

面向 GEO 卫星网络的多速率多播拥塞控制机制

田 波¹, 蔡述庭²

(1. 铜仁学院信息工程学院, 贵州铜仁 554300; 2. 广东工业大学自动化学院, 广东广州 510090)

摘 要: 针对 GEO 卫星网络带宽时延积较大、拥塞控制机制不完善的问题, 提出了一种面向 GEO 卫星网络的多速率多播拥塞控制机制 MMCCM_GEO. 首先, 在保证接收端请求速率最大化的前提下, 将 GEO 卫星网络中的多速率多播问题转化为非线性优化问题, 并采用改进的模拟退火算法对其求解, 得到了最优的接收端请求速率. 其次, 通过采用代理节点实现反馈信息的汇集与丢失数据的恢复, 有效地解决了反馈内暴及数据恢复问题. 仿真结果表明, 与目前 GEO 卫星网络中典型的多速率多播拥塞控制机制相比, 本文的拥塞控制机制有效地提高了数据吞吐量和带宽利用率, 降低了 GEO 卫星网络中的数据传输时延, 同时也具备了更好的可扩展性.

关键词: GEO 卫星网络; 多速率多播; 拥塞控制; 模拟退火算法

中图分类号: TN927.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2016)07-1599-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.07.012

Multi-Rate Multicast Congestion Control Mechanism for GEO Satellite Network

TIAN Bo¹, CAI Shu-ting²

(1. Information Engineering College, Tongren University, Tongren, Guizhou 554300, China;

2. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510090, China)

Abstract: Due to the lower performance of congestion control mechanism and high production of bandwidth and delay, a multi-rate multicast congestion control mechanism for geosynchronous earth orbit (GEO) satellite network (MMCCM_GEO) was proposed. First, under the premise of maximizing the require rate of receivers, the multi-rate multicast congestion control problem for GEO satellite network was formulated as a nonlinear optimization problem, and the improved simulated annealing algorithm was employed to obtain globally optimal solution. Then, the issue with acknowledgement (ACK) implosion and loss data recovery was settled by proxy node. Simulation results reveal that the proposed mechanism obtains better throughput and bandwidth utilization, and achieves better scalability, compared with the typical conventional multi-rate multicast congestion control mechanism.

Key words: geosynchronous earth orbit (GEO) satellite network; multi-rate multicast; congestion control; simulated annealing algorithm

1 引言

基于静止地球轨道卫星 (GEO, Geostationary Earth Orbit) 的卫星网络由于广泛采用了星上处理技术, 已具备了解码、纠错、路由等信息处理和 IP 数据交换等功能. 其信号覆盖范围广、扩展性强, 能够较好地支持视频会议、实时信息发布等操作, 非常适合多播技术的应用^[1]. 目前, 针对多播协议的研究已较为深入, 但针对 GEO 卫星网络的多播拥塞控制方面的研究工作很少,

成果也不多^[2]. 由于 GEO 卫星网络存在传输不可靠、上/下行链路不对称等特点, 应用于地面网络中的一些典型的多播拥塞控制机制, 如 RLM、FLID-DL、PGMCC 等^[2,3], 由于没有针对 GEO 卫星网络的信道特征提供完善的多播拥塞控制机制, 未能有效地适应 GEO 卫星网络, 影响了多播技术在卫星网络中的应用.

