

IDRP: 行星际 DTN 路由协议*

于洋^{1,2}, 陈晓敏¹

(1. 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为解决星际网络场景下的数据传输问题,提出了一种星际容延迟网络路由协议:利用节点的历史连接信息来预测该节点与其各个邻居节点的连接恢复时间;当两个位于同一个域节点互相连接时,交换彼此的连接时间预测表,并据此决定是否需要使用对方作为中继节点;深空节点的存储资源常常受限,在进行路由选择时将节点的存储区消耗情况也纳入决策。使用 NS2 进行地-火通信场景仿真,使用一种改进的泛洪路由和一种仅选择网关节点作为下一跳选择的路由策略作对比。仿真结果表明相比其他两种协议,提高了 14% 的投递成功率并减少了 50% 的平均传输延迟,并更有效的利用了节点存储资源。

关键词:容延迟网络;行星际网络;保管传输;路由协议

中图分类号:TP393 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2014)03-0091-06

IDRP: An interplanetary DTN routing protocol

YU Yang^{1,2}, CHEN Xiaomin¹

(1. Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A novel interplanetary DTN routing protocol (IDRP) is designed to provide a general networking solution over interplanetary network scenarios. IDRP enables DTN nodes to estimate the recovery time to its neighbor nodes using the historical connection information. When two DTN nodes in the same region contact each other, they exchange their estimations to decide whether to use each other as a relay. For storage resource is constraint in deep space nodes, IDRP also takes storage consumption into consideration. Simulations based on NS2 were conducted in a Mars-to-Earth scenario. A modified epidemic routing strategy and an only-gateway-selected routing strategy are used as contrast. The simulation results show that IDRP achieves 14% higher delivery ratio and 50% less average transmission delay than the other two strategies, as well as better storage utilization.

Key words: delay tolerant network; interplanetary network; custody transfer; routing protocol

星际互联网(Inter Planet Network, IPN)是为向深空任务中的飞行器提供通信服务而提出的网络模型^[1]。与普通互联网不同,IPN 作为一种典型的“受限网络”,具有长传输延迟、间歇性中断、不对称的上下行速率、低信噪比等特性。与现在常见的地面站-地球卫星的通信模式不同,行星际的数据通信拥有非常巨大的通信延迟,通常从几分钟到几天不等。在 IPN 中上下行速率严重不对称,一般可以达到 1 000:1 甚至更高^[2]。这就使传统的 TCP/IP 协议无法应用在深空通信任务中。

为了应对行星际通信中所遇到的各种困难环境, Fall 等提出了容延迟网络(Delay Tolerant Network, DTN)网络结构^[3-5]。DTN 网络结构定

义了名为 bundle 的面向消息的覆盖层。bundle 层运行于传输层之上、应用层之下。安装有 bundle 协议的设备被称为 DTN 节点。由于 DTN 网络的间歇性连接特性,不能假定 DTN 网络中存在端到端的连接。因此 DTN 数据单元(被称为 bundle)需要在传输过程中在中继节点中暂存。这就要求 DTN 节点提供固态存储区以保证数据在网络断开时可以在中间节点保存。bundle 协议^[6]采用保管传输(Custody Transfer, CT)^[7-8]存储-转发机制来保证数据可靠性。随着发展,DTN 网络的研究范围从初始的 IPN 网络延伸至无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)和移动自组织网络(Mobile Ad-hoc Networks, MANETs)。

* 收稿日期:2013-09-25

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项资助项目(XDA04060300)

作者简介:于洋(1982—),男,新疆昌吉人,博士研究生,E-mail:9517380@gmail.com;

陈晓敏(通信作者),女,研究员,博士生导师,E-mail:chenxm@nssc.ac.cn

路由研究是 DTN 网络研究的热点问题。现有 DTN 路由研究主要是针对地面 WSN 网络^[9-10]或 MANET^[11-13]网络。随着人类深空探测活动的不断增加,发往地球的相邻天体(月球或火星)的轨道器和探测器越来越多,研发一种可以应用于行星际网络环境的 DTN 路由协议十分有意义。

