

空间延迟/中断容忍网络拥塞控制策略研究

燕洪成, 张庆君, 孙勇

(中国空间技术研究院总体部, 北京 100094)

摘要: 针对空间延迟/中断容忍网络 (DTN, delay/disruption tolerant network) 的拥塞控制问题, 提出一种基于提前卸载的拥塞控制策略 (EOCC, early offloading-based congestion control)。由于空间 DTN 网络大时延和不能保证时刻存在端到端路径的特点, EOCC 主要利用网络节点的本地信息在拥塞发生前就采取措施。具体地, EOCC 会时刻监测节点缓存变化速率, 在即将发生拥塞时, 将消息通过早于最优路径的非最优路径传输, 从而缓解节点存储压力。仿真结果表明, 采用 EOCC 的接触图路由获得了更好的性能。

关键词: 空间延迟/中断容忍网络; 拥塞控制; 提前卸载; 接触图路由

中图分类号: TP393

文献标识码: A

On congestion control strategy for space delay/disruption tolerant networks

YAN Hong-cheng, ZHANG Qing-jun, SUN Yong

(Institute of Spacecraft System Engineering, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: To address the congestion control problem in space DTN (delay/disruption tolerant networks), an EOCC (early offloading-based congestion control) strategy was proposed. As space DTN was often subject to high latency and end-to-end continuous connectivity could not be guaranteed, EOCC takes measures before congestion occurs with local information only. More specifically, EOCC will monitor the buffer rate at all times and attempts to relieve the storage pressure by early offloading the node buffer through non-best paths which are earlier than the best path when the network is about to congest. Simulation results show that contact graph routing with the proposed congestion control strategy achieves better performance.

Key words: space delay/disruption tolerant network, congestion control, early offloading, contact graph routing

1 引言

由于卫星平台和星间链路 (ISL, inter-satellite link) 的约束, 卫星所能携带的星间链路数量非常有限 (比如仅能携带一条星间链路), 空间网络中的星间链路将呈现大时延、间断可用和链路带宽极不对称 (比如在极端情况下, 半双工) 的特点。同时, 由于地球自转和卫星星座运行的影响, 卫星与地面站之间的星地链路 (GSL, ground-satellite link) 也具有间断可用的特点。ISL 和 GSL 的这种间断可用的特点使空间网络中任意 2 个节点之间并不一定

时刻存在端到端路径, 使其形成一个典型的空间延迟/中断容忍网络 (space DTN, space delay/disruption tolerant networks)^[1-3]。

图 1 为一个典型空间 DTN 网络在不同时间间隔内的拓扑示意, 时间间隔固定为 Δt , 称为一个时隙。假设有 6 颗卫星 (图中用圆圈表示) 和 1 个地面站 (图中用正方形表示), 2 颗卫星之间用 2 个单向箭头连接说明在该时隙内建立了半双工 ISL, 卫星和地面站之间用双向箭头连接说明在该时隙内建立了全双工 GSL。假定每颗卫星均配置 1 副 ISL 天线和 1 副 GSL 天线, 1 颗卫星在 1 个时隙内仅能

收稿日期: 2014-12-08; 修回日期: 2015-06-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.91438102)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.91438102)

选择与另外 1 颗可见卫星建立 ISL，并以一定策略与地面站建立 GSL。

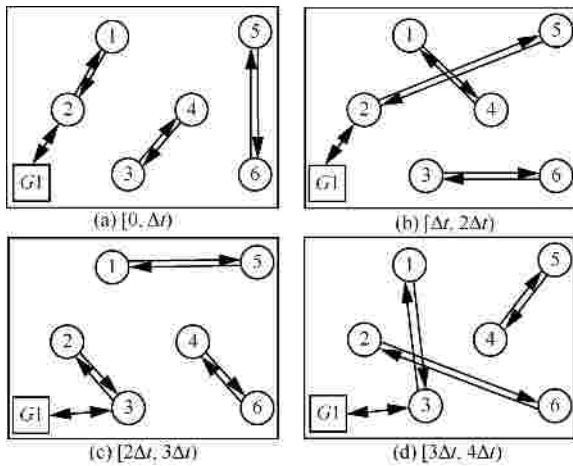


图 1 典型空间 DTN 网络不同时刻的网络拓扑

从图 1 可以看出，由于 ISL 和 GSL 间断可用，空间 DTN 网络中任意 2 个节点间并不一定时刻存在端到端路径。比如卫星 4 与地面站 G1 在任何时隙均不存在端到端路径，但卫星 4 可以在时隙 $[0, ?t)$ 将消息发送给卫星 3，卫星 3 暂存消息，并在时隙 $[2?t, 3?t)$ 转发给地面站 G1，最终完成消息的投递。这种存储—转发机制是 DTN 网络的主要特点^[4,5]。

DTN 网络最初起源于美国对行星际因特网的研究^[1,2,6]，后来，研究者发现 DTN 网络同样适用于地面的许多挑战网络^[7]。DTN 网络不仅适用于深空网络，同样适用于地球轨道空间网络^[8-11]，是一种实现空间网络互连的潜在技术^[12]。

空间 DTN 网络节点的存储资源和通信资源一般都非常有限，而且，空间 DTN 网络一般不能保证存在端到端路径，消息可能长时间驻留在中间节点，这使空间 DTN 网络拥塞（主要表现为持久存储资源耗尽）的发生不可避免，造成网络性能下降。

由于空间 DTN 网络较大的端到端时延和不能保证时刻存在端到端路径，传统的因特网拥塞控制策略不能适用于空间 DTN 网络^[13,14]。当存储资源变得稀缺时，一个 DTN 节点仅有有限的自由度来处理这种情况^[2]。空间 DTN 网络拥塞的解决途径一般有减慢源节点发送速率，使用其他可用路径，将消息转移至其他存储位置或丢弃消息^[15]。