因此, 设计合适的多播拥塞控制机制正成为面向 GEO 卫星网络的多播应用中一个重要研究方向. 文献

[4]为 GEO 卫星网络设计了一种基于 Agent 的多播传输协议. 通过多播组中选择合适的 Agent, 实现了相应的多播拥塞控制机制, 其有效性也在实验中得到了验证. 然而当多播组规模较大时, Agent 的更新过于频繁, 导致多播拥塞控制机制的可扩展性较低. 文献[5]为提高卫星网络中多播的带宽利用率, 在对 IP 数据包头的格式进行修改的基础上, 提出了一种面向 GEO 卫星网络的多路复用技术, 有效地降低了拥塞的发生概率. 但该方法未考虑到带宽利用的公平性问题. 文献[6]为解决 GEO 卫星网络的多播拥塞控制问题, 将可分级视频编码与跨层优化技术相结合, 提出了一种分层多播传输协议, 并完善了相应的多播拥塞控制机制. 然而该机制融合了物理层、链路层及网络层功能, 应用受到极大的限制. 文献[7]从提高卫星网络的抗误码性能的角度去考虑卫星网络中多播拥塞控制问题, 针对视频数据设计了两层前向纠错编码方案, 有效地提高了卫星网络中视频多播的鲁棒性. 文献[8]对 RLM 算法进行了改进, 将加入实验的方式从每次加入一个多播层调整为一次加入多个多播层. 但该方法中对吞吐量的计算过于简单, 并没有在实验中得到有效的验证.

综合来看, 目前在面向 GEO 卫星网络的多播拥塞控制研究工作中存在以下不足: (1) 目前的多播拥塞控制机制是由面向地面网络的拥塞控制机制改进而来, 缺乏对 GEO 卫星网络长时延、低可用带宽等因素的考虑, 存在带宽利用率低、时延及其抖动较大的不足; (2) 目前的多播拥塞控制需要精确计算 RTT、丢包率等信息, 可扩展性较差, 与 TCP 数据流共存时, 很难保证友好性. 考虑到这些不足, 本文提出了一种面向 GEO 卫星网络的多速率多播拥塞控制机制 (MMCCM-GEO). 将多播拥塞控制问题转化为一优化问题, 并采用改进的模拟退火算法进行求解, 进而得到最优的请求速率. 此外, 通过设置代理节点, 有效地解决了反馈内暴及数据恢复问题.

2 GEO 卫星网络的拓扑结构

本文考虑如图 1 所示的 GEO 卫星网络. 多播组的源端 (发送端) 通过网关将分层后的数据经上行链路传输至 GEO 卫星. 数据包在卫星上进行交换后, 传输至地面接收站, 各代理节点再将数据分发至接收端, 各接收端根据请求速率的大小完成加入/退出层的操作. 为便于对 GEO 卫星网络的多播拥塞控制进行研究, 关于图 1 有以下几点需要说明:

(1) 在 GEO 卫星网络中目前并不考虑多个 GEO 卫星之间的星际交换. 从覆盖范围、时延等角度分析, 星际交换并不适合语音、视频等主要的多播业务.

(2) 考虑到卫星网络中基于 IP 的多播路由协议的

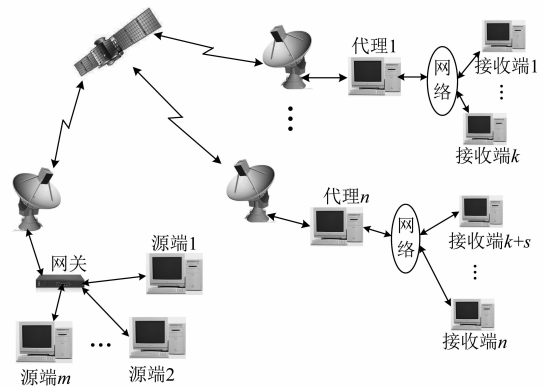


图1 面向GEO卫星网络的多播系统

特点^[9], 接收端与发送端并没有通过地面网络连接.

(3) 各代理节点之间没有通过地面网络互连. 此外, 一个接收端节点只从属于一个代理节点.

需要指出的是, 本文的多速率多播拥塞控制是一种基于接收端的控制机制, 故对由 GEO 卫星上的转发器故障所导致的数据中断、丢失等不作考虑. 事实上, 由 GEO 卫星上的转发器导致网络拥塞的概率极低, 多播组中的拥塞一般是由地面网络引起^[6].

