将数据包副本存入 OBB, 同时向上行网关发送一个 OBB 状态报告 (onboard buffer state report, OBBSR); 如果  $\eta_{OBB} \geq th_2$ , 则不将该数据包存入 OBB, 同时向上行网关发送 OBBSR。

在网关处, 根据星上缓冲区状态报告 OBBSR 和队列拥塞指示消息 CIM, 采取相应的拥塞控制策略以避免拥塞, 如表 1 所列。

表 1 根据星上缓冲区状态报告和队列拥塞指示消息的拥塞控制策略

依据信息	条件	操作
OBBSR	$th_1 < \eta_{OBB} < th_2$	若 $R_{multicast} < R_{unicast}$ , 维持拥塞窗口不变; 否则, 将拥塞窗口减半
	$\eta_{OBB} \geq th_2$	若 $R_{multicast} < R_{unicast}$ , 将拥塞窗口减半; 否则, 将拥塞窗口置 1
CIM	任意	拥塞窗口减半

### 2.3 反馈抑制策略

为了避免确认风暴, 需要尽可能地减少反馈的数量, 因此在 Sat-MTCP 中采取了基于代表的反馈抑制策略。解决方法是: 首先把接收者分为若干子群 (subgroup), 同一子群的接收者之间由地面网络相连。每个子群有一个群首 (subgroup leader, SL), 群首负责本地恢复和应答。因此只要 SL 成功接收到卫星组播数据包, 就可以通过地面网络来恢复同一子群中其他接收者丢失的数据包, 可保证该子群的成功接收。在此基础上, 把每个子群看作一个虚拟接收者。对信源经过卫星到所有虚拟接收者的组播采取 2.1 节提出的基于异或编译码和重传矩阵预处理的差错恢复策略。

子群的建立过程如下: 如果一个卫星终端后面有组播组成员或者它本身就是组成员, 则该终端发出一条“LOOK\_FOR\_SL”消息, 同时设置一个定时器  $T_{SL}$ 。如果在  $T_{SL}$  超时之前收到来自某个 SL 的“IM\_SL”应答, 则加入该子群; 否则该卫星终端自立为 SL, 并建立一个子群。

为了进一步抑制反馈消息, 在所有群首中, 选择一个作为确认代表 (ack representative, AR), 负责对卫星应答。Sat-MTCP 规定, 只有 AR 可以发送 ACK 信号, 而其他 SL 在成功接收数据包时, 不反馈任何消息; 只有当它们检测到数据包丢失时, 才反馈 NAK 消息。根据这些 SL 发送 NAK 的情况, 就可以构造出重传矩阵 RM。

选择 AR 时, 采取类似 PGMCC 中 acker 的选择方法, 尽量选出丢包严重、应答慢的瓶颈接收者来负责应答。设定每个 SL 的选择函数 (selection function) 为  $F_i = RTT_i \cdot \sqrt{p_i}$ , 计算每个 SL 的  $F_i$  值, 选择  $F_i$  最大者作为 AR。

在组播通信过程中, 确认代表会发生动态改变。当卫星收到某一群首  $SL_j$  应答的 NAK 时, 比较  $F_j$  和当前 AR 的  $F$  值 (假设为  $F_i$ )。如果  $F_j > F_i$ , 则  $SL_j$  代替  $SL_i$  成为新的 AR; 否则, AR 不发生改变。

这种基于代表的应答策略大大减少了反馈消息的数量。但需要注意的是, 无论 AR 如何选择, 都不能保证组播通信完全可靠。如果其他 FL 的 NAK 消息在传输过程中发生丢包, 则卫星网关处会产生错误判断。为了解决这一问题, 除 AR 以外的其他 FL 需要每隔若干数据包 (通常可以设置这个间隔等于  $W_R^{max}$ ), 将一幅反映数据包接收情况的 Bitmap 发往卫星。卫星根据 Bitmap 更新重传矩阵, 并执行差错恢复策略。如果卫星网关的缓冲区占有率超过一定阈值  $th_c$  (默认 0.9),

则卫星网关主动向所有 FL 组播一个 ASK\_FOR\_BM 消息, 要求 FL 立即发送 Bitmap。在星上, 根据 Bitmap 反映的接收情况, 从星上缓冲区中清除那些被所有接收者成功接收到的数据包, 然后将一个聚合后的 Bitmap (各 FL 的 Bitmap 进行“与”操作) 发送至卫星网关, 并从网关缓冲区中清除已成功传输的数据包。