由于空间 DTN 网络的链路具有大时延、间断可用和带宽极不对称的特点，不能保证时刻存在端到端路径且通信机会有限，因此空间 DTN 网络的拥塞控制应该基于以下原则。首先，由于 DTN 网

络节点较难获取邻居或全网的信息，拥塞控制应该基于节点的本地信息（比如接触计划和本地缓存）完成^[16]；其次，由于在拥塞发生后可能没有可用的通信机会来缓解拥塞，拥塞控制应该在拥塞发生前进行。

基于以上原则，本文提出一种基于提前卸载的拥塞控制策略（EOCC，early offloading-based congestion control），EOCC 主要利用网络节点的本地信息在拥塞发生前通过其他可用路径提前卸载节点缓存。具体地，EOCC 会时刻监测节点缓存的变化速率，在即将发生拥塞的时候，将消息通过早于最优路径的非最优路径传输，从而缓解节点的存储压力，降低发生拥塞的可能性。

2 相关研究

空间 DTN 网络一般可以通过减慢源节点发送速率^[16-18]、使用其他可用路径^[19,20]，将消息转移至其他存储位置或丢弃消息来解决网络拥塞^[15]。

减慢源节点发送速率可以通过显式的向源节点发送拥塞通知，比如显式拥塞通知^[17]，或者通过拒绝代理转发，使拥塞压力慢慢传回源节点^[16]。Burleigh 等^[16]提出了一种自主拥塞控制策略，该策略仅需要利用本地信息，并通过拒绝代理转发的机制，将存储压力逐步传回源节点。Rango 等^[18]提出了一种基于跳到跳的行星际因特网本地流控制机制，能够将本地缓存空间等信息通过显式反馈逐跳回传。但由于空间 DTN 网络不能够保证时刻存在端到端路径，且端到端时延非常大，信息传输到源节点需要花费较长的时间，当信息到达源节点的时候，拥塞或许已经发生。

当邻居节点或全网的缓存信息可以获得的时候，可以通过使用其他可用路径，避开拥塞节点^[19,20]。Bisio 等^[19]提出了一种行星际网络拥塞感知路由策略，通过获取邻节点的缓存占用情况来避开拥塞节点。Mistry 等^[20]提出了一种行星际自组织网络缓存感知路由协议，其路由决策考虑了邻居节点的缓存情况。由于接触图路由（CGR，contact graph routing）^[21]没有考虑排队时延，Bezirgiannidis 等^[22,23]提出了一种考虑全网排队时延的基于最早传输机会（ETO，earliest transmission opportunity）的接触图路由（CGR-ETO），从而可以使消息有可能避开拥塞节点。但空间 DTN 网络链路时延非常大，且链路带宽极不对称（极限情况下半双工或单工，图

1 中为半双工), 邻居节点的缓存信息可能并不可用或已经过时。因此, 空间 DTN 网络的拥塞控制应该主要基于节点的本地信息^[16]。此外, 当网络即将发生拥塞时, 也可以利用其他可用路径提前卸载节点缓存, 这是本文提出方法的出发点。

如果网络中有其他存储资源可用, 当拥塞发生时, 可以临时将消息转移至其他存储节点^[15]。Seligman 等^[15]针对 DTN 网络提出一种存储路由, 在拥塞发生时, 利用其他有可用存储的节点来暂存消息。但空间 DTN 网络的通信机会一般非常有限, 且链路带宽极不对称, 当拥塞发生时, 或许没有其他路径可以将消息转移至其他存储位置, 比如图 1 中所示的网络, 每颗卫星仅有一条 ISL, 且为半双工, 这使转移消息到其他节点不可行。因此, 空间 DTN 网络最好在拥塞发生前就采取措施。

丢弃消息应该作为解决空间 DTN 网络拥塞的最后途径, 因为丢弃消息将带来不可避免的性能下降^[2]。

Birrane^[24]提出了一种预测容量消耗机制, 该机制采用源路由, 中间节点通过利用消息头部的路径信息来预测容量消耗。在行星际覆盖网络 (ION, interplanetary overlay network)^[25]中实现了一种拥塞预测机制, 当拥塞预测后由网络管理人员手动调整接触计划。Fraire 等^[26]提出了一种缓存 CGR, 该方法具有较低的计算开销, 同时保留了 CGR 的本地拥塞避免机制。针对空间 DTN 网络节点存储的动态性, Yang 等^[27]提出了一种基于二维马尔可夫链的分析框架, Hu 等^[28]在深空通信系统中做了一个实验研究。Jiang 等^[29]针对深空网络提出了一种基于早期检测和拒绝概率的拥塞控制机制, 当新消息到达时, 节点会根据本地可用缓存和邻居节点数量以一定概率拒绝消息。

3 基于提前卸载的拥塞控制策略

本文提出的拥塞控制策略采用接触图路由^[21]来完成路由计算。CGR 是 NASA 喷气推进实验室专门针对行星际因特网提出的一种路由算法, 其利用已知的接触计划来计算消息转发路径。CGR 可以计算最早投递路径 (最早投递到目的节点的路径, 属于延时最优路径), 此条路径称为最优路径, 同时, 也可以计算出多条非最早投递路径, 比如, 第二最早投递路径、第三最早投递路径等, 这些路径称为非最优路径。CGR 的多路径计算功能为本文提出的拥塞控制策略带来了便利。