3 多速率多播拥塞控制模型

从图 1 不难看出, 可以采用无向图 $G(N, E)$ 对图 1 所示的 GEO 卫星网络进行描述. 设 $N = \{N_0, N_1, N_2, \dots, N_n\}$ 为卫星网络中的节点集合, $E = \{e_0, e_1, e_2, \dots, e_L\}$ 为各边 (传输链路) 的集合. 设各边的链路容量为 $C(e_i)$, $0 \leq i \leq L$. 多播任务的集合为 $M = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$, 其中第 j 个多播任务可表示为 $m_j = (S, D_j)$, $1 \leq j \leq K$, S 表示该多播任务的源节点, $D_j = \{r'_0, r'_1, r'_2, \dots, r'_Q\}$ 为该多播任务接收端节点的集合. 以 $b(e_{i,j})$ 表示第 j 个多播任务在第 i 个链路上的请求带宽 (速率) 大小, 则 $b(e_{i,j})$ 的大小应是该多播任务中所有共享该链路的各接收端节点请求速率的最大值, 即

$$b(e_{i,j}) = \max_{(p,j) \in V(i,j)} R(r'_p) \quad (1)$$

其中 $0 \leq p \leq Q$, $R(r'_p)$ 为接收端 r'_p 的请求速率, $V(i,j)$ 为第 j 个多播任务中流经链路 i 的接收端的集合. 从而有

$$\sum_j b(e_{i,j}) \leq C(e_i) \quad (2)$$

其中 $0 \leq i \leq L$, $1 \leq j \leq K$. 此外, 根据文献[10]的分析, 各接收端分别对应一个单调递增且严格凹的二阶连续可微的效用函数 $U(r'_p)$. 但对于如何定义该函数, 却并没有相关文献对其进行分析. 考虑到效用函数对多播拥塞控制建模的准确性及求解的实时性具有重要意义, 借鉴文献[10, 11]的思路, 定义如下形式的效用函数

$$U(r'_p) = \sigma (b(e_{i,j}))^2 + \xi \ln b(e_{i,j}) + \nu \quad (3)$$

其中 $0 \leq p \leq Q, \sigma, \xi, v$ 为常数, 其值由实验中取得^[10], 这里分别取 1.79、2.40、2.87. 事实上, 式(3)表明在避免拥塞的前提下, 应使接收端对应的效用函数最大化. 因此, 可将 GEO 卫星网络中多速率多播拥塞控制转化为下列极值问题

$$\begin{aligned} \max & \left(\sum_j^K \sum_p^Q U(r_p^j) \right) \\ \text{s. t.} & \sum_j^k b(e_{i,j}) \leq C(e_i) \end{aligned} \quad (4)$$

4 拥塞控制模型的求解

对于形如式(4)的问题, 文献[11]分析了多种求解方法. 由于 GEO 卫星网络存在数据传输时延较大、往返时延不对称的特点, 传统方法在求解精度及实时性方面难以满足要求. 考虑到模拟退火算法与其它智能算法相比, 具有收敛速度快、可求出全局最优解的优点, 结合 GEO 卫星网络的特点, 本文采用改进的模拟退火 (Simulated Annealing, SA) 算法求解形如式(4)的多速率多播拥塞控制问题.

4.1 初始解及模型扰动

模拟退火算法的理论基础为 Boltzmann 概率分布和 metropolis 准则. 为便于求解, 首先将式(4)转换为无约束优化问题^[11], 即

$$\max \left(\sum_j^K \sum_p^Q U(r_p^j) \right) = \max \left(\sum_j^K \sum_p^Q U(r_p^j) - \rho P(e) \right) \quad (5)$$

其中 $P(e) = \max \left\{ 0, \sum_j^k b(e_{i,j}) - C(e_i) \right\}$, ρ 为惩罚因子. 首先, 为保持解集的完备性, 将解集 S 定义为 $S = \{r_p^j\}$. 初始解 $x = \{r_0^j, r_1^j, \dots, r_p^j\}$, 其中 $r_0^j, r_1^j, \dots, r_p^j = 0.75B_{\text{upload}}/n, B_{\text{upload}}$ 为 GEO 卫星网络上行链路的带宽, n 为接收端节点的个数.

