

深空 DTN 多属性决策拥塞控制的研究

黄晓军, 林亚平

(湖南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410082)

摘要: 针对深空时延容忍网络(DTN)因节点存储空间有限造成的拥塞问题,提出了一种改进的多属性决策选择下一跳节点的策略。其基本思想是根据节点的存储空间占用率将节点状态划分成普通、半拥塞和拥塞三个状态,结合节点接收数据包的历史记录,在此基础上采用多属性决策理论选择最优的下一跳节点,从而达到预防拥塞的目的。仿真结果表明,与原策略相比,提出的策略在单个节点队列长度、平均队列长度、数据包接收率和数据包平均分发时间上有明显的改善,有效地缓解了网络拥塞。

关键词: 深空通信; 时延容忍网络; 拥塞控制; 多属性决策; 下一跳节点; 节点状态

中图分类号: TN927.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)12-4694-05

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.12.076

Research on congestion control mechanism of multi-attribute decision making in deep-space DTN

HUANG Xiao-jun, LIN Ya-ping

(College of Information Science & Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: For congestion in deep-space DTN was mainly caused by the limited node memory space, this paper proposed an improved strategy for multi-attribute decision making to select the next hop node. The basic idea of the improved strategy was to divide the node status into normal, semi-congestion and congestion states according to the node storage occupancy, combined with the packet received history and then used multi-attribute decision theory to select the best next hop node, so as to achieve the purpose of prevention of congestion. Simulation results show that the improved strategy is more effective than the original one in the single node's queue length, average queue length, packet acceptance rate and the average packet distributed time. It alleviates the congestion effectively.

Key words: deep-space communication; delay tolerant network(DTN); congestion control; multi-attribute decision making; next-hop node; node status

0 引言

随着航天事业的发展,深空探测是人类在新世纪的三大航天活动之一^[1,2],集中显示了一个国家的科技发展水平和综合国力,在政治、经济、科学和军事方面具有重要而长远的意义^[3]。深空探测主要是为了获取空间和宇宙的信息,包括对其研究的科学数据、文件、声音和图像等,因此确保通信系统的正常运行以及数据的可靠传输是深空探测的重要任务之一^[3~5]。深空通信网络包括星际(骨干)网络、行星卫星网络和行星地表网络三部分^[6],其中星际网络具有传播时延长^[7]、链路误码率高^[7]、信号易中断^[8]和通信带宽不对称^[7]等特点,其性能是决定整个深空通信能否成功的最关键因素。传统的网络由于通信带宽和传播距离的约束,已不适用于星际网络。

近年来,时延容忍网络(DTN)^[9]获得了越来越多的关注,在无线传感网络、移动自组织网络和星际网络等端到端通信难以完成传播的网络中得到了广泛的应用。DTN是一种新型的网络体系结构,其Bundle协议^[10]提供的逐跳保管传输服务能有效应对深空通信的特点。在深空DTN中,传统的拥塞控制机制无法起到明显的效果,关于深空DTN拥塞控制的研究并

没有得到足够的重视,相关的文献较少,主要包括数据包存储管理、下一跳选择机制和流量控制三个方面。其中数据包存储管理和流量控制属于被动的拥塞控制。

文献[11]针对拥塞发生在深空DTN网关节点的情况,提出了基于价格规则模型的存储管理机制,节点根据收益和风险决定是否接受数据包。文献[12]提出的方法要求节点根据消息的优先级和TTL决定是否接受该消息。文献[13]提出了一种基于信用的拥塞控制方法来保证低副本率和高传输率。文献[14]提出了适用于DTN体系结构的逐跳流量控制机制。文献[15]提出将拥塞节点的数据包转移到邻居节点以缓解拥塞,文献[16~18]都是对它的改进,但该机制不适用于星际网络中节点间距离很大的情况。文献[19]在文献[15]选择下一跳邻居概念的基础上提出了多属性决策选择下一跳节点传输的预防拥塞控制机制,改善了下一跳选择在深空DTN中的应用。但该方法仍然存在不足:a)没有突出存储空间有限是造成网络拥塞的关键原因;b)数据包在多个DTN节点间存在徘徊问题。