本文提出了一种面向行星际 DTN 网络的路由协议(Interplanetary DTN Routing Protocol, IDRP)。IDRP 的主要目的是充分利用组成星际 DTN 网络的各节点的资源,在受限网络环境下,将数据更加快速的发送至目的地。同时,由于 DTN 的保管传输机制,使得大量的数据需要暂存在围绕行星运行的轨道器中,这对本来存储资源就受到限制的轨道器造成了沉重的存储负担。IDRP 也在进行路由规划的时候充分考虑各节点的存储压力,尽力减少节点存储负担。

1 IDRP 协议

1.1 节点知识库

由于 DTN 网络的间断连接特性,不能假定在网络中存在端到端链路。在数据源节点发送数据时,很难规划出一条明确的数据传输路径。深空 DTN 的路由问题的实质其实是 DTN 节点的下一跳选择问题。同时,由于 DTN 链路的长延时特性,即使是同区域的节点,也很难及时准确地获取和它不相邻的节点的状态。

IDRP 协议允许邻居节点之间获取彼此状态信息,并以此做出路径选择。每个 DTN 节点需要维护以下数据:

首先,节点 i 需要为同一区域内的全部的 n 个邻居节点(可以与其接触的节点)维护一个计时器集合 $Tmr_i = \{Tmr_{i1}, Tmr_{i2}, \dots, Tmr_{in}\}$,每当节点 i 和节点 $j(1 \leq j \leq n)$ 之间的连接断开时,启动对应计时器 Tmr_{ij} ,当连接恢复时,停止计时并记录断开间隔 DI 。同时,节点 i 还需要维护本区域连接状态知识库 $LS = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ 。其中, $C_j(1 \leq j \leq n) = \{DS, DA, DL, DD\}$,包括 4 个元素:

最短断开时间 DS :节点 i 和节点 j 的连接历史中的最小断开间隔。若在通信过程中出现了比 DS 更小的 DI ,则使用该值替换 DS 。

最长断开时间 DL :节点 i 和节点 j 的连接历史中的最大断开间隔。若在通信过程出现了比 DL 更大的 DI 且此间隔未超过 DD ,则使用该值替换 DL 。

平均断开时间 DA :节点 i 和节点 j 之前 N 次

连接断开的平均值,根据下式计算:

$$DA_{new} = \frac{(I-1)DA_{old} + DI}{I} \quad (1)$$

在每个节点开始运行之前,会为其设置一个初始平均值 DA_{ini} 。在系统的第一次计算时,使用 DA_{ini} 代替式(1)中的 DA_{old} 。 I 被称为惯性因子,它显示了一次特定的断开间隔 DI 对平均断开时间 DA 的影响程度。惯性因子 I 越大,平均间隔 DA 的波动就越平缓,反之亦然。然而,在系统刚开始工作时,较小的 I 值更容易使节点快速的摆脱初始平均值对于节点运行状态的影响。

丢失时间 DD :如果节点 i 和节点 j 之间的断开时间大于 DD ,则认为节点 j 不再是节点 i 的邻居节点。节点 i 冻结和节点 j 有关的计时器和连接状态集 C_{ij} ,并在做路径规划时不再考虑 j 节点。一般情况下, DD 可以选取为 DL 的 10 倍或者更多。