此外, 新解是通过当前解的扰动得到的, 为提高收敛速度, 采用与文献[12]中 VFSA 算法相同的方式求取新解, 即

$$x' = x' + y(h-l) \quad (6)$$

$$y = T \text{sgn}(r-0.5) \left((1+1/T)^{|2r-1|} - 1 \right) \quad (7)$$

其中 r 为 0 至 1 之间的随机数, $[l, h]$ 为解的取值范围, T 为当前温度, $\text{sgn}(\cdot)$ 为取符号函数. 显然, 在本文的拥塞控制模型中, 由于各接收端的请求速率不会超过各链路容量, 即有 $l=0, h=C(e_i)$.

4.2 SA 中的控制参数的改进

初始温度 T_0 取为 $B_{\text{upload}} \cdot n$, 其中 n 为接收端节点数量. 相应退火计划, 即温度的衰减参数 T_k 表示为

$$T_k = \alpha T_0, k \geq 1 \quad (8)$$

其中 α 为温度衰减率, 本文取 0.95. Markov 链长度 L_m ,

也即同一温度下的迭代次数, 取 $L_m = n\beta$, 其中 β 为常数, 这里取 100.

此外, 按照 metropolis 准则, 对第 j 个多播任务而言, 与新解相对应的接收概率为

$$U(x \rightarrow x') = \begin{cases} 1, & U(x') \leq U(x) \\ \exp\left(\frac{U(x) - U(x')}{T_k}\right), & U(x') > U(x) \end{cases} \quad (9)$$

其中 $U(x) = \sum_{i=0}^n \left(\frac{1}{\sigma (b(e_{i,j}))^2} + \xi \ln b(e_{i,j}) + v \right)$, n 为接收端节点的数量. 事实上, 上述 Metropolis 准则只是 Tsallis 准则的特殊情况, 在低温下的搜索能力较低, 易导致 SA 陷入局部最优. 为提高 SA 在低温下的搜索能力, 扩展其解空间的搜索范围, 采用如下的接收概率

$$U(x \rightarrow x') = \begin{cases} 1, & U(x') \leq U(x) \\ \frac{\exp(2T_k) - 1}{\exp(2T_k) + 1}, & U(x') > U(x) \end{cases} \quad (10)$$

可以看出, 式(10)可保证在低温时对解空间的搜索更加充分, 其有效性也在实验结果中得到了体现.

4.3 MMCCM-GEO 的实现步骤

在上述两小节的基础上, 得到 MMCCM-GEO 的实现步骤如下:

(1) 产生初始解 $x = \{r_0, r_1, \dots, r_p\}$ 及初始温度 $T_0 = B_{\text{upload}} \cdot n$, 将 l, c, d 赋初值为 0.

(2) 按式(6)、(7)求得新解 x' .

(3) 计算能量的增量 $\Delta U = U(x') - U(x)$, 判断 $\Delta U < 0$ 是否成立, 如成立则执行 $x = x', l = l + 1$; 否则根据式(10)判断 $(\exp(2T_k) - 1) / (\exp(2T_k) + 1) > \text{random}()$ 是否为真, 如为真则执行 $x = x'$ 与 $l = l + 1$, 否则转向步骤(2).

(4) 判断 $l > L_m$ 是否成立, 如成立则执行 $c = c + 1$, 此时如 c 的值为 1 则执行 $x_{\text{prev}} = x$, 并转向步骤(4); 如 $l > L_m$ 不成立, 则转向步骤(2).

(5) 按式(8)进行温度的衰减, 并判断 $T_k \leq 0$ 是否成立, 如成立则转向步骤(6); 如不成立则判断 $x = x_{\text{prev}}$ 是否成立, 如成立则执行 $d = d + 1, x_{\text{prev}} = x$. 最后判断 $d = 5$ 是否成立, 成立则转向步骤(6), 否则执行 $x_{\text{prev}} = x$ 并转向步骤(2).

(6) 输出矢量 x 的值, 即为各接收端的请求速率.

(7) 结束.