本文在文献[19]的基础上,针对其存在的不足,提出了一种改进的多属性决策拥塞控制机制,通过划分节点状态以突出

收稿日期: 2012-05-07; 修回日期: 2012-06-27

作者简介: 黄晓军(1987-),男,硕士研究生,主要研究方向为传感器网络(xiaojun5566cn@yahoo.com.cn);林亚平(1955-),男,教授,博士,主要研究方向为传感器网络、机器学习等。

存储空间的重要性,同时记录节点接收数据包的历史记录,避免产生徘徊问题来达到进一步提高预防拥塞效果的目的。仿真结果表明改进后的拥塞控制机制有效解决了原机制的两个问题,并在单个节点队列长度、平均队列长度、数据包接收率和数据包平均分发时间四个方面得到有效改善,但同时也增加了节点的运算量,消耗了更多的缓存空间。

1 多属性决策拥塞控制

多属性决策(MADM)拥塞控制机制是指在周期时间 T 内,节点与其邻居节点之间交换相关网络信息,采用多属性决策理论方法^[20]对信息进行分析后选出当前节点的最优下一跳节点的拥塞预防策略。

1.1 相关概念

定义 1 属性。节点与其邻居节点之间交换的网络信息称为属性,如节点空间占用率、链路带宽等。用变量 $\hat{X}_{jk}^n(t)$ 表示节点 n 在时刻 t 选择的下一跳节点为 $j(j \in [1, J])$ 时属性 $k(k \in [1, K])$ 的值。

定义 2 消耗属性。对通信有抑制作用的属性称为消耗属性,其值越大,越不利于通信,如存储空间占用率等。

定义 3 收益属性。对通信有促进作用的属性称为收益属性,其值越大,越有利于通信,如链路带宽等。

定义 4 规则属性值。为保证每个属性的权重一致,选择邻居节点中每个属性的最大值,将每个属性值除以相应属性最大值后得到的值称为规则属性值,用变量 $X_{jk}^n(t)$ 表示,计算公式如下:

$$X_{jk}^n(t) = \hat{X}_{jk}^n(t) / \max_j \hat{X}_{jk}^n(t) \quad (1)$$

定义 5 最优虚拟节点。选择邻居节点中各消耗属性的最小规则属性值和各收益属性的最大规则属性值组成集合,该集合称为最优虚拟节点,用变量 $id X_k^n$ 表示,选择公式如下:

$$id X_k^n = \begin{cases} X_{jk}^n : j = \arg \min_{j \in [1, J]} X_{jk}^n & \text{对于消耗属性} \\ X_{jk}^n : j = \arg \max_{j \in [1, J]} X_{jk}^n & \text{对于收益属性} \end{cases} \quad (2)$$

定义 6 最差虚拟节点。与最优虚拟节点相反,选择邻居节点中各消耗属性的最大规则属性值和各收益属性的最小规则属性值组成集合,该集合称为最差虚拟节点,用变量 $nadir X_k^n$ 表示。

1.2 多属性决策理论方法

1.2.1 SAW 方法

SAW(simple additive weighting)方法的原理是分别计算每个邻居节点的所有规则属性值之和,取和最小的节点作为下一跳,计算公式如下:

$$J_{opt}^{n, SAW}(t) = \{j^n = \arg \min_{j \in [1, J]} \sum_{k=1}^K X_{jk}^n(t)\} \quad (3)$$

其中, $J_{opt}^{n, SAW}(t)$ 表示节点 n 在时刻 t 采用 SAW 方法选取的最优下一跳节点。

1.2.2 MDUP 方法

MDUP(minimum distance with utopia point)方法的原理是计算每个邻居节点与最优虚拟节点之间规则属性的欧几里德距离,取距离最小的节点作为下一跳。计算公式如下:

$$J_{opt}^{n, MDUP}(t) = \{j^n = \arg \min_{j \in [1, J]} \left[\sum_{k=1}^K (X_{jk}^n - id X_k^n)^2 \right]^{1/2}\} \quad (4)$$