此外,节点还需要维护自身的存储器消耗参数 B_o 。 B_o 是一个介于 0 和 1 之间的数,定义为节点存储区占用量/存储区总容量。

最后,如果节点 i 是一个网关节点,它还需要维护一张区域路由表以及可以与其通信的相邻区域网关的连接状态集合 $LSR = \{R_1, R_2, \dots, R_m\}$, $R_j(1 \leq j \leq m) = \{RS, RA, RL, RD\}$,维护方法同 LS 。区域路由表存储了达到目的区域的下一跳区域选择,格式为: {本地区域,目的区域,下一跳区域}。到某个特定的区域可能有不同的路由选择, {火星,地球,地球} 代表着从火星向地球的直接连接,而 {火星,地球,月球} 则代表由火星发送向地球的信息首先经过月球的中继。路由表中的每个路由选择都有一个对应的区域路由优先级因子 WR ,若该路由为到达目的区域的直接连接时, $WR = 1$ (如表 1 所示)。

表 1 地火通信区域路由表

Tab. 1 Regional routing table in Mars communication

本区域	目的区域	下一区域	WR
火星	地球	地球	1
火星	地球	月球	0.25

1.2 路由信息交换

由于深空通信条件的限制,区域之间的通信延迟往往十分巨大,获得其他区域的节点状态既会浪费宝贵的带宽资源又不准确(以地火通信为例,会带来 4~20min 的延迟)。因此,在 IDRP 协议中,路由信息交换仅发生在同区域的节点之间,

不同区域的节点之间不进行路由信息的交换。

当节点 i 与同区域内的另外一个节点 j 发生通信接触时,需要向对方提供自身的存储器消耗参数 B_{oi} 以及到其他相邻节点的预期连接时间集合 $D_i = \{D_{i1}, D_{i2}, \dots, D_{in}\}$ 。 $D_{im} = T_{im} - T (1 \leq m \leq n)$ 。 T 为当前时间。 T_{im} 是节点 i 与相邻节点 m 的连接概率达到预期概率门限 P_{th} 的时间,即 $P(t = T_{im}) = P_{th}$ 。记 D_i 中元素的最小值为 D_{imin} 。我们同时定义 D_{gi} 表示到节点 i 到相邻的网关节点的预期连接时间的集合。 D_{gi} 是 D_i 的一个子集。 D_{gi} 中元素的最小值记为 D_{gimin} 。

假设 $F(t)$ 是节点 i 和节点 j 之间预期连接的概率分布函数,则有 $F(T_{im}) = P_{th}$, $F(DS) = 0$, $F(DL) = 1$, $F(DA) = 1/2$ 。可以使用两种方式构造函数 $F(t)$,第一种方法是认为 $F(t)$ 在 $[DS, DA)$ 和 $[DA, DL]$ 区间内都是服从均匀分布的,即

$$F(t) = \begin{cases} \frac{t - DS}{2(DA - DS)}, & DS \leq t < DA \\ \frac{t - DA}{2(DL - DA)} + \frac{1}{2}, & DA \leq t \leq DL \end{cases} \quad (2)$$

第二种方法是用幂函数逼近 $F(t)$,即

$$F(t) = \left(\frac{t - DS}{DL - DS}\right)^k, \quad DS < t < DL \quad (3)$$

$$k = \frac{1}{\log_2(DL - DS) - \log_2(DA - DS)} \quad (4)$$

相比较而言,第一种逼近方式的运算量较小,更符合深空通信场景的需求。第二种逼近方式更加准确一些,但会带来相对大一些的运算量。两种逼近方式的归一化概率分布函数如图 1 所示。