大量实验结果表明, 模拟退火算法在离结束温度很远时, 极有可能就得到最优解^[13]. 因此, 在上述流程中, 变量 x_{prev} 保存了上一温度下求得的解, 如连续 5 次求得的解相同, 则终止降温过程, 输出最优解, 以提高求解的实时性.

5 接收端的层调整方法

在多速率多播方式中,多播组的源节点将数据以分层的方式进行编码,即将数据分成一个基本层与多个增强层,各层分别采用不同的多播组进行传输.设数据分成 η 层,则第 φ 层($1 < \varphi \leq \eta$)是对以下 $\varphi - 1$ 层的增强和补充,其累积速率可表示为 $\varphi_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^{\varphi} r_i$,其中 r_i 为第 i 层对应的速率.采用4.3节的方法计算出各接收端节点请求速率后,判断当前请求速率是否大于当前累积速率.如是,且当前层不是最高层,则接收端加入更上一层数据所在的多播组,否则退出当前层.值得指出的是,接收端以时长 τ 为间隔采用4.3节的算法求得各接收端节点请求速率,再进行层的加入与退出操作.

6 数据恢复策略

由于 GEO 卫星网络的传输链路易受天气等因素的影响,数据传输过程中不可避免地会出现出错、丢包等现象.在本文的多速率多播拥塞控制机制 MMCCM_GEO 中,代理节点负责对 NAK 数据包进行汇总及反馈.如多播组的接收端节点没有收到正确的数据包,则发送一个 NAK 数据包至代理节点.当一个 NAK 到达代理节点时,一个定时器会被启动.此后,代理节点会在自身的缓存中搜索丢失的数据包,如有则将此数据包直接发送给接收端.如没有,则将此 NAK 多播至本代理节点所属区域的其它节点,如其它节点缓存中有相关的数据包,则将其发送至代理节点,再转发给发送该 NAK 数据包的接收端节点.如在代理节点及其它接收端节点都没有该数据包或在定时器超时后,代理节点将该 NAK 通过 GEO 卫星网络的反向链路传输至多播组的源节点,再由源节点重传该数据包.

值得指出的是,上述数据恢复方法充分考虑到卫星网络反向链路带宽较小的特点,有效地解决了反馈风暴及丢失路径多样化的问题.目前典型的 GEO 卫星网络中的多播机制采用的是对代理节点进行动态选取的方法,虽然从理论上可以均衡网络流量,但代理节点的动态选取与调整算法复杂度较高,在网络规模较大时性能显著降低^[14].MMCCM-GEO 采用了固定的代理节点,适应性强,代价较小,在提高网络带宽利用率方面也有较大的优势.

7 仿真实验结果及分析

考虑到在实际的 GEO 卫星网络中难于准确而重复地实现不同参数条件下的网络环境,利用仿真软件 OPNET Modeler 14.5 建立了基于 GEO 的卫星网络仿真系

统,其拓扑结构如图 2 所示.由于在网关中集成了编码、调制、发送/接收功能,故在图 2 中未画出地面站的发送及接收天线等设备.此外,将卫星上行链路的带宽设置为 2Mbps,地面网络的带宽为 100Mbps.数据包大小为 1000 字节,仿真持续时间为 550s,时间间隔 τ 取 2.5s.为验证本文提出的多播拥塞控制机制的性能,将本文的控制机制 MMCCM-GEO 与目前 GEO 卫星网络中使用较为广泛的多速率多播拥塞控制机制 TFMCC 进行对比^[15].源端 1 与源端 2 分别采用 MMCCM-GEO 和 TFMCC 将数据发送至接收端 1、2、3、4.数据被编码为 1 个基本层与 7 个增强层,分别通过不同的多播组进行传输.此外,仿真系统中接收端的节点数量可以方便地进行增加与减少.