其中, $J_{opt}^{n, MDUP}(t)$ 表示节点 n 在时刻 t 采用 MDUP 方法选取的最

优下一跳节点。

1.2.3 TOPSIS 方法

TOPSIS(technique for order preference by similarity to ideal solution)方法的原理是分别计算每个邻居节点与最优虚拟节点和最差虚拟节点之间的欧几里德距离,取与最差虚拟节点的距离占与最差和最优虚拟节点距离之和比重最大的节点作为下一跳。计算公式如下:

$$J_{opt}^{n, TOPSIS}(t) = \{j^n = \arg \max_{j \in [1, J]} \frac{S_j^{ng}}{S_j^{ps} + S_j^{ng}}\} \quad (5)$$

其中: S_j^{ng} 表示邻居节点 j 与最差虚拟节点的欧几里德距离; S_j^{ps} 表示邻居节点 j 与最优虚拟节点的欧几里德距离; $J_{opt}^{n, TOPSIS}(t)$ 表示节点 n 在时刻 t 采用 TOPSIS 方法选取的最优下一跳节点。

1.3 存在问题

1.3.1 选择拥塞节点作为下一跳

在节点选择下一跳时,常常因为某些属性值过于良好而选择较为拥塞的节点作为下一跳。如图 1 所示,假设节点 R_1 存储空间占用率为 95%,可用带宽为 10 000 kbit,节点 R_2 存储空间占用率为 10%,可用带宽为 100 kbit,通过 SAW、MDUP 和 TOPSIS 方法计算得出的最优下一跳节点分别是 R_2 、 R_1 和 R_1 。节点 R_1 存储空间占用率已经达到 95%,如果再接收数据包则会更加拥塞,影响整个网络的性能。

1.3.2 数据包徘徊问题

网络中存在某几个节点的属性优于其他节点,导致数据包在这几个节点中反复传输,直到生存周期结束也未到达目的节点。如图 1 所示,假设节点 R_1 的最优下一跳为 R_2 ,节点 R_2 的最优下一跳为 R_1 ,则数据包到达 R_1 或 R_2 后,不再传递给 R_3 ,造成数据包的间接丢失。

2 基于节点状态记录的拥塞控制

为解决选择拥塞节点作为下一跳和数据包徘徊的问题,本文在多属性决策拥塞控制中引入了节点状态和数据记录的方法,在一定程度上有效地避免了网络拥塞,提高了网络的性能。

2.1 节点状态的划分

根据节点的存储空间占用率和在特定存储空间占用率上的持续时间,将节点状态划分为普通状态(NS)、半拥塞状态(semi-CS)和拥塞状态(CS)。

节点状态的划分公式表示如下:

$$state(n) = \begin{cases} NS & \text{if } \int [R(t), t, t + \Delta\tau_1] < \alpha \\ \text{semi-CS} & \text{if } \int [R(t), t, t + \Delta\tau_1] \geq \alpha \\ CS & \text{if } \int [R(t), t, t + \Delta\tau_2] \geq \beta \end{cases} \quad (6)$$

其中: $state(n)$ 表示节点 n 的状态; $\Delta\tau_1$ 表示半拥塞持续时间; α 表示半拥塞阈值; $\Delta\tau_2$ 表示拥塞持续时间; β 表示拥塞阈值; $R(t)$ 表示节点在时刻 t 存储空间占用率; $\int [R(t), t_1, t_2]$ 表示在时刻 t_1 与 t_2 的时间段内最小的存储空间占用率, $\int [R(t), t_1, t_2] = \min R(t), t_1 \leq t \leq t_2$ 。

当节点存储空间占用率超过半拥塞阈值,并且在半拥塞持续时间内没有低于半拥塞阈值,则节点进入半拥塞状态;当节点存储空间占用率超过拥塞阈值,并且在拥塞持续时间内没有低于拥塞阈值,则节点进入拥塞状态,如图 2 所示。

节点在时刻 t_0 到 $t_1 + \Delta\tau_1$ 时间段内处于普通状态;在 t_1 到 $t_1 + \Delta\tau_1$ 时间段内,节点存储空间占用率一直大于 α ,因此在时