空间 DTN 网络拥塞的解决途径一般有减慢源节点发送速率, 使用其他可用路径, 将消息转移至其他存储位置或丢弃消息^[15]。本文提出的拥塞控制策略基于第 2 种途径, 通过使用其他可用路径提前卸载节点缓存。传统基于其他可用路径的拥塞控制策略一般根据非本地节点的缓存状况来决定是否利用其他可用路径, 而 EOCC 根据本地节点的缓存状况来决定是否利用其他可用路径, 从而只需要利用节点的本地信息。具体地, EOCC 会时刻监测节点缓存的变化速率, 在即将发生拥塞的时候, 将消息通过早于最优路径的非最优路径传输, 从而缓解节点的存储压力。

3.1 缓存变化速率监测

缓存变化速率的监测主要用于判断网络是否即将发生拥塞, 以决定是否利用非最优路径提前卸载缓存。为了降低复杂度和计算开销, 选用一个简单的移动加权指数平均 (EWMA, exponential weighted moving average) 方法。

不失一般性, 假定每个存储的消息占用节点的一个缓存单位, 每个节点的缓存容量为 b_{capo} 。节点的瞬时缓存变化速率按式(1)进行测量, 并按式(2)采用 EWMA 预测节点未来的缓存变化速率。

$$b_{\text{rate}}(t_i) = \frac{b_{\text{size}}(t_i) - b_{\text{size}}(t_{i-1})}{t_i - t_{i-1}} \quad (1)$$

$$B_{\text{rate}}(t_i) = a B_{\text{rate}}(t_{i-1}) + (1-a) b_{\text{rate}}(t_i) \quad (2)$$

其中, $b_{\text{size}}(t)$ 为 t 时刻测量的缓存大小, $t_{i-1} < t_i$, $i \geq 1$, $t_0=0$, $b_{\text{size}}(t_0)=0$; $b_{\text{rate}}(t)$ 为 t 时刻测量的缓存瞬时变化速率; $B_{\text{rate}}(t)$ 为 t 时刻预测的未来缓存变化速率, $B_{\text{rate}}(t_0)=0$, a 为指数加权因子, 表示对历史信息的权重。需要指出的是, 缓存变化速率可正可负, 正数表示缓存增加速率, 负数表示缓存减小速率。

3.2 通过提前卸载避免拥塞

缓存变化速率主要用来估计当前消息在等待未来最优路径接触机会可用的时间内是否会经历缓存溢出, 如果会经历溢出, 那么本文尝试通过当前可用的非最优路径发送消息, 提前对节点缓存进行卸载。图 2 为这一情况的一个示例场景。图 2(a) 为一个 DTN 网络拓扑示例, 包括 3 个节点, 节点 1 的缓存容量为 b_{cap} , 当前缓存大小为 b_{size} , 按前面提到的方法预测缓存变化速率为 B_{rate} 。节点 1 缓存的消息 m 可以经过与节点 2 相连的边 e_2 或与节点 3 相连的边 e_3 到达目的节点, 边 e_2 和边 e_3 用虚线表

示表明它们并不是持续可用的。假设节点 2 位于消息 m 的第 1 最早投递路径上,节点 3 位于第 2 最早投递路径上。图 2(b)为边 e_2 和边 e_3 的接触计划,其中,边 e_3 的接触机会在当前时刻 t_{now} 开始,边 e_2 的接触机会在 $t_{earliest}$ 时刻开始。

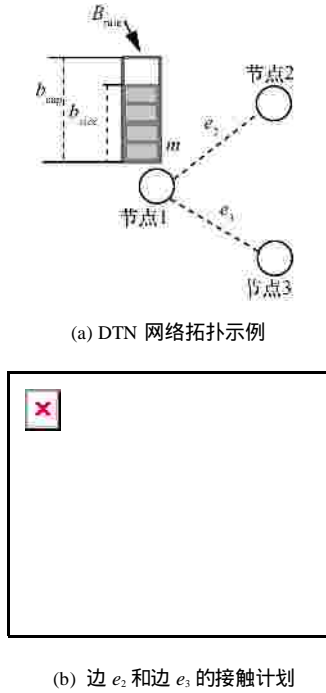


图 2 可以利用非最优路径提前卸载的示例场景

节点 1 的消息 m 如果按照最早投递路径转发的话,需要等待 $t_{earliest}$ 时刻的接触机会,但如果下式成立

$$(t_{earliest} - t_{now})B_{rate} > b_{cap} - b_{size} \quad (3)$$

那么,消息 m 在等待最早投递路径可用的过程中,节点 1 的缓存会发生溢出,从而导致消息(其他消息和/或消息 m)可能被丢弃。而当前可用的边 e_3 的接触机会正好在消息 m 的第 2 最早投递路径上(第 2 最早投递路径当前可用),如果此接触机会还有通信容量剩余,那么可以利用第 2 最早投递路径提前把消息转发出去。这带来 2 点好处:1) 降低了消息被丢弃的可能性;2) 及时对节点 1 的缓存进行卸载,从而缓解拥塞。

为了更简单地描述提出的拥塞控制策略,图 2 中仅显示了第 2 最早投递路径。实际上,提出的拥塞控制策略会依次检查第 3 最早投递路径,第 4 最早投递路径...。通过设置一个参数 k 来描述检查的非最优路径数量。