### 3 性能分析和仿真实验

本节通过仿真来分析分割连接的卫星可靠组播解决方案的性能。仿真网络结构如图 2 所示。

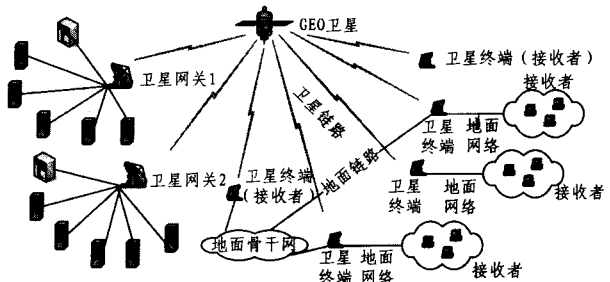


图 2 仿真拓扑结构图

该模型考虑  $2 \times 2$  的星上交换结构。包括 2 个组播信源、 $n$  个 TCP 信源、2 个上行网关节点 (分别对应两个星上交换机输入端口)、1 个 GEO 卫星节点、 $m$  个卫星终端和  $M$  个接收者。信源和接收者在各波束间均匀分布。发送端通过双向的地面链路连接到卫星网关, 接收端通过双向的地面链路与卫星终端相连。主要仿真参数如表 2 所列。

表 2 仿真参数

仿真参数	参数值
卫星链路往返时间 (RTT)	550ms
卫星链路带宽 ( $B_{sat}$ )	2.048Mbits/s
地面链路带宽 ( $B_{terr}$ )	100Mbits/s
卫星信道误码率 (BER)	$10^{-9} \sim 10^{-4}$
文件尺寸 ( $F_{size}$ )	10 Mbytes
数据包尺寸 ( $P_{size}$ )	1000bytes
接收者数量 (R)	5 ~ 100
重传窗口最大值 ( $W_R^{max}$ )	10
定时器 (TSL)	50ms
队列拥塞门限 ( $th_L, th_H$ )	0.3, 0.9
缓冲区拥塞门限 ( $th_1, th_2$ )	0.5, 0.9
最大队列长度 (Q)	50packets
卫星网关缓冲区尺寸 (GB)	0.2 ~ 1.8 Mbytes
星上缓冲区尺寸 (OBB)	0.2 ~ 1.8 Mbytes
接收缓冲区尺寸 (RB)	128kbytes

#### 3.1 Goodput 性能

有效吞吐量 (Goodput) 是指能正确到达目的端且不包括重传的流量。具体地说, 就是发送端发送的原始数据字节总量 (不包括重传的数据和协议控制开销) 与完成这些数据传输 (数据被所有接收者成功接收) 所用总时间的比值:

$$Goodput = \frac{Original\_Bytes}{Total\_Time} \quad (7)$$

与吞吐量 (Throughput) 相比, Goodput 不仅反映了拥塞控制的性能, 也反映了差错控制方案的好坏。对于可靠组播来说, 是个更加综合的评价指标。

先假设不存在单播数据流, 两个卫星网关各有一个组播数据流经过卫星传输。设接收者数量为 100, 其中 90 个接收者均匀分布于 10 个卫星终端后面; 另外 10 个接收者本身就

是卫星终端,直接接收卫星数据。这些卫星终端中,有 10 个是独立的,与其它终端没有地面网络相连;另外 10 个连接到一个骨干节点,它们到骨干节点的链路时延分别为 5, 10, 15, 20, 25, 25, 20, 15, 10, 5ms。设  $OBB = 1\text{Mbytes}$ ,  $GB = 1.4\text{Mbytes}$ 。分别采用 SCSRM 方案和 SRMTP<sup>[5]</sup> 方案时,组播数据流的 Goodput 随卫星信道误码率变化情况如图 3 所示。SRMTP 采用了滑动窗口传输方式,由于没有拥塞控制和流量控制机制,因此窗口尺寸在传输过程中是固定的,窗口尺寸  $W$  对系统性能有较大影响。图中不同曲线分别对应  $W = 200, 400, 600, 800, 1000\text{packets}$  的情况。