刻 $t_1 + \Delta\tau_1$ 节点进入半拥塞状态;节点在 $t_1 + \Delta\tau_1$ 到 $t_2 + \Delta\tau_2$ 时间段内处于半拥塞状态;在时刻 t_2 到 $t_2 + \Delta\tau_2$ 时间段内,节点存储空间占用率一直大于 β ,因此在时刻 $t_2 + \Delta\tau_2$ 节点进入拥塞状态。在时刻 $t_1 + \Delta\tau_1$ 到 t_2 时间段,虽然有一段时间存储空间占用率大于 β ,但是这段时间小于 $\Delta\tau_2$,所以还是处于半拥塞状态。

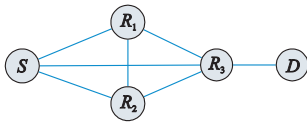


图1 简单网络拓扑

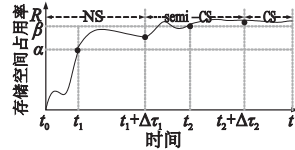


图2 节点状态示意图

2.2 数据记录

当节点收到消息时,使用哈希表存储该消息一段时间,在这段时间内,该消息再次到达节点时,节点拒绝接收。哈希表的键存储消息标志符,值存储移除相应消息标志符的下一时刻,表示式如下:

$$\text{value} = \text{currentTime} + T_m \quad (7)$$

其中: value 表示哈希表的值; currentTime 表示当前时刻; T_m 表示消息标志符的存储周期。

2.3 基于节点状态记录的多属性决策拥塞控制

结合节点状态和数据记录,改进的多属性决策拥塞控制具体步骤如算法 1 所示。

算法 1 基于节点状态记录的多属性决策拥塞控制

//获取当前节点的最优下一跳节点

node bestNextHop(m) {

//遍历邻居节点

for ($R_j: j = 1, n$) {

//判断邻居节点是否包含消息 m

if (hashMap(R_j).contains(m)) {

//如果包含消息 m,则跳过该节点

continue;

}

//根据节点状态,将节点加入到相应的集合

if (state(R_j) in normalState) {

normalNodeList.add(R_j);

} else if (state(R_j) in semiCongestionState) {

semiCongestionNodeList.add(R_j);

} else if (state(R_j) in congestionState) {

congestionNodeList.add(R_j);

}

/* 若普通状态的节点个数大于 1,则通过多属性决策理论中选出最优下一跳,否则从半拥塞状态的节点集中选择最优下一跳,如果所有相邻节点都处于拥塞状态,则本周期内节点不通信 */

if (normalNodeList.size > 0) {

bestNextHop = MADM(normalNodeList);

} else if (semiCongestionNodeList.size > 0) {

bestNextHop = MADM(semiCongestionNodeList);

}

return bestNextHop;

}

3 实验分析

3.1 网络模型

实验采用 ONE^[21] 仿真工具,网络拓扑结构^[19]如图 3 所示,整个网络包含三种类型的节点:行星节点、网关节点和骨干节点。其中节点 p_0, p_1, p_3, p_5 和 p_7 为数据包源节点,节点 p_2, p_4

和 p_6 为数据包目的节点。源节点的数据包生成速率为 4 bundle/s (DTN 中数据包的专业术语为 bundle)。同时对网络条件和参数进行如下设定:

a) 链路带宽是双向且对称的;

b) 网络中每个 DTN 节点都支持保管传输服务,不能随意丢弃已保管的数据包;

c) 行星节点和网关节点的存储空间无限大,骨干节点存储空间为 400 个数据包,每个数据包大小为 512 KB;

d) 行星节点与网关节点间的传输速率为 2 Mbps。网络其他节点的传输速率如表 1 所示。

表 1 节点间链路带宽

/Kbps

	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{13}	g_{14}	g_{15}	g_{16}	g_{17}
b_8	-	80	150	400	350	400	1000	-	-	-
b_9	80	-	200	-	-	400	780	600	-	-
b_{10}	150	200	-	100	250	-	-	850	-	-
b_{11}	400	-	100	-	700	700	-	-	800	-
b_{12}	350	-	250	700	-	400	-	-	-	800
b_{13}	400	400	-	700	400	-	-	-	650	650
g_{14}	1000	780	-	-	-	-	-	-	-	-
g_{15}	-	600	850	-	-	-	-	-	-	-
g_{16}	-	-	-	800	-	650	-	-	-	-
g_{17}	-	-	-	-	800	650	-	-	-	-