具体地,当一个接触机会可用时,节点决策的流程如图 3 所示。

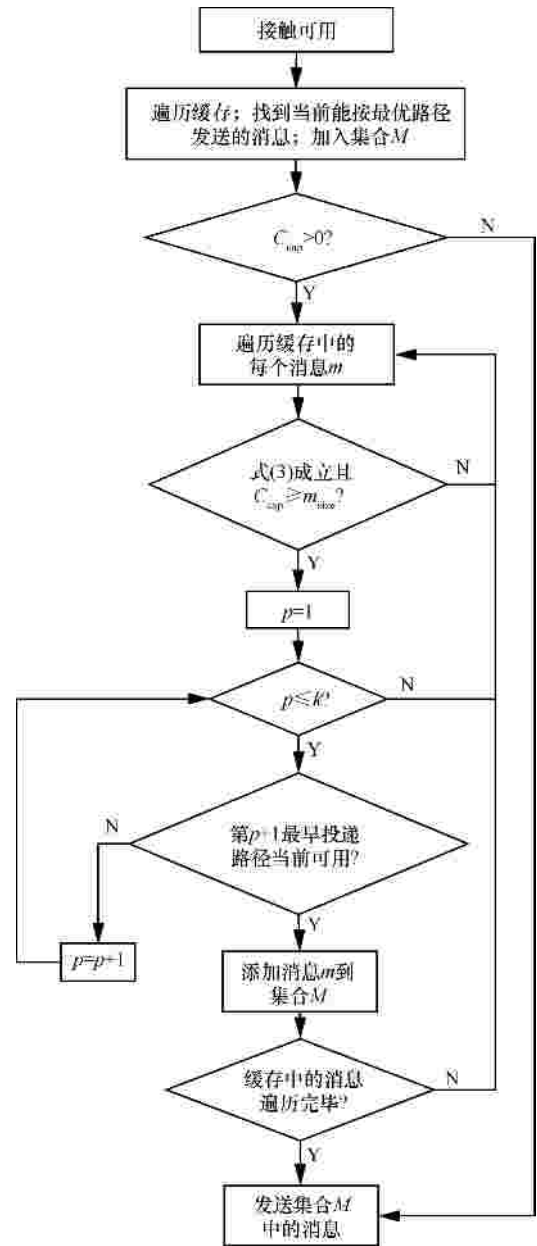


图 3 拥塞控制决策流程

其中,集合 M 为待发送的消息集合, C_{cap} 为接触机会的剩余通信容量,且随集合 M 的变化而更新, m_{size} 为消息 m 的大小, p 为临时变量, k 为检查的非最优路径数量。首先,节点会遍历缓存,提取当前能够按最早投递路径发送的消息,添加进集合 M ;然后,如果当前接触机会仍然有通信容量可用(已经扣除集合 M 中消息占用的通信容量),那么再次遍历缓存中的消息。对于缓存中的每一个消息 m ,如果式(3)满足且接触机会剩余通信容量大于

消息大小,那么消息 m 在等待最优路径可用的过程中会经历缓存溢出,因此需要检查消息 m 能否通过早于最优路径的非最优路径转发。首先检查该消息当前能否按第 2 最早投递路径发送,如果能发送,则将消息添加进集合 M ,否则,继续检查第 3 最早投递路径(如果 $k=2$ 的话);如果该消息当前能按第 3 最早投递路径发送,则将消息添加进集合 M ,否则,继续检查第 4 最早投递路径(如果 $k=3$ 的话),以此类推。一共检查最多 k 条非最优路径,在仿真评估部分,也测试了 k 取不同值时拥塞控制策略的性能。

4 性能评估

4.1 仿真环境

为了评估提出的拥塞控制策略的性能,在典型的空 DTN 网络中进行了仿真实验。空 DTN 网络由一个中地球轨道卫星星座及相关的地面站与任务运行中心(MOC, mission operation center)组成。卫星星座构型选择 walker-d 24/3/2,即一共有 24 颗卫星分布在 3 个轨道面内,且相位因子为 2。卫星轨道高度为 20 232 km,轨道倾角为 55° 。每颗卫星仅装配一条 ISL,且为半双工。每个地面站均配置 2 副天线与 2 颗可见卫星建立全双工 GSL。地面站选择未来与自己可见时间最长的 2 颗卫星建立 GSL,即采用最长覆盖时间策略建立 GSL^[30]。地面站与 MOC 之间通过地面网络时刻保持连通。空 DTN 网络的架构如图 4 所示。

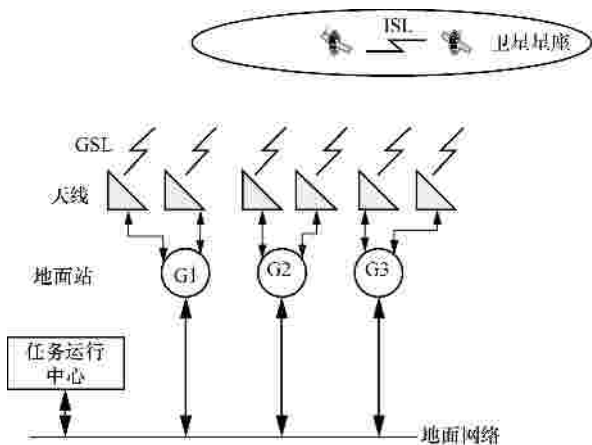


图 4 空间 DTN 网络架构

由于受地球遮挡和星间链路指向方位角的限制,并不是所有卫星间均可建立星间链路,星间链路的指向方位角限定在 $[-60^\circ, +60^\circ]$,星间链路天线

的波束中心对准地心^[31]。卫星选择与哪颗其他可见卫星建立 ISL 属于 DTN 的拓扑优化问题^[32],不在本文的研究范围之内。因此,为简便起见,ISL 的链路调度按每颗卫星均能与全周期可见的同轨和异轨卫星建立半双工 ISL 的策略手动生成,链路调度一共有 8 个时隙,并以此为周期循环,每个时隙的间隔固定为 t_0 。ISL 的链路调度可以用一个 24×8 的矩阵表示,如图 5 所示。矩阵的元素 (i, j) 表示卫星 i 与卫星 (i, j) ,在第 j 个时隙建立半双工 ISL。例如,位于第 2 行、第 3 列的 13 表示在第 3 个时隙,卫星 2 与卫星 13 建立半双工 ISL。对于半双工 ISL,约定在前半个 $\frac{\Delta t}{2}$,序号小的卫星先发送,序号大的卫星接收,后半个 $\frac{\Delta t}{2}$ 正好相反。