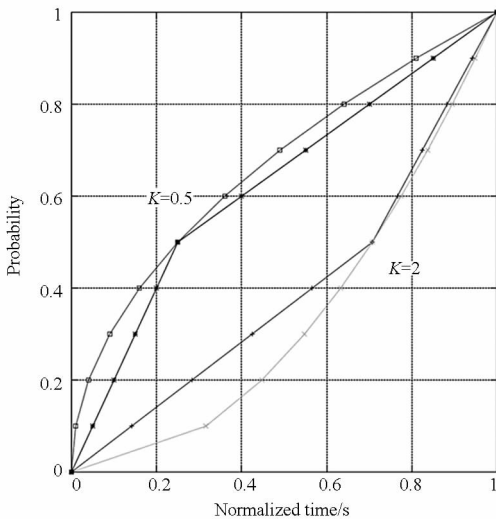


图 1 两种逼近方式的归一化概率分布函数

Fig. 1 Normalized probability of two approximations

如果接触的双方都是网关节点,还需要交换到相邻区域的网关节点的预期连接时间集合 $D'_i =$

$\{D'_{i1}, D'_{i2}, \dots, D'_{in}\}$ 。 D'_i 的计算方法同 D_i 。我们同时定义 D'_{ri} 表示到所有下一跳区域的所有网关节点的预期连接时间的集合。 D'_{ri} 是 D'_i 的一个子集。 D'_{ri} 中元素的最小值记为 D'_{rimin} 。

1.3 星际网络路由过程

星际网络的路由包括区域间路由和区域内路由,一个典型的跨区域行星际路由过程包括区域间路由—区域内路由—区域间路由 3 个过程(如图 2 所示)。区域间的路由指的是信息在不同区域的网关之间的传输。此时,区域间路由的起点是某个区域的网关节点,终点是另外一个区域的网关节点。区域内路由指的是在同一区域内的路由。当前区域是区域间路由的终点时,路由的起点是该区域的网关节点,终点是区域内的某一特定目标节点。若当前区域是区域间路由的起点,则区域内路由的起点是本区域内的某一个非网关节点,终点是该区域的任意一个网关节点。

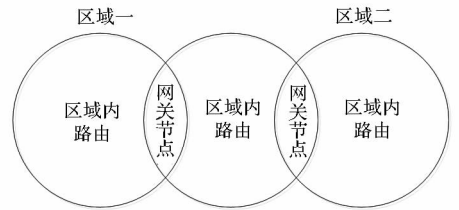


图 2 行星际路由过程

Fig. 2 Interplanetary routing procedure

1.3.1 区域内路由

如果非网关节点 i 中的信息的目的节点位于另外一个区域,则区域内路由的目的是尽快将信息传送到本区域的网关节点,并在进行路径选择的时候考虑存储容量的问题。

记和节点 i 有可用连接的节点集合为 L , L 中所有的非网关节点的集合为 $N = \{N_1, N_2, \dots, N_p\}$, L 中所有网关节点组成的集合为 $G = \{G_1, G_2, \dots, G_q\}$, 则 $L = N \cup G$ 。节点 i 按照如下方式做路由选择。首先,检查集合 G 是否为空集。若集合 G 不是空集,即目前有网关节点与节点 i 保持连接,则比较 G 中的所有节点的存储区占用参数 $B_{om} (1 \leq m \leq q)$,并向拥有最小的 B_{om} 的节点传输信息。若集合 G 是空集,则 $L = N$ 。计算节点 i 自身的路由权重函数 LW_0 和集合 N 中所有节点的路由权重函数 $LW_n (1 \leq n \leq p)$ 。比较 $LW_n (0 \leq n \leq p)$ 并向拥有最小 LW_n 的节点传输信息,若最大值是 LW_0 ,则不向任何节点传输信息,等待下一次连接状态改变机会。 LW_n 定义为

$$LW_n = D_{min}(1 + NB_{on}) \quad (5)$$

其中, N 用来表示存储区消耗因子 B_{on} 在路由

计算时所占的权重。当 $N=0$ 的时候,不考虑存储器容量对于路由选择的影响。在此处, D_{min} 取节点 n 对应的集合 D_{gn} 中元素的最小值 D_{gnmin} 。