e) 行星节点与网关节点间的传播时延为 0.5 s,网关节点与骨干节点,骨干节点之间的传播时延为 20 s。

f) 属性的交换周期为 50 s。

g) 半拥塞阈值为 80%,半拥塞持续时间为 600 s,拥塞阈值为 95%,拥塞持续时间为 200 s,消息标志符在哈希表中保存周期为 1 000 s。

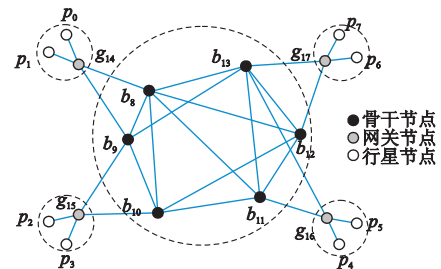


图3 网络拓扑图

根据以上条件,网络拥塞只会发生在骨干节点,因此在网关节点和骨干节点中应用多属性决策拥塞控制机制。节点交换的属性包括存储空间占用率 (bundle buffer occupancy, BBO)、可用链路带宽 (available bandwidth, AB) 和传输时间 (transmission time, TT,由消息大小除以可用带宽得到),其中 BBO 和 TT 是消耗属性,AB 是收益属性。采用的多属性决策理论方法包括 SAW、MDUP 和 TOPSIS。将属性和方法进行组合得到 SAW-BBO、SAW-BBO-AB、SAW-BBO-TT、MDUP-BBO-AB、MDUP-BBO-TT、TOPSIS-BBO-AB 和 TOPSIS-BBO-TT 七种组合。将这些组合运行在以下不同拥塞程度的网络中:

a) 轻度拥塞或无拥塞网络,源节点产生消息的持续时间为 20 s,向网络注入 400 个 bundle,每个 bundle 的生存周期为 39 000 s,仿真时间为 40 000 s。

b) 中等拥塞网络,源节点产生消息的持续时间为 90 s,向网络注入 1 800 个 bundle,每个 bundle 的生存周期为 54 000 s,仿真时间为 60 000 s。

c) 重度拥塞网络,源节点产生消息的持续时间为 150 s,向

网络注入3 000个bundle,每个bundle的生存周期为54 000 s,仿真时间为60 000 s。

分别考虑七种组合在不同拥塞程度下的性能,包括每个节点bundle队列长度(为简洁起见,本文只分析节点 b_9 在不同拥塞网络 and 不同组合下的队列长度变化)、平均bundle队列长度、bundle丢失率和消息的平均分发时间。

3.2 轻度拥塞或无拥塞网络

3.2.1 单个节点bundle队列长度

如图4和5对比所示,在轻度拥塞或无拥塞网络中,改进后的各组合中节点 b_9 队列长度走势曲线与原先的相比,峰值更小、更规律,没有出现波动现象,且除SAW-BBO和SAW-BBO-AB组合外,其他组合的走势曲线非常接近。

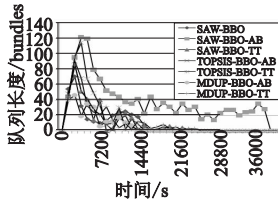


图4 原拥塞控制中节点 b_9 队列长度(轻度拥塞)

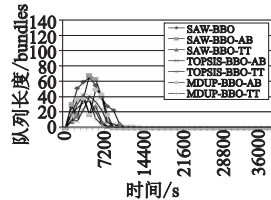


图5 改进后拥塞控制中节点 b_9 队列长度(轻度拥塞)

3.2.2 平均bundle队列长度

如图6和7对比所示,在轻度拥塞或无拥塞网络中,改进后的各组合的节点平均队列长度与原先的相比都要小,特别是MDUP-BBO-TT和SAW-BBO-AB组合相比其他改进后的组合平均队列要更小。