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	3	7	20	12	4	6	23	9
2	4	8	13	21	7	5	10	24
3	1	5	22	14	6	8	11	17
4	2	6	15	23	1	7	18	12
5	7	3	24	16	8	2	19	13
6	8	4	9	17	3	1	14	20
7	5	1	18	10	2	4	15	21
8	6	2	11	19	5	3	22	16
9	11	15	6	20	12	14	17	1
10	12	16	21	7	15	13	2	18
11	9	13	8	22	14	16	3	19
12	10	14	23	1	9	15	20	4
13	15	11	2	24	16	10	21	5
14	16	12	17	3	11	9	6	22
15	13	9	4	18	10	12	7	23
16	14	10	19	5	13	11	24	8
17	19	23	14	6	20	22	9	3
18	20	24	7	15	23	21	4	10
19	17	21	16	8	22	24	5	11
20	18	22	1	9	17	23	12	6
21	23	19	10	2	24	18	13	7
22	24	20	3	11	19	17	8	14
23	21	17	12	4	18	20	1	15
24	22	18	5	13	21	19	16	2

图 5 ISL 的链路调度

CGR 使用的接触计划包括 3 部分:第 1 部分是 ISL 的接触计划,由图 5 生成;第 2 部分是 GSL 的接触计划,根据最长覆盖时间策略生成;第 3 部分是连接地面站与 MOC 的地面网络链路的连接计划,这部分始终连通。

在 OPNET 网络仿真软件中对空 DTN 网络进行了建模,并实现了提出的拥塞控制策略。OPNET 默认的仿真参数如表 1 所示,后文中,若无特殊说

明,均采用此默认仿真参数。卫星节点的缓存容量默认设置为 20 个消息,地面站和任务运行中心的缓存容量为无限大。空间 DTN 网络中的流量分为 2 部分:一部分是卫星产生的,消息的产生服从指数分布,目的节点为 MOC,消息平均到达时间间隔为 0.4 s;另一部分是 MOC 产生的,消息产生也服从指数分布,目的节点为随机一颗卫星,消息平均到达时间间隔为 0.2 s。

表 1 OPNET 默认仿真参数

参数	数值
半双工 ISL 速率	20 kbit/s
全双工 GSL 速率	32 kbit/s
卫星节点缓存大小	20 个消息
消息大小	2 048 bit
卫星消息平均到达时间间隔	0.4 s
MOC 消息平均到达时间间隔	0.2 s
$?t$	3 s
a	0.9

4.2 性能度量

采用的性能度量指标分别为消息投递成功率、流量分布指数和平均端到端时延。消息投递成功率是 DTN 广泛采用的一个评价指标,即成功投递到目的地的消息占网络产生的所有消息的百分比。

为了探究流量在整个卫星星座中的分布情况,采用如下流量分布指数^[33]

$$f = \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}{n \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (4)$$

其中, n 表示卫星的数量, x_i 表示卫星节点 i 的缓存存在整个仿真过程中的平均大小。这个指数的范围为 0~1,表示流量在整个星座中的分布情况,数值越大表示流量在整个星座中分布越均匀,从而更不容易发生拥塞。需要指出的是流量分布指数仅统计流量在卫星星座中的分布,而没有统计在地面站和任务运行中心的分布。

平均端到端时延为所有消息在网络中从源节点到目的节点投递成功所经历的平均时间,由于没有办法测量未成功投递消息的延时,平均端到端时延仅统计了成功投递的消息。

4.3 仿真结果

仿真比较了没有添加拥塞控制策略的 CGR 与

添加 EOCC 的 CGR (CGR-CC)。CGR-CC 一共比较了 3 种使用不同数量非最优路径的情况,分别为 CGR-CC ($k=1$)、CGR-CC ($k=2$)、CGR-CC ($k=3$)。

4.3.1 节点缓存容量的影响

图 6 为 CGR 和 CGR-CC 在不同节点缓存容量时的性能,缓存容量分别为 10、20、40、80、160 个消息,图中横坐标采用 1b 刻度。

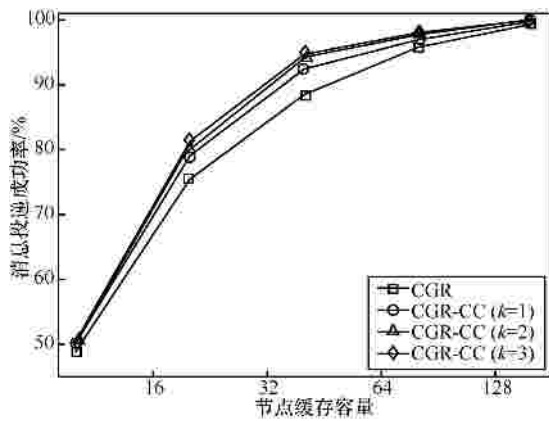
图 6(a)为 4 种策略的消息投递成功率与不同缓存容量的关系。对于 4 种不同的策略,在节点缓存容量仅为 10 个消息的时候,消息投递成功率都很低。因为缓存容量很小,只有非常少的消息能够存储下来,并最终成功投递到目的节点。当缓存容量逐渐增大的时候,4 种不同策略的消息投递成功率也都增加,因为有更多的缓存来存储消息,并最终成功投递到目的节点。同时,当缓存容量逐渐增大的时候,采用拥塞控制策略的 CGR-CC 比没有采用拥塞控制策略的 CGR 获得了更高的消息投递成功率。这是因为 CGR-CC 在即将发生拥塞的时候会利用当前可用的非最优路径提前对节点缓存进行卸载,缓解网络拥塞,从而增加消息投递成功的可能性。