若节点 i 中的信息的目的节点是位于本区域的节点 k , 则区域内路由的目的是尽快地将信息传送到节点 k , 并在进行路径选择的时候考虑存储器容量的影响。

记和节点 i 有可用连接的节点集合为 $L = \{l_1, l_2, \dots, l_p\}$, 节点 i 根据以下方式做路由选择: 首先, 计算节点 i 自身的路由因子 LW_0 和 L 中所有节点的路由因子 $LW_n (1 \leq n \leq p)$, 在计算 LW_0 时 D_{min} 取 D_{ik} , 计算 $LW_n (1 \leq n \leq p)$ 时 D_{min} 取 D_{nk} ; 之后, 比较 $LW_n (0 \leq n \leq p)$ 并向拥有最小 LW_n 的节点传输信息, 若最小值是 LW_0 , 则不向任何节点传输信息, 等待下一次连接机会。

1.3.2 区域间路由

由于区域间的通信往往有非常大的延迟, 不同区域的网关节点之间不进行路由信息交换。区域路由间的下一跳区域由当前存在的区域间连接状态决定。当网关节点 i 建立或断开了一个到另一个网关节点 j (j 既可以是本区域的网关节点, 也可以是相邻区域的网关节点) 的连接时, 节点 i 按照如下方式做出路由选择:

首先, 节点 i 查询当前可用的连接中, 是否存在到目的区域的直接连接。若存在到目的区域的直接连接, 则指定目的区域为下一跳区域。否则, 根据优先级顺序查询区域路由表, 找出存在可用连接的最高优先级区域, 并将其指定为下一跳区域。

之后, 查询到下一跳区域的可用连接。若仅有一条到下一跳区域的可用连接, 则使用该连接传送数据。若存在多条到下一跳区域的可用连接, 则根据连接建立时间的先后选择下一跳节点。

若使用如上方法无法选出一个可用的下一跳节点时, 节点 i 需要判断是否需要利用本区域的其他网关节点进行数据传输。首先, 节点 i 计算自身的最小路由权重 LWR_0 。定义 LWR_{ij} 是节点 i 的区域路由表中第 j 个备选路由的路由权重参数, LWR_0 是 LWR_{ij} 中的最小值。同时, 节点 i 为所有 (共 p 个) 与自己有可用连接的本区域网关节点计算相应的最小路由权重参数 $LWR_n (1 \leq n \leq p)$ 。比较 $LWR_n (0 \leq n \leq p)$ 并向拥有最小 LWR_n 的节点发送信息。若最小值是 LWR_0 , 则不向任何节点发送信息, 等待下一次连接状态改变。

$$LWR_{nj} = D_{min}(1 + MB_{on})WR_j \quad (6)$$

其中, M 用来表示存储区消耗因子 B_{on} 在路

由计算时所占的权重。当 $M=0$ 的时候, 不考虑存储器容量对于路由选择的影响。在此处, D_{min} 取节点 n 对应的集合 D'_m 中元素的最小值 D'_{min} 。

2 仿真结果及分析

2.1 仿真场景

本文的仿真场景包括火星 (图 3) 和地球 2 个 DTN 域, 总共 7 个 DTN 节点。Rover 是在火星表面进行科学数据采集的探测器, 位于火星水手大峡谷附近。Loworbit1 和 Loworbit2 是围绕火星轨道运行的低轨道卫星, 他们不具备跨区域数据传输能力, 但可以在本区域中担任数据传输中继。Equatorial 和 Polarization 是围绕火星运行的中轨道卫星, 都具有跨区域数据传输能力, 是火星区域的网关节点。Equatorial 围绕火星赤道运行, Polarization 围绕火星极轨轨道运行。本场景的地球区域包括任务控制中心 (位于中国北京) 和一个地面中转站 (位于智利圣地亚哥) 的地面站, 两个地面站皆具备跨区域数据传输能力。科学数据由火星探测器生成, 目标节点是任务控制中心。