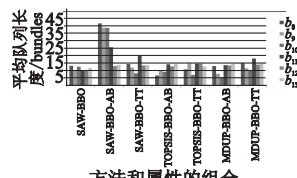


图6 原拥塞控制中平均队列长度(轻度拥塞)

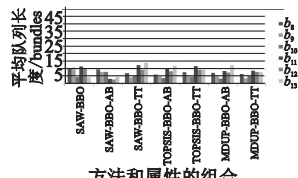


图7 改进后拥塞控制中平均队列长度(轻度拥塞)

3.2.3 Bundle丢失率

如图8所示,原拥塞控制机制中除SAW-BBO组合没有丢包外,其他组合由于数据包徘徊问题都有丢包,特别是SAW-BBO-AB组合,丢包率高达30%,而改进的拥塞控制机制中所有组合的丢包率都为0。对比得出,在轻度拥塞或无拥塞网络中,改进的拥塞控制机制的丢包率比原先的更小。

3.2.4 消息的平均分发时间

如图9所示,在轻度拥塞或无拥塞网络中,改进后的各组合的消息平均分发时间与原先的相比都更短,特别是MDUP-BBO-TT和SAW-BBO-AB组合比其他改进后的组合消息平均分发时间更短。

3.3 中等拥塞网络

3.3.1 单个节点bundle队列长度

如图10和11对比所示,原拥塞控制机制中除TOPSIS-BBO-AB组合外,其他组合的节点队列长度峰值都达到了350 bundle,而改进后的拥塞机制中除SAW-BBO-AB组合外,其他组合的节点队列长度峰值都在300 bundle以下,同时改进后的SAW-BBO-AB组合的存储空间占用率在100%的时间段更短,因此在中等拥塞网络中,改进后的各组合中节点 b_9 队列长度

走势曲线与原先的相比,峰值更小、更规律,且波动幅度相对较小,特别是SAW-BBO-TT、TOPSIS-BBO-AB和MDUP-BBO-AB组合具有更好的走势。

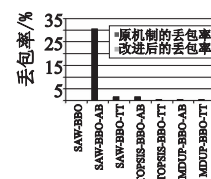


图8 Bundle丢失率(轻度拥塞)

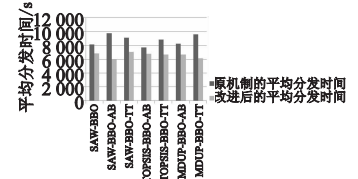


图9 消息平均分发时间(轻度拥塞)

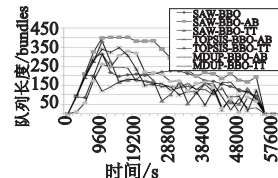


图10 原拥塞控制中节点 b_9 队列长度(中等拥塞)

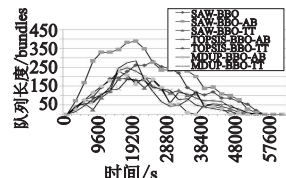


图11 改进后拥塞控制中节点 b_9 队列长度(中等拥塞)

3.3.2 平均bundle队列长度

如图12和13对比所示,在中等拥塞网络中,改进后的各组合的节点平均队列长度与原先的相比都要小,特别是SAW-BBO-TT组合相比其他改进后的组合平均队列更小。

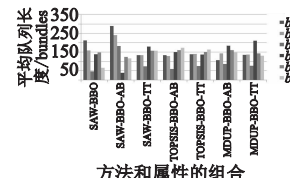


图12 原拥塞控制中平均队列长度(中等拥塞)

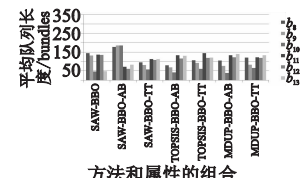


图13 改进后拥塞控制中平均队列长度(中等拥塞)

3.3.3 bundle丢失率

如图14所示,改进后的拥塞控制机制中,组合SAW-BBO和SAW-BBO-AB有少量丢包,其他组合丢包率为0,而原先的拥塞控制机制中所有组合都有较高的丢包率。因此在中等拥塞网络中,改进的拥塞控制机制的丢包率与原先的相比要更小。