当利用的非最优路径数量逐渐增多时,消息投递成功率得到了进一步的改进,但随着可利用的非最优路径数量的增多,改进越来越小。这是由于利用非最优路径转发的消息会比利用最优路径转发的消息经历更长的延时(第 2、第 3 等最早投递路径延时越来越大),从而更长时间的占用网络资源,因此其带来的性能改进会越来越小。

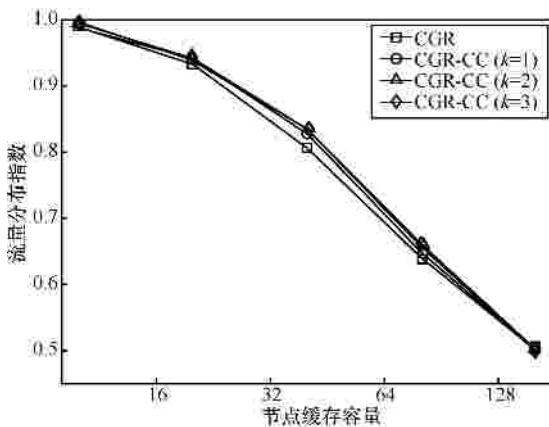
当节点的缓存资源非常充足时,比如节点缓存容量为 160 个消息时,CGR 和 CGR-CC 的消息投递成功率变得非常接近,都接近 100%。因为缓存资源非常充足,所有的消息都沿着最早投递路径转发,不再需要拥塞控制。这同时也说明,拥塞控制策略只在缓存有限的情况下有必要,而空间 DTN 网络节点的存储资源通常都非常有限。

图 6(b)为 4 种不同策略的流量分布指数与不同缓存容量的关系。对于 4 种不同的策略,随着缓存容量的增加,流量分布指数变得越来越小。一种可能的解释是,在缓存容量小的时候,由于缓存不能够存储所有的消息,所有卫星节点的缓存几乎都是满的,因此流量看上去比较均匀;而随着缓存容量的增大,不同卫星节点承受不同负荷流量的现象开始显现,因此,流量分布越来越不均匀。在缓存容

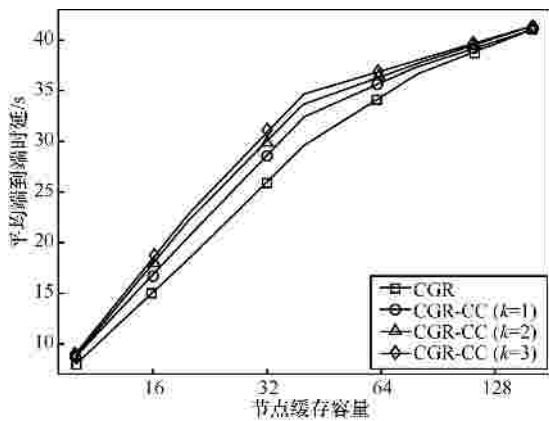
量很小的时候，4 种策略的流量分布指数都接近 1；在缓存容量很大时，不需要拥塞控制策略，因此，4 种策略的流量分布指数也非常接近。在缓存容量有限时，可以看出，CGR-CC 的流量分布指数比 CGR 获得了一定的改进，这说明拥塞控制策略可以使网络的流量分布更均匀，从而缓解网络拥塞。随着 k 取值的增大，进一步的性能提高变得越来越小。



(a) 消息投递成功率



(b) 流量分布指数



(c) 平均端到端时延

图 6 不同节点缓存容量时的性能

图 6(c)为 4 种不同策略的平均端到端时延与不同缓存容量的关系。可以看出，随着缓存容量的增大，消息的平均端到端时延也增大。这是因为大量缓存的消息增加了排队延时，从而增加了平均端到端延时，增加的排队延时也会使消息错过当前接触机会，从而进一步增大端到端延时。由于 CGR-CC 通过利用非最优路径提前卸载节点缓存，降低发生拥塞的可能性，因此其端到端时延会相应增大。这可以看作 CGR-CC 为了获得更高的投递成功率并实现更均匀的网络流量分布所付出的代价。随 k 值的增大，增大的端到端时延越来越小。

4.3.2 网络负载的影响

图 7 为 CGR 和 CGR-CC 在不同网络负载时的性能，网络负载以卫星消息到达时间的间隔表示，卫星的消息到达时间的间隔在 0.2~1.0 s，即网络负载不断增大，任务运行中心的消息到达时间的间隔保持不变。

图 7(a)为 4 种策略的消息投递成功率与不同网络负载的关系。可以看出，随网络负载的增大，4 种不同策略的消息投递成功率均呈下降趋势，这是因为有限的缓存不能存储产生越来越多的消息，因此，越来越多的消息不能投递到目的地。由于 CGR-CC 通过提前卸载缓解网络拥塞，从而增加了消息投递成功的可能性，因此，CGR-CC 的投递成功率比 CGR 要高。当利用的非最优路径数量逐渐增多时，消息投递成功率得到了进一步的改进，但随着可利用的非最优路径数量的增多，改进越来越小。正如前面提到的，这是由于利用非最优路径的消息要经历更长的延时到达目的地，从而占用网络资源的时间更长，因此其带来的性能改进也越来越小。

图 7(b)为 4 种不同策略的流量分布指数与不同网络负载的关系。对于 4 种不同的策略，随着网络负载的增大，流量分布指数逐渐增大。这是因为网络负载的增大使所有卫星节点有限的缓存都充满了消息，因此流量比较均匀。在网络负载很大时，所有卫星节点的缓存都充满了消息，拥塞控制策略不能使流量分布更均匀，因此，4 种策略的流量分布指数接近。在网络负载较小时，CGR-CC 的流量分布指数比 CGR 有较大的改进。而随着 k 取值的增大，进一步的改进越来越小。需要指出的是，在消息到达时间的间隔为 0.4 s 时，CGR ($k=3$)的流量分布指数比 CGR ($k=2$)要小。这是因为，随着 k 的