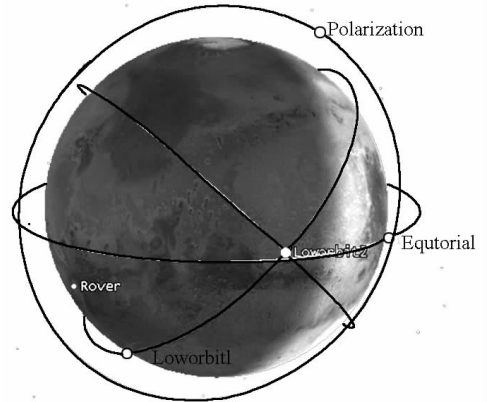


图 3 火星域节点示意图

Fig. 3 DTN nodes in the Mars region

火星区域任意两节点之间的通信带宽设置为 4Mbps, 延时 2s。地—火链路的通信带宽设置为 1Mbps, 延时 1200s。北京站和圣地亚哥站之间采用固态连接, 带宽 10Mbps, 延时 200ms。数据包大小为 1Mbits。探测器以 680Kbps 的固定速率产生数据, 即每 3s 生成 2 包。仿真总共进行 24h。

2.2 评价准则

本文中使用了以下 2 个标准来评价仿真结果: 1) 投递成功率, 2) 平均传输延迟。

投递成功率是目标节点 (北京站) 成功接收到的 bundle 数量与探测器生成的总的 bundle 数量的比值。投递成功率用来描述在仿真时间内数据被成功传输至目标节点的概率, 通常都小于 1。

传输延迟指的是从某一个 bundle 从生成到目标节点成功接收所经历的延迟。平均传输延迟是所有被目标节点成功接收的 bundle 的传输延迟的平均值。在仿真结束时,未被目标节点成功接收的 bundle 不计入考虑。

另外,对于空间节点来说,由于存储资源十分有限,对空间节点存储区占用的关注也是十分必要的。

2.3 仿真结果

基于上述的仿真场景,进行三次仿真。在第一次仿真时,探测器使用一种改进的泛洪路由的路由策略发送信息:1)探测器与任意火星域轨道器建立连接时,都向其发送数据;2)同时建立与网关节点和地轨卫星的连接时,优先向网关节点发送数据;3)火星域网关节点之间不发送数据。第二次仿真时,所有节点使用 IDRP 协议进行路由决策。其中,概率门限 $P_{th} = 0.5$,惯性因子 $I = 10$,存储因子权重 N 和 M 都取值为 1。第三次仿真时,探测器不向地轨卫星发送数据,仅向网关节点发送数据。

图 4 给出了三次仿真的投递率比较。由图中可以看出,在仿真时间内,采用 IDRP 协议做路由决策时,获得了最高的投递率 0.703。比仿真 1 和仿真 3 的投递率分别高出 14% 和 21%。

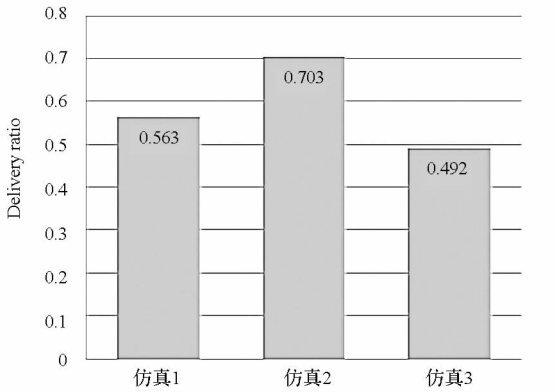


图 4 不同路由策略的投递率

Fig. 4 Delivery ratio of the 3 simulations

图 5 给出了三次仿真的平均传输延时比较。由图中可以看出,在仿真时间内,采用 IDRP 协议做路由决策时,获得了最短的平均传输延时 11012s。比仿真 1 和仿真 3 的平均传输延时分别减少了 50.5% 和 57.8%。

图 6~8 分别给出了三次仿真中,火星域节点的存储器消耗情况。从图中可以看出,在仿真 1 和仿真 3 中,Equatorial 卫星的存储器压力十分巨大,在仿真结束时,无法释放的存储区容量达到了