3.3.4 消息的平均分发时间

如图15所示,在中等拥塞网络中,改进的拥塞控制机制的消息平均分发时间比原先的要更长,大部分的消息在较后的时间段内分发完成,而原先的拥塞控制机制中,部分消息由于生存周期结束没有完成分发。其中改进后的SAW-BBO-TT组合比其他改进的组合消息平均分发时间更短。

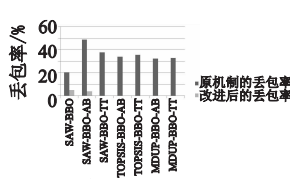


图14 Bundle丢失率(中等拥塞)

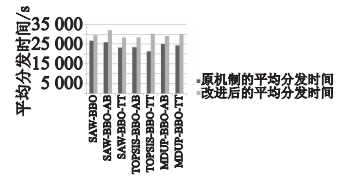


图15 消息平均分发时间(中等拥塞)

3.4 重度拥塞网络

在轻度拥塞与中等拥塞网络中,改进后的拥塞控制机制在节点bundle队列长度、平均队列长度、bundle丢失率和消息平均分发时间上有更明显的优势,因此在重度拥塞网络的实验中,对比改进后的拥塞控制机制在各方法和属性组合上的

性能。

3.4.1 单个节点 bundle 队列长度

如图 16 所示,在重度拥塞网络中,节点 b_9 在各组合情况下都处于拥塞严重状态,其中 SAW-BBO 和 SAW-BBO-TT 组合下的节点队列长度具有相对较好的走势。

3.4.2 平均 bundle 队列长度

如图 17 所示,在重度拥塞网络中,节点在 SAW-BBO 组合下的平均队列长度最小,排在其后的依次是 SAW-BBO-TT 和 MDUP-BBO-AB 组合。

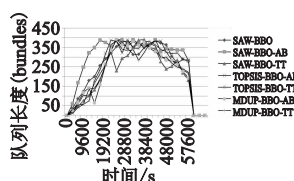


图16 改进后拥塞控制中节点 b_9 队列长度 (重度拥塞)

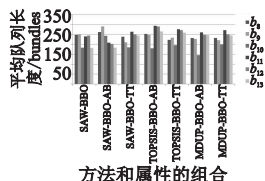


图17 改进后拥塞控制中平均队列长度 (重度拥塞)

3.4.3 bundle 丢失率

如图 18 所示,在重度拥塞网络中,MDUP-BBO-AB 组合的丢包率最小,排在其后的依次是 SAW-BBO 和 SAW-BBO-TT 组合。

3.4.4 消息的平均分发时间

如图 19 所示,在重度拥塞网络中,SAW-BBO-AB 组合的消息平均分发时间最小,排在其后的依次是 SAW-BBO、MDUP-BBO-AB 和 SAW-BBO-TT 组合。

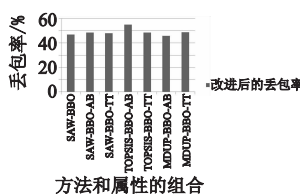


图18 改进后拥塞控制机制的 bundle 丢失率 (重度拥塞)

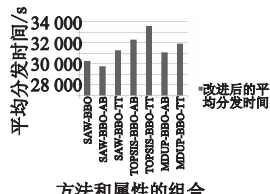


图19 改进后拥塞控制机制的消息平均分发时间 (重度拥塞)

综合以上对比,在重度拥塞网络中,改进的 SAW-BBO、SAW-BBO-TT 和 MDUP-BBO-AB 组合比其他组合具有相对较好的性能。

4 结束语

本文针对多属性决策拥塞控制算法存在的不足对其进行改进,提出了基于节点状态和数据记录的多属性决策拥塞控制方法,通过判断节点的拥塞程度以及接收数据包的历史记录来达到选择最优下一跳节点的目的。仿真分析表明,改进后的方法有效改善了节点队列长度、平均队列长度、丢包率和消息平均分发时间四个方面。综合比较改进后的各组合在不同拥塞程度网络中的性能得出:SAW-BBO-TT 和 MDUP-BBO-AB 组合的平均性能较优于其他组合,更适应不同拥塞程度的网络。