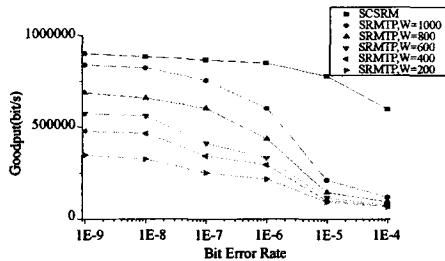


图 3 本方案和 SRMTP 对应不同误码率时的 Goodput 比较

从图 3 可以看出,卫星链路的误码率对本方案的 Goodput 性能影响不大。只有当误码率较高时,Goodput 才有所下降。而 SRMTP 的 Goodput 性能对卫星链路的误码率非常敏感,在低误码率条件下,SRMTP 可以通过增加窗口尺寸来获得较好的 Goodput 性能。但是当卫星链路误码率增大时,SRMTP 的 Goodput 性能严重变坏。这是因为在高误码率情况下,丢包非常严重,SRMTP 往往需要多次重传才能完成一个数据包的传输,频繁的重传造成系统 Goodput 性能严重下降。而 SCSRM 方案通过 Sat-MTCP 协议将高误码率的卫星网络与地面网络分开。在高误码率的卫星网络中,采用了基于异或编译码的差错重传方式,一次重传恢复多个丢失的数据包,大大减少了重传次数。同时,采用网络层辅助的拥塞通告策略,将拥塞丢包和链路差错丢包区分开来,避免了链路差错丢包造成传输速率不必要的减小,因此提高了系统 Goodput 性能。而且在流量控制中,采用基于带宽公平分配原则的拥塞窗口动态进化策略,保证了方案在高误码率、长延时的卫星网络中的有效性。

### 3.2 可扩展性

可扩展性 (scalability) 也是组播协议的一个重要评价指标,它是指随着接收者数量的增加组播系统吞吐性能的变化情况。可扩展性的好坏,反映了可靠组播方案在大规模应用环境中的适用性。图 4 给出了不同信道误码率情况下 Goodput 性能随接收者数量变化的情况。

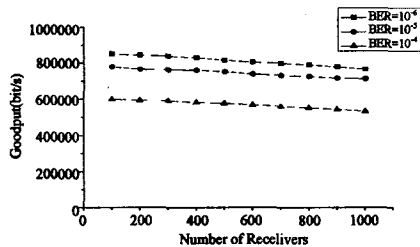


图 4 Goodput 随接收者数量变化的情况

从图中可以看出,当接收者数量增大时,Goodput 变化得非常缓慢,这就意味着本方案在接收者数量很大的情况下,依

然可以取得较好的吞吐性能,表现出良好的可扩展性,能够满足大规模组播的需要。这是因为 Sat-MTCP 中通过基于子群的本地恢复策略和基于代表的反馈抑制策略解决了反馈风暴问题,大大减轻了星上和发送方的压力。而且通过基于异或编译码和重传矩阵预处理的差错恢复策略,可以一次重传恢复多个接收者的丢包,大大减轻了丢失路径多倍性 (LPM) 问题,因此在接收者数量较大的情况下,本方案依然表现出良好的性能。

### 3.3 公平性

在上面的仿真中,假定只有一个组播数据流存在。然而在实际卫星网络中,往往会同时有多个单播和组播数据流经过卫星网关,这些数据流占用网络资源的公平性也是方案设计中需要重点考虑的一个技术指标。公平性的好坏,一般用公平性指数 (Fairness Index, FI) 来衡量:

$$FI = \frac{(\sum x_i)^2}{N(\sum x_i^2)} \quad (8)$$

其中,  $N$  为经过共享链路的数据流的数量,  $x_i$  为第  $i$  个数据流的吞吐量。

在下面考虑仿真场景中,每个卫星网关连接 1 个组播流和 5 个单播流。根据组播流和单播流传输控制协议的不同,仿真了以下 6 种方案,如表 3 所列。各方案中,组播接收者数量都是 100,  $GB = 1.4\text{Mbytes}$ ,  $OBB = 1\text{Mbytes}$ 。