增大，提前卸载的消息会经历更长的延时，这会导致更长时间地占用网络资源，从而可能抵消提前卸载带来的好处。

加的排队延时也会使消息错过当前接触机会，从而进一步增大平均端到端延时。由于 CGR-CC 通过利用非最优路径来缓解拥塞，因此其端到端延时会相应增大。随 k 值的增大，增大的平均端到端延时越来越小。

5 结束语

由于空间 DTN 网络具有较大的时延且不能保证时刻存在端到端路径，消息可能长时间驻留在中间节点，而且由于空间 DTN 网络节点一般只能携带有限的存储资源，因此，空间 DTN 网络拥塞的发生不可避免。本文提出一种基于提前卸载的拥塞控制策略，利用其他可用路径提前对节点缓存进行卸载，以降低发生拥塞的可能性。仿真结果表明，采用提出的拥塞控制策略的接触图路由可以获得更高的消息投递成功率，实现更均匀的网络流量分布。由于采用提出的拥塞控制策略后，消息将沿着非最优路径转发以降低拥塞发生的可能性，因此，消息的平均端到端延时会增大，这可以看作是为了获得更高的消息投递成功率和更均匀的网络流量分布而付出的代价。

参考文献：

- [1] BURLEIGH S, HOOKE A, TORGERSON L, et al. Delay-tolerant networking: an approach to interplanetary Internet[J]. IEEE Communications Magazine, 2003, 41(6): 128-136.
- [2] Delay-tolerant networking architecture, RFC 4838[EB/OL]. <http://tools.ietf.org/html/rfc4838>, 2015-12-01.
- [3] 林闯, 董扬威, 单志广. 基于 DTN 的空间网络互联服务研究综述[J]. 计算机研究与发展, 2014, 51(5): 931-943.
- [4] LIN C, DONG Y W, SHAN Z G. Research on space internetworking service based on DTN[J]. Journal of Computer Research and Development, 2014, 51(5): 931-943.
- [5] ZHANG Z. Routing in intermittently connected mobile ad hoc networks and delay tolerant networks: overview and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2006, 8(1): 24-37.
- [6] CAO Y, SUN Z. Routing in delay/disruption tolerant networks a taxonomy, survey and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(2): 654-677.
- [7] HOOKE A. The interplanetary Internet[J]. Communications of The ACM, 2001, 44(9): 38-40.
- [8] FALL K. A delay-tolerant network architecture for challenged Internets[C]//ACM SIGCOMM 2003. Karlsruhe, Germany, c2003. 27-34.
- [9] CAINI C, CRUICKSHANK H, FARRELL S, et al. Delay-and disruption-tolerant networking (DTN): an alternative solution for future satellite networking applications[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(11): 1980-1997.
- [10] Space-data routers[EB/OL]. <http://www.spacedatarouters.eu/>, 2015-12-01.

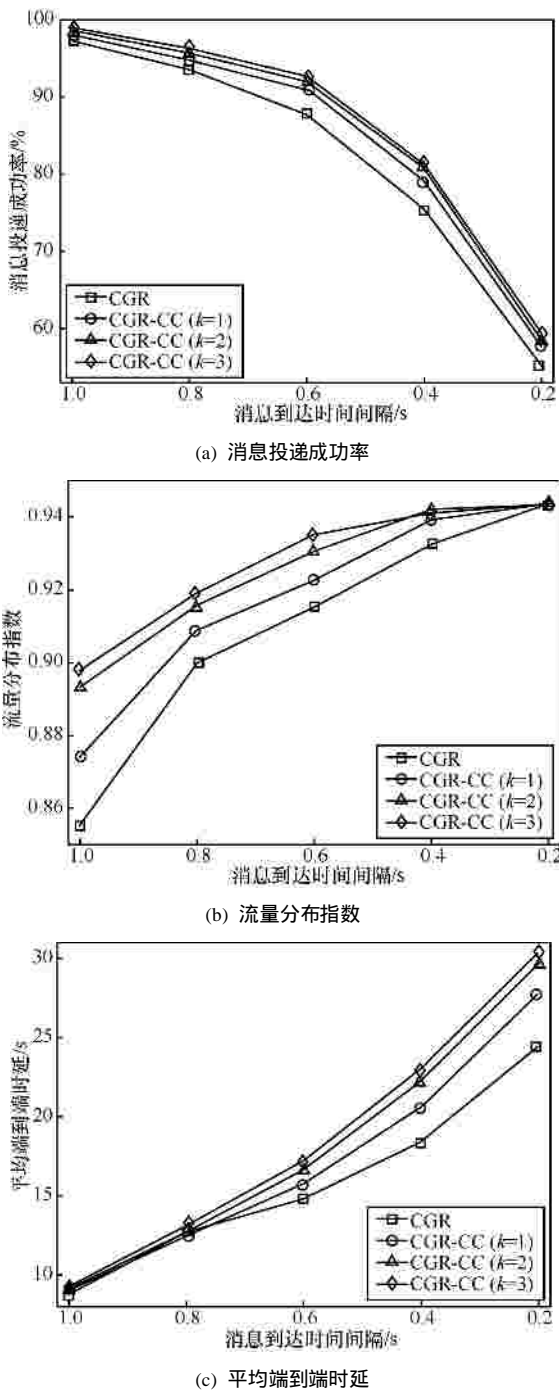


图 7 不同网络负载时的性能

图 7(c)为 4 种不同策略的平均端到端延时与不同网络负载的关系。可以看出，随着网络负载的增大，平均端到端延时也增大。这是因为大量产生的消息增加了排队延时，从而增加了端到端延时，增