虽然改进的算法有较好的性能,但其加大了运算量并使用了更多的缓存空间来保存节点接收数据包的历史记录,因此在功耗和缓存方面开销增大。但随着网络拥塞程度的增加,与原策略中大量丢包重传浪费的功耗相比,这部分开销是可以接受的。分析更多的影响网络的属性和运用模糊多属性决策理论方法将是下一步的研究工作。

参考文献:

- [1] 欧阳自远,李春来,邹永廖,等. 深空探测的进展与我国深空探测的发展战略[J]. 中国航天,2002(12):28-32.
- [2] 栾恩杰. 神舟五号与我国航天发展战略[C]//中国科学人文论坛. 2003.
- [3] 王一然,刘晓川,罗开元. 国际深空探测技术发展现状及趋势[J]. 国际太空,2003(2):12-16.
- [4] 李平,张纪生. NASA 深空网(DSN)的现状与发展趋势[J]. 飞行器测控学报,2003,22(4):10-18.
- [5] 林墨. 深空测控通信技术发展趋势分析[J]. 飞行器测控学报,2005,24(3):7-9.
- [6] BHASIN K, HAYDEN J L. Space Internet architectures and technologies for NASA enterprises[J]. International Journal of Satellite Communications,2002,20(3):311-332.
- [7] DURST R C, FEIGHERY P D, SCOTT K L. Why not use the standard Internet suite for the interplanetary Internet? [EB/OL]. (1999-10). <http://www.ipnsig.org/techinfo.htm>
- [8] BHASIN K, HAYDEN J, AGRE J R, et al. Advanced communication and networking technologies for Mars exploration[C]//Proc of AIAA International Communications Satellite Systems Conference. 2001.
- [9] FALL K. A delay-tolerant network architecture for challenged Internets[C]//Proc of ACM SIGCOMM. 2003:27-34.
- [10] SCOTT K, BURLEIGH S. RFC 5050, bundle protocol specification [S]. 2007.
- [11] BURLEIGH S, JENNINGS E, SCHOOLCRAFT J. Autonomous congestion control in delay-tolerant networks[C]//Proc of AIAA Space-Ops Conference. 2006.
- [12] DAS R, PRODHAN M A T, KABIR M H, et al. A novel congestion control scheme for delay tolerant networks[C]//Proc of ICOST in Mobile and Wireless Networking. 2011:76-81.
- [13] LEELA-AMORNSIN L, ESAKI H. Heuristic congestion control for message deletion in delay tolerant network[C]//Proc of Smart Spaces ruSMART Conference. 2010:287-298.
- [14] De RANGO F, TROPEA M, LARATTA G B, et al. Hop-by-hop local flow control over InterPlaNetary networks based on DTN architecture [C]//Proc of IEEE International Conference on Communications. 2008:1920-1924.
- [15] SELIGMAN M, FALL K, MUNDUR P. Alternative custodians for congestion control in delay tolerant networks[C]//Proc of ACM SIGCOMM Workshops on Challenged Networks. 2006:229-236.
- [16] SELIGMAN M, FALL K, MUNDUR P. Storage routing for DTN congestion control[J]. Wireless Communications and Mobile Computing,2007,7(10):1183-1196.
- [17] HUA Da-wen, DU Xue-hui, XU Guo-yu, et al. A DTN congestion mechanism based on distributed storage[C]//Proc of the 2nd IEEE Conference on Information Management and Engineering. 2010:385-389.
- [18] 徐昌彪,王宇,祁彦. DTN 中基于服务等级的 Push-Pull 拥塞控制研究[J]. 计算机应用研究,2010,27(10):3929-3931.
- [19] BISIO I, MARCHESE M, De COLA T. Congestion aware routing strategies for DTN-based Interlaetary networks[C]//Proc of GLOBE-COMM. 2008:1-5.
- [20] YOON K P, HWANG C L. Multiple attribute decision making: an introduction[M]. [S. l.]: Sage Publications Inc,1995.
- [21] ONE simulator[EB/OL]. (2011-01). <http://www.netlab.tkk.fi/tutkimus/dtn/theone/>.