表 3 根据单播和组播传输方式不同得到的 6 种仿真方案

仿真方案	Multicast	Unicast
Scheme 1	SCSRM	端到端 TCP Reno <sup>[15]</sup>
Scheme 2	SCSRM	端到端 TCP Peach <sup>[16]</sup>
Scheme 3	SCSRM	分割连接方案,发送端与卫星网关之间、接收端与卫星终端之间运行的都是 TCP Reno 协议,卫星网关与卫星终端之间采用类似 Sat-MTCP 的拥塞控制方式
Scheme 4	SRMTP	端到端 TCP Reno
Scheme 5	SRMTP	端到端 TCP Peach
Scheme 6	SRMTP	分割连接方案,发送端与卫星网关之间、接收端与卫星终端之间运行的都是 TCP Reno 协议,卫星网关与卫星终端之间采用类似 Sat-MTCP 的拥塞控制方式

对上述 6 种方案进行仿真,得到的 FI 随误码率的变化情况如图 5 所示。

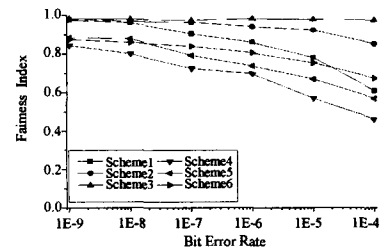


图 5 6 种仿真方案的公平性曲线

在 3 种采用 Sat-MTCP 方案传输组播 Session 的情景中 (Scheme 1, Scheme 2, Scheme 3), Scheme 1 表现出的带宽公平性最差。究其原因,并不是组播 Session 过度占用带宽,而是因为 TCP Reno 在卫星环境中会频繁地减小拥塞窗口来降低传输速率,造成 TCP 单播吞吐量严重下降。在 Scheme 2 中,由于单播传输采用针对卫星环境的 TCP Peach 协议,大大提高了高误码率环境中的 TCP 吞吐量,因此单播组播占用带宽的公平性也有了较大幅度的提高。在 Scheme 3 中,由于

单播组播都采用分割连接的方式,并且在卫星网络段均采用类似的拥塞探测方式和窗口进化策略,因此公平性最佳。这也说明,本文研究的分割连接的可靠组播方式以及卫星网络段采用的 Sat-MTCP 协议,不仅适用于卫星可靠组播传输,也可以为卫星单播可靠传输方案所借鉴。

### 3.4 缓冲区大小对系统性能的影响

在 Sat-MTCP 方案中,差错控制和拥塞控制策略都涉及到星上缓冲区 OBB 和地面网关缓冲区 GB 的设置,所以缓冲区大小对系统性能有较大影响。下面的仿真场景中考虑了 1 个组播 Session 与 5 个单播数据流共存的情况。其中组播流的传输采用 Sat-MTCP 方案,单播数据的传输采用 TCP Peach 方案,信道误码率设为  $10^{-6}$ ,组播接收者数量为 100。图 6 给出了组播 Session 的 Goodput 性能随着 OBB 和 GB 的变化而变化的情况。

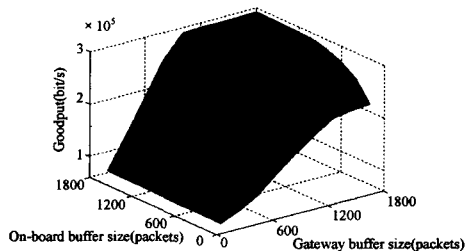


图 6 缓冲区大小对可靠组播 Goodput 性能的影响

从图中可以看出,OBB 和 GB 的大小对 Goodput 性能影响非常明显:随着 OBB 和 GB 的增大,Goodput 性能呈现上升趋势,当 OBB 和 GB 增大到一定值( $OBB \geq 1000$  packets,  $GB \geq 1200$  packets)时,Goodput 曲面变得平缓(图中的“平顶”部分),此时的 Goodput 性能主要受卫星信道速率的限制。进一步观察图 6 可以看出,当 GB 较小时,Goodput 性能随着 OBB 的变化幅度很小;即使将 OBB 设置为很大尺寸,Goodput 性能也没有明显的改善,这说明此时 GB 尺寸成为限制 Goodput 性能的瓶颈。要想获得性能上的提高,有必要增加卫星网关缓冲区的尺寸。

