

## 低地球轨道卫星网络节能方法\*

刘波,唐竹,刘谱光

(国防科技大学计算机学院,湖南长沙 410073)

**摘要:**通常卫星的唯一能源来源是太阳能,因此星上网络设备的能源供应问题比地面网络的更加严峻。通过修改和扩展链路容量受限的最小代价多商品流模型来适应卫星网络这一特殊的体系结构,并基于低轨道卫星网络的多重覆盖机制和流量分布模型,改进现有的启发式算法来关闭冗余的卫星节点、星地链路和星间链路。在满足链路利用率和路由跳数增加比例约束的条件下,仿真实验中关闭上述三种参数的比例分别可达59%、61%和72%,卫星网络的总体节能比例可达65%。

**关键词:**节能;低轨道卫星网络;快照路由算法;最小代价多商品流模型

**中图分类号:**TP393.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2018)02-060-06

## Energy-saving method in low earth orbit satellite networks

LIU Bo, TANG Zhu, LIU Puguang

(College of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Solar power is normally the only persistent power for satellites, so the energy supply problem of onboard devices is more difficult than that of the terrestrial networks. To fit the special architecture of satellite networks, the capacitated multi-commodity minimum cost flow model with constrained link capacity was modified and extended. Meanwhile, based on the multi-coverage scheme and traffic distribution patents in satellite networks, the existing heuristic algorithms were improved to turn off the unnecessary satellites, up-down links and inter-satellite links for energy saving. Under the constraints of link utilization and routing hops increasing ratio, the closing ratios of the three parameters are up to 59%, 61% and 72% respectively, and the total energy saving ratio can be up to 65% in simulation.

**Key words:** energy-aware; low earth orbit satellite network; snapshot routing algorithm; capacitated multi-commodity minimum cost flow model

天地一体化网络信息系统中,天基网络系统的有效性非常重要,作为天基网络节点的星载网络设备的工作状态则是一个非常关键的决定因素。在卫星整体设计中,能耗指标非常紧张,能够留给网络设备的空间往往十分有限。与对地静止轨道(GEosynchronous Orbit, GEO)卫星长期被太阳照射相比,低地球轨道(Low Earth Orbit, LEO)卫星在几乎每一轮自转周期内都会移动到地球的阴暗面,在此期间卫星只能依靠太阳能电池供电。因此,对于LEO卫星网络而言,采用合理的路由方法,合理分配网络流量,尽可能地关闭空闲的星载网络设备和星间、星地链路,折中选择路由跳数与处理开销,将成为降低能耗的有效途径。

本文采用经典的快照路由算法<sup>[1]</sup>,将网络周期划分为多个连续的时间片,在每个时间片内确保网络的拓扑结构保持不变,从而隐藏卫星网络

的动态性。通过借鉴链路容量受限的最小代价多商品流模型思想<sup>[2]</sup>,针对卫星网络这一特殊应用环境的特点进行了修改和扩展,提出了新的卫星节点流量启发式算法。在满足星间、星地链路容量的限制条件下,通过尽可能地关闭不必要的卫星网络节点、星地和星间链路,调整卫星网络的流量分布,有效降低卫星网络的总能耗。

### 1 相关研究

从Gupta等<sup>[3]</sup>引入单个网络设备节能的概念后,Barford等<sup>[4]</sup>从特定的拓扑出发,提出通过打开必需的网络设备来减少整个网络能耗的方法,并采用标准的容量受限的最小代价多商品流(Capacitated Multi-commodity minimum Cost Flow, CMCF)模型来描述该问题,随着设备的增加,算法的复杂性快速增加。而Chiaraviglio等<sup>[5]</sup>以更

\* 收稿日期:2017-01-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61202488,61379147)

作者简介:刘波(1963—),男,湖北武汉人,研究员,硕士,硕士生导师,E-mail:boliu@nudt.edu.cn

为普遍实用的骨干网络模型为基础,将该问题归结为链路容量受限的最小代价多商品流模型问题,即 NP-hard 问题,并提出了启发式算法求解近似最优解,测试结果表明节点和链路的关闭比例分别能达到 30% 和 50%。Fisher 等<sup>[6]</sup>提出了一种简单的启发式算法来关闭主干网络中的一束链路。Cianfrani 等<sup>[2]</sup>对开放式最短路径优先(Open Shortest Path First, OSPF)协议进行了修改以减少链路的使用,并发现真实的网络中有超过 60% 的链路可以关闭。