- [10] DAVIS F A, MARQUART J K, MENKE G. Benefits of delay tolerant networking for earth science missions[C]//2012 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, USA, c2012:1-11.
- [11] 燕洪成, 张庆君, 孙勇, 等. 延迟/中断容忍网络技术及其在行星际因特网中的应用 [J]. 航天器工程, 2014, 23(2): 114-123.
YAN H C, ZHANG Q J, SUN Y, et al. Delay/disruption tolerant network and its application to interplanetary Internet[J]. Spacecraft Engineering, 2014, 23(2): 114-123.
- [12] BURLEIGH S, CERF V, CROWCROFT J, et al. Space for internet and internet for space[J]. Ad Hoc Networks, 2014, 23:80-86.
- [13] SILVA A P, BURLEIGH S, HIRATA C M, et al. A survey on congestion control for delay and disruption tolerant networks[J]. Ad Hoc Networks, 2014, 25:480-494.
- [14] SOELISTIANTO B, HOWARTH M P. Transfer reliability and congestion control strategies in opportunistic networks: survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(1): 538-555.
- [15] SELIGMAN M, FALL K, MUNDUR P. Storage routing for DTN congestion control[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2007, 7(10): 1183-1196.
- [16] BURLEIGH S, JENNINGS E, SCHOOLCRAFT J. Autonomous congestion control for an interplanetary internet[C]//2006 The 9th International Conference on Space Operations (SpaceOps). Rome, Italy, c2006: 1-10.
- [17] BISIO I, CELLO M, DE COLA T, et al. Combined congestion control and link selection strategies for delay tolerant interplanetary networks[C]//2009 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2009). Honolulu, USA, c2009: 1-6.
- [18] RANGO F D. Hop-by-hop local flow control over interplanetary networks based on DTN architecture[C]//2008 IEEE International Conference on Communications (ICC 2008). Beijing, China, c2008: 1920-1924.
- [19] BISIO I, MARCHESE M, DECOLA T. Congestion aware routing strategies for DTN-based interplanetary networks[C]//2008 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2008). Orleans, USA, c2008: 1-5.
- [20] MISTRY K, SRIVASTAVA S. Buffer aware routing in interplanetary ad hoc network[C]//2009 First International Communication Systems and Networks and Workshops. Bangalore, India, c2009: 1-10.
- [21] Contact graph routing. IRTF Internet-Draft, draft-burleigh-dtnrg-cgr-01[EB/OL]. <http://tools.ietf.org/html/draft-burleigh-dtnrg-cgr-01>, 2015-12-01.
- [22] BEZIRGIANNIDIS N, TSAPELI F. Towards flexibility and accuracy in space DTN communications[C]//2013 The 8th ACM MobiCom Workshop on Challenged Networks. Miami, USA, c2013: 43-48.
- [23] BEZIRGIANNIDIS N, CAINI C, MONTENERO D D P, et al. Contact graph routing enhancements for delay tolerant space communications[C]//The 7th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 13th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC). Livorno, Italy, c2014: 17-23.
- [24] BIRrane E J. Congestion modeling in graph-routed delay tolerant networks with predictive capacity consumption[C]//2013 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Atlanta, USA, c2013: 3016-3022.
- [25] Interplanetary overlay network (ION)[EB/OL]. <http://softwareforge.net/projects/ion-dtn/>, 2015-12-01.
- [26] FRAIRE J A, MADOERY P, FINOCHIETTO J M. Leveraging routing performance and congestion avoidance in predictable delay tolerant networks[C]//2014 IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments (WiSEE). Noordwijk, Netherlands, c2014: 1-7.
- [27] YANG Z, ZHANG Q, WANG R, et al. On storage dynamics of space delay/disruption tolerant network node[J]. Wireless Networks, 2014, 20(8): 2529-2541.
- [28] HU J, WANG R, SUN X, et al. Memory dynamics for DTN protocol in deep-space communications[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2014, 29(2): 22-30.
- [29] JIANG G, SHEN Y, CHEN J. Early detection and rejection probability-based congestion control scheme for deep space networks[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2014, doi: 10.1002/sat.1094
- [30] CHEN C. A routing protocol for hierarchical LEO/MEO satellite IP networks[J]. Wireless Networks, 2005, 4(11): 507-521.
- [31] 李振东, 何善宝, 刘崇华, 等. 一种导航星座星间链路拓扑设计方法 [J]. 航天器工程, 2011, 20(3): 32-37.
LI Z D, HE S B, LIU C H, et al. An topology design method of navigation satellite constellation inter-satellite links[J]. Spacecraft Engineering, 2011, 20(3): 32-37.
- [32] FRAIRE J A, MADOERY P G, FINOCHIETTO J M. On the design and analysis of fair contact plans in predictable delay-tolerant networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(11): 3874-3882.
- [33] TALEB T, MASHIMO D, JAMALIPOUR A, et al. Explicit load balancing technique for N GEO satellite IP networks with on-board processing capabilities [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2009, 17(1): 281-293.

作者简介：



燕洪成 (1985-), 男, 山东淄博人, 中国空间技术研究院博士生, 主要研究方向为空间信息网络和空间数据系统等。



张庆君 (1969-), 男, 江苏徐州人, 博士, 中国空间技术研究院研究员, 主要研究方向为航天器总体设计、卫星通信、卫星遥感等。



孙勇 (1975-), 男, 山东青岛人, 中国空间技术研究院研究员, 主要研究方向为航天器总体设计、空间数据系统等。