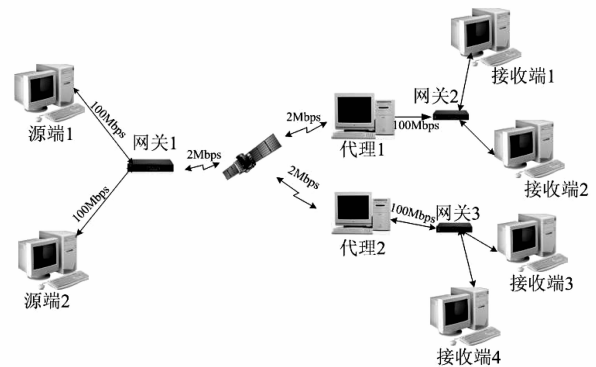


图2 GEO卫星网络的拓扑结构

首先,在同样的网络参数条件下,比较了使用 MMCCM-GEO 与 TFMCC 时 GEO 卫星网络的吞吐量,如图 3 所示.不难看出,MMCCM-GEO 由于在效用函数最大化的前提下对各接收端节点请求速率进行了优化选取,显著提高了网络吞吐量,在信道误码率较高、服务质量波动较大的 GEO 卫星网络传输环境中具有更好的带宽利用率.

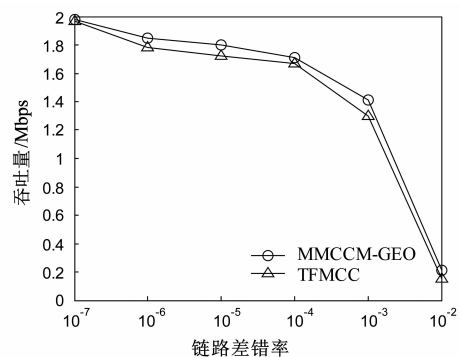


图3 吞吐量对比图

其次,可扩展性是衡量多速率多播拥塞控制机制性能的一个重要指标.即当多播组的接收端节点数较多时,性能较好的多速率多播拥塞控制机制仍然具备

较高的吞吐量.因此,测试了不同数量的节点在数据误码率为 10^{-6} 时,两种拥塞控制机制所对应的吞吐量,结果如图 4 所示.从图 4 中可看出,MMCCM-GEO 在多播组的规模较大时,吞吐量仍优于 TFMCC,说明 MMCCM-GEO 具备更好的可扩展性.

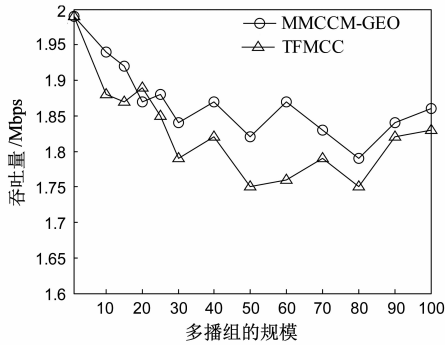


图4 不同拥塞控制机制的可扩展性对比

表 1 为 MMCCM-GEO 求得的接收端节点请求速率均值与其对应的全局最优解的对比.其全局最优解通过标准的模拟退火算法得出^[16].可以看出,MMCCM-GEO 求得的请求速率与文献[16]中全局最优解的误差非常小,其相对误差在 0.5122 ~ 1.9691 之间.表明在具有较好实时性的前提下,求得的解很接近最优解.