**结束语** 针对卫星网络高误码率、长延时等特点,本文提出了分割连接的卫星可靠组播方案 SCSRM,并设计了运行于卫星网络部分(卫星网关-卫星终端)的可靠组播传输控制协议 Sat-MTCP,描述了其差错控制策略、反馈抑制策略、拥塞通告策略和通信量调节方式。

仿真结果显示,SCSRM 方案的 Goodput 曲线随信道误码率的升高变化幅度不大。也就是说,即使在较差的信道条件下,也可以达到较好的 Goodput 性能;而且,由于采用了有效的反馈抑制策略和差错恢复策略,当接收者数量增大时,Goodput 性能基本保持平稳,表现出良好的可扩展性。仿真结果还说明,如果共用信道的单播组播数据流均采用类似 Sat-MTCP 的传输控制方式,可以实现较好的带宽公平性。此外,本文还分析了星上缓冲区(OBB)和卫星网关缓冲区(GB)尺寸对性能的影响。结果表明,OBB 和 GB 的大小对系统性能有非常明显的影响,Goodput 性能随着 OBB 和 GB 的增大而显著提高。然而,当 OBB 和 GB 增大到一定值的时候,由于链路带宽的限制,Goodput 曲面趋于平缓。这就为星上和网关缓冲区的设置提供了依据。

### 参考文献

[1] Akyildiz I F, Fang J. TCP-Peachtree: A Multicast Transport

Protocol for Satellite IP Networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2004, 22(2): 388-400

[2] Koyabe M W, Fairhurst G. Reliable Multicast via Satellite: A comparison survey and taxonomy[J]. International Journal of Satellite Communications, 2001, 19(1): 3-28

[3] Akkorz G, Hadjithedosioun M Y, Baras J S. Transport Protocols in Multicast via Satellite[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2004, 22: 611-627

[4] Chumchu P. Performance Analysis of Reliable Multicast Transport Protocols for GEO Satellite Networks[C]// Proceedings of the IEEE 12th Annual International Symposium (MASCOTS'04). San Jose, USA: IEEE Computer Society, 2004: 318-326

[5] Chen Wang, Leung V C M. Performance Evaluations of SRMTP for Reliable Multicasting over Satellite Networks[C]// Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference, March 2003: 1813-1818

[6] Cao G, Wu J. Reliable Multicast via Satellites[C]// Proceeding of International Conference on Information Technology, Coding and Computing. Las Vegas: IEEE Computer Society, April 2001: 183-190

[7] Wang Chen, Leung V C M. Performance Evaluations of SRMTP for Reliable Multicasting over Satellite Networks[C]// Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference, March 2003: 1813-1818

[8] Chen W, Leung C M V. A Reliable Multicast Transport Protocol for Broadband Satellite Networks[C]// IEEE 2002 International Conference on Communications, Circuits and Systems and West Sino Expositions. New York, USA: IEEE, 2002: 445-449

[9] Akkor G, Baras J S, Hadjithedosiou M. A Feedback Implosion Suppression Algorithm for Satellite Reliable Multicast[C]// IEEE Global Telecommunications Conference. San Francisco, USA: IEEE, 2003: 3765-3769

[10] Xu H, Wu S, Huang F. An Agent-based Reliable Multicast Transport Protocol for Satellite Networks[C]// MAPE2005: IEEE 2005 International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications. Beijing, China: IEEE Computer Society, 2005: 495-498

[11] 许辉, 吴诗其. 一种卫星网络中基于 Agent 的可靠组播传输协议[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(1): 166-168

[12] Liu G, Gu X, Guo Q. An Error Recovery Scheme for Satellite Direct-to-home Reliable Multicast Communication[C]// IET Proceedings for International Conference on Wireless, Mobile & Multimedia Networks (ICWMMN2006). Hangzhou, China, Nov. 2006: 1383-1385

[13] Floyd S, Jacobson V. Random Early Detection Gateways for Congestion Avoidance[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1993, 1(4): 397-413

[14] Ramakrishnan K, Floyd S. A Proposal to Add Explicit Congestion Notification (ECN) to IP. RFC 2481. 1999

[15] Allman M, Paxson V, Stevens W. TCP Congestion Control. IETF, Internet Request for Comments 2581, April 1999: 5-13

[16] Akyildiz I F, Morabito G, Palazzo S. TCP-Peach: A New Congestion Control Scheme for Satellite IP Networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2001, 9(3): 307-321