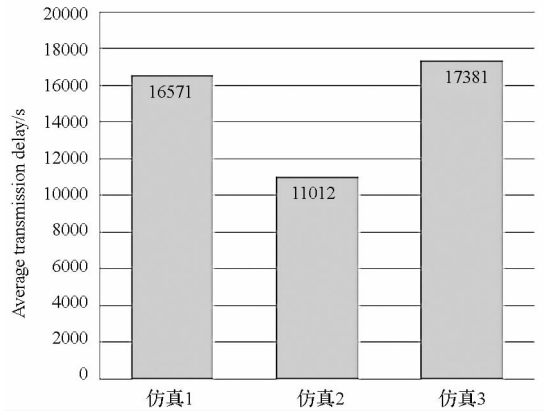


图 5 不同路由策略的平均传输延时

Fig. 5 Average transmission delay of the 3 simulations

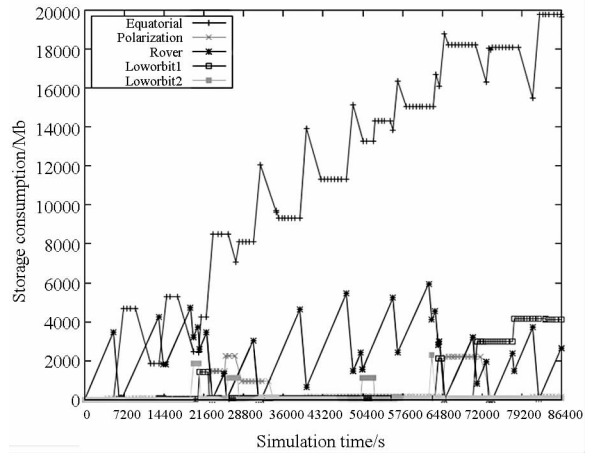


图 6 仿真 1 中各节点的存储消耗

Fig. 6 Storage consumptions in simulation 1

20Gbit。使用 IDRP 协议之后,节约了约 30% 的 Equatorial 卫星存储空间,并合理利用了 Polarization 卫星的存储空间,从而增加了地—火链路的通信机会,提高了投递率。