图 5 为 MMCCM-GEO 与 TFMCC 的平均时延对比.从图 5 可看出,由于优化了各接收端节点请求速率,

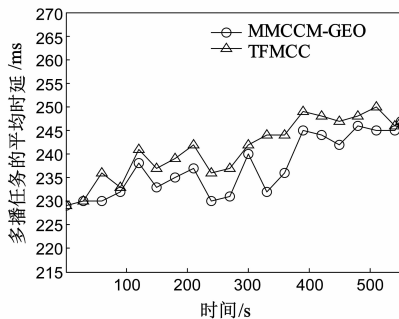


图5 不同拥塞控制机制的平均时延对比

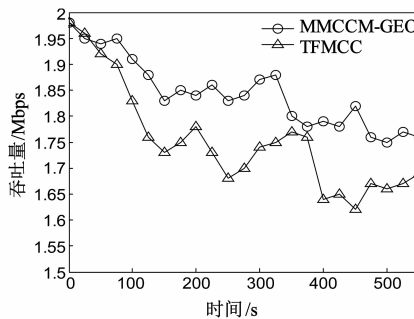


图6 不同拥塞控制机制的吞吐量对比

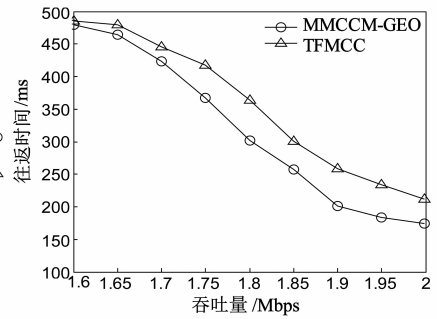


图7 不同拥塞控制机制的往返时间对比

表 1 MMCCM-GEO 求得的解与最优解的对比

接收端节点	多播任务	本文方法的解 (kbps)	全局最优解 (kbps)	相对误差 (%)
1	多播 1	229.2109	224.7846	1.9691
	多播 2	217.7092	219.3284	0.7382
2	多播 1	221.4002	217.1926	1.9372
	多播 2	219.0039	215.7621	1.5024
3	多播 1	217.0093	215.9034	0.5122
	多播 2	221.1107	224.2904	1.4176
4	多播 1	214.3850	211.8037	1.2187
	多播 2	221.9371	224.4206	1.1066

采用代理节点对丢失的数据包进行恢复,MMCCM-GEO 可获得更小的传输时延,有效地提高了 GEO 卫星网络中数据传输的实时性.

图 6 显示了平均吞吐量与时间的对应关系.从图 6 可知,MMCCM-GEO 的平均吞吐量优于 TFMCC,表明 MMCCM-GEO 方法显著改善了网络服务质量.此外,为衡量 GEO 卫星网络长时延环境下拥塞控制机制的性能,比较了当吞吐量不同时,MMCCM-GEO 和 TFMCC 所对应的往返时间,其结果如图 7 所示.可见,MMCCM-GEO 显著减少了数据包的往返时间,提高了数据传输的实时性,表明其在 GEO 卫星网络长时延的传输环境下能提供更好的网络服务质量,同时也具备了更强的适应能力.

8 结束语

本文在分析现有多速率多播拥塞控制机制优缺点的基础上,针对 GEO 卫星网络提出了一种新的多速率多播拥塞控制机制.首先建立了面向 GEO 卫星网络的拥塞控制模型,然后采用改进的模拟退火算法对多速率多播拥塞控制问题进行求解,得到了优化的接收端请求速率,有效地提高了网络吞吐量.此外,通过代理节点进行错误恢复,保证了数据的完好率,同时显著降低了 GEO 卫星网络中的数据传输时延.仿真实验结果表明,本文的多速率多播拥塞控制机制不但有效地提高了网络吞吐量,而且获得了较好的网络服务质量.下

一步的工作是在本文的基础之上,完善多层卫星网络中的多播拥塞控制机制.

参考文献

[1] 冯少栋,李广侠,张更新,等.一种适合宽带多媒体卫星通信系统的异步突发时间计划生成方法[J].电子学报,2012,40(9):1802-1808.
Feng Shao-dong, Li Guang-xia, Zhang Gen-xin, et al. An asynchronous burst time plan generation method for broadband satellite multimedia system[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(9): 1802-1808. (in Chinese)

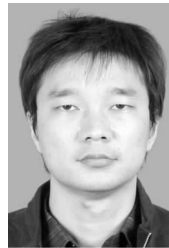
[2] Emrick R, Cruz P, Carvalho N B, et al. The sky's the limit:

- key technology and market trends in satellite communications [J]. IEEE Microwave Magazine, 2014, 15 (2) : 65 - 78.
- [3] Rao Y, Wang R C. Multi-path Qos routing using genetic algorithm for LEO satellite networks [J]. Chinese Journal of Electronics, 2011, 20(1) : 17 - 20.
- [4] 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 - 170.
Xu Hui, Wu Shi-qi. An agent-based reliable multicast transport protocol for satellite networks [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(1) : 166 - 170. (in Chinese)
- [5] Shuichi A, et al. Efficient multiplexing scheme for IP packets over the advanced satellite broadcasting system [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2009, 55(1) : 49 - 55.
- [6] David P, Vazquez M A. Num-based fair rate-delay balancing for layered video multicasting over adaptive satellite networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(5) : 969 - 978.
- [7] Barsocchi P, Oligeri G. Quality of experience in multicast hybrid networks: avoiding bandwidth wasting with a double-stage FEC scheme [J]. IET Communications, 2010, 4 (13) : 1573 - 1579.
- [8] Karan S, Rama S Y. Multilayer joining for receiver driven multicast congestion control [A]. Procedia Technology (Proceedings of the 2nd International Conference on Computer, Communication, Control and Information Technology) (Vol. 4) [C]. Holland: Elsevier, 2012. 151 - 157.
- [9] 程连贞, 刘凯, 张军, 等. 适于低轨卫星 IP 网络的特定源组播算法 [J]. 电子学报, 2007, 35(6) : 1051 - 1055.
Cheng Lian-zhen, Liu Kai, Zhang Jun, et al. Source-specific multicast algorithms for LEO satellite IP networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35 (6) : 1051 - 1055. (in Chinese)
- [10] 徐伟强, 等. 用于 Ad Hoc 网络的自适应多速率多播拥塞控制策略 [J]. 软件学报, 2008, 19(3) : 770 - 779.
Xu Wei-qiang, et al. Adaptive congestion control strategy for multi-rate multicast sessions in Ad Hoc networks [J]. Journal of Software, 2008, 19 (3) : 770 - 779. (in Chinese)
- [11] Hermando L, et al. An evaluation of methods for estimating the number of local optima in combinatorial optimization problems [J]. Evolutionary Computation, 2013, 21 (4) : 625 - 658.
- [12] Wang L, et al. Optimal operation strategies for batch distillation by using a fast adaptive simulated annealing algorithm [A]. Proceedings of the Tenth World Congress on Intelligent Control and Automation [C]. Beijing: IEEE, 2012. 2426 - 2430.
- [13] 许鹏飞, 苗启广, 等. 基于函数复杂度的自适应模拟退火和禁忌搜索新算法 [J]. 电子学报, 2012, 40(6) : 1219 - 1222.
Xu Peng-fei, Miao Qi-guang, et al. Adaptive simulated annealing algorithm and tabu search algorithm based on the function complexity [J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40 (6) : 1219 - 1222. (in Chinese)
- [14] Yamamoto Y, Itsumi H, Yamamoto M. Proxy-based multicast congestion control for ad hoc networks [A]. Proceedings of the Eighth Asia-Pacific Symposium on Information and Telecommunication Technologies [C]. Ku-ching: IEEE, 2010. 1 - 6.
- [15] Yue S, Cao Y. An improved TFMCC protocol based on end-to-end unidirectional delay jitter [A]. Proceedings of the IEEE Thirteenth International Conference on Communication Technology [C]. Jinan: IEEE, 2011. 1028 - 1032.
- [16] 陈皓, 崔杜武, 严太山, 等. 基于竞争指数的模拟退火排序选择算子 [J]. 电子学报, 2009, 37(3) : 587 - 591.
Cheng Hao, Cui Du-wu, Yan Tai-shan, et al. Race exponent based simulated annealing rank selection operator [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(3) : 587 - 591. (in Chinese)

作者简介



田波男, 1978年9月出生, 湖南怀化人. 2014年获广东工业大学博士学位, 现为铜仁学院信息工程学院讲师, 主要研究方向为视频编码及传输、机器视觉.
E-mail: tianbomail@163.com



蔡述庭男, 1979年2月出生, 湖南益阳人. 2011年获广东工业大学博士学位, 现为广东工业大学自动化学院副教授、硕士生导师, 主要研究方向为分布式视频编码及传输、机器视觉.
E-mail: shutingcai@gdut.edu.cn