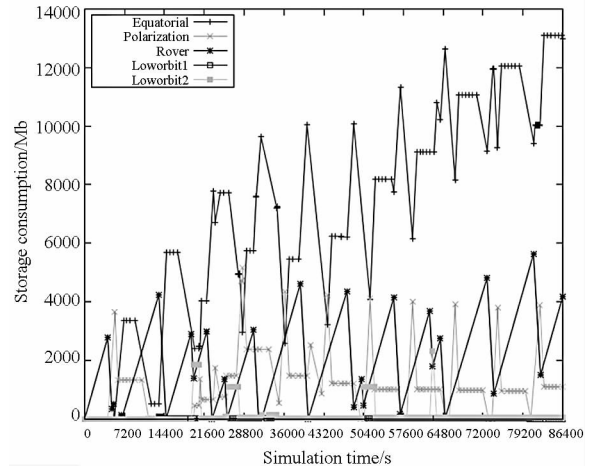


图 7 仿真 2 中各节点的存储消耗

Fig. 7 Storage consumptions in simulation 2

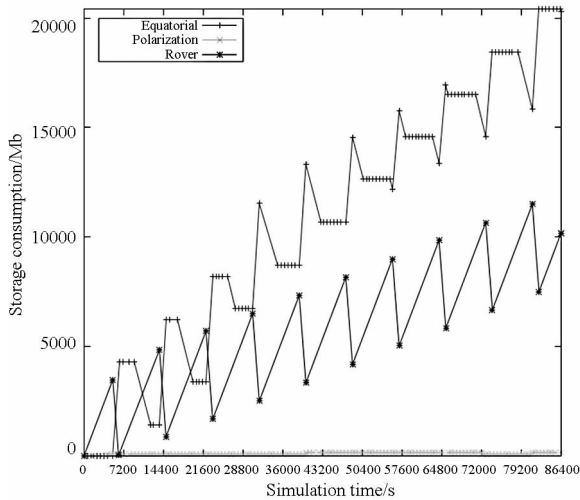


图 8 仿真 3 中各节点的存储消耗

Fig. 8 Storage consumptions in simulation 3

3 结论

IDRP 利用节点的历史连接信息维护本地连接状态知识库,并通过本地连接状态知识库对该节点与其相邻节点的连接恢复时间做出预测。文中给出了平均预测和指数预测两种恢复时间预测方法。IDRP 将星际网络的路由划分为区域间路由—区域内路由—区域间路由 3 个过程,并详细说明了每个过程中如何使用连接状态知识库和存储器消耗参数进行路由选择。使用地—火通信场景进行协议性能的仿真分析。提出了投递成功率和平均传输延迟两个性能评价标准。仿真结果表明 IDRP 协议可以达到较高的投递成功率以及较低的平均传输延迟,同时有效利用节点存储资源。

在 IDRP 协议中,节点的路由知识库主要依靠本地历史连接信息生成,避免了对网络中其他节点的运行状况的依赖,不会由于网络拓扑的变化而降低知识库的可靠性。同时,IDRP 协议的计算量较小,不会对深空节点的计算能力造成过大压力。最后,IDRP 协议合理地利用了节点的存储资源,可以有效地避免网络拥塞。以上特点使得

IDRP 协议在深空 DTN 任务中具有很好的实用性,可以有效地应用在未来的深空通信任务中。

参考文献 (References)

- [1] Burleigh S, Cerf V, Durst R, et al. The interplanetary internet: a communications infrastructure for Mars exploration[J]. *Acta Astronautica*, 2003, 53(4-10): 365-373.
- [2] Durst R, Feighery P, Scott K. Why not use the Standard Internet Suite for the Interplanetary Internet[R/OL]. MITRE White Paper, 2002. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.142.8972&rep=rep1&type=pdf>.
- [3] Fall K. A delay-tolerant network architecture for challenged internets [C]//Proceedings of the 2003 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications, 2003: 27-34.
- [4] McMahon A, Farrell S. Delay and disruption tolerant networking[J]. *IEEE Internet Computing*, 2009, 13(6): 82-87.
- [5] Burleigh S, Hook A, Torgerson L, et al. Delay tolerant networking: An approach to interplanetary internet[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2003, 41(6): 128-136.
- [6] Scott K, Burleigh S. Bundle protocol specification[S/OL]. <http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc5050.txt>, 2007.
- [7] Fall K, Hong W, Madden S. Custody transfer for reliable delivery in delay tolerant networks, IRB-TR-03-030[R]. Intel Research Berkeley, 2003.
- [8] Yu Y, Chen X M. Research on custody transfer service in delay tolerant network[J]. *Journal of Networks*, 2013, 8(8): 1713-1719.
- [9] Wu J, Yang S H. Small world model-based polylogarithmic routing using mobile nodes[J]. *Journal of Computer Science and Technology*, 2008, 23(3): 327-342.
- [10] Baouche C, Freitas A, Misson M. Routing mechanism for a DTN using WSN nodes for localization applications [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, 2011: 514-519.
- [11] Mousannif H, Khalil I, Olariu S. Cooperation as a service in VANET: implementation and simulation results[J]. *Mobile Information Systems*, 2012, 8(2): 153-172.
- [12] Nordemann F, Tönjes R. Transparent and autonomous store-carry-forward communication in delay tolerant networks (DTNs)[C]//Proceedings of IEEE ICNC'12, 2012: 761-765.
- [13] Vassilaras S, Yovanof G S. Shortest route mobility assisted packet delivery with soft maximum delay guarantees in mobile ad hoc networks[J]. *Ad Hoc Networks*, 2012, 10(6): 886-900.