上述方法均是针对地面有线和无线网络采取的节能措施,而对于卫星网络这一特定的网络场景,由于通信链路以及网络拓扑的特殊性,直接应用上述方法均不能获得较好的节能效果。

在卫星网络领域,Fu 等<sup>[7]</sup>分析了单颗卫星的最优能量分配和准入控制问题,通过动态规划的方法获得最优策略来选择服务哪个传输请求以获得最大的系统收益。Hefeeda 等<sup>[8]</sup>将卫星的多媒体广播流以高比特率的 burst 的形式发送,而不是持续的低速模式发送,从而在发送的空闲时间关闭射频(Radio Frequency, RF)以节约能源;通过选择不同信道速率的 burst 时间片的长度和起始时间调度(同样为 NP-complete 问题),提出了多项式时间可解的次优化方法来最大化网络范围内的节能效果。然而,上述方法大多针对单颗卫星的能源分配进行优化,没有考虑到整个卫星网络或卫星星座的节能性能。

卫星平台及其子系统如图 1 所示,其中电池

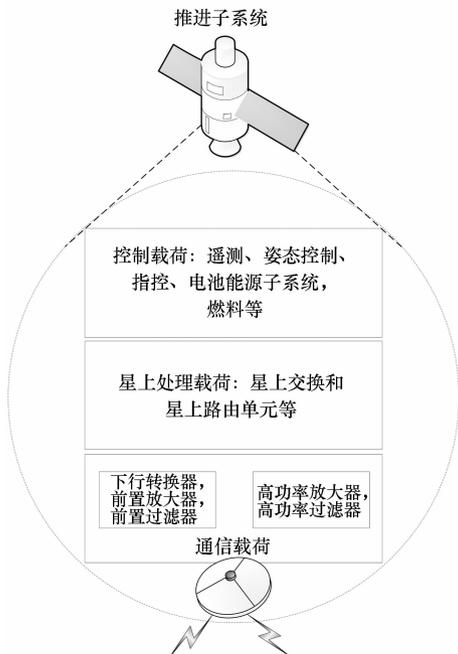


图 1 卫星平台及其子系统示意图<sup>[9]</sup>

能源子系统为产能部件,其余推进、遥测、姿态控制、指控、星上处理、通信等子系统均为耗能部件。对于在固定轨道稳定运行的 LEO 网络通信卫星而言,通信子系统所占的能耗比例应远高于其余子系统。因此,在卫星网络中作为网络节点的卫星,其耗能部件主要包括上下行链路转发器、星间链路转发器、星上处理器以及平台控制和维护部件等<sup>[9]</sup>,其中上下行链路转发器和星间链路转发器由于使用频繁,耗能比重最大。因而对于全球多重覆盖的 LEO 卫星网络而言,通过关闭卫星节点和链路转发器来节约能源的方法,将具有很好的节能应用前景。

## 2 卫星网络模型

### 2.1 问题描述

在此,卫星网络模型采用类似铱星的极轨道全球覆盖星座,卫星具有星间链路和星上路由功能,网络结构类似 Manhattan 网络结构<sup>[10]</sup>。通过采用虚拟拓扑<sup>[11]</sup>的方法,假设卫星网络拓扑在一个快照内是固定不变的。根据卫星运动的周期性和可预测性,每个快照内的卫星网络拓扑也是可预知的。

卫星网络作为通信骨干网络,通过上下行链路汇聚地面终端节点的数据流量,并通过卫星网络路由转发。铱星系统星地覆盖在任何时刻,地面固定节点同时被 1 颗以上的铱星卫星节点覆盖,因此可以通过将流量引入相邻的多重覆盖卫星上,关闭冗余的星地链路。LEO 卫星星间链路网络本身的冗余链路使得星间链路(Inter-Satellite Links, ISLs)的关闭成为可能。因此,覆盖区域内有活跃地面站的卫星节点也可以被关闭以达到节能效果。

需要说明的是,与地面骨干网络节能问题<sup>[5]</sup>比较而言,卫星将网络链路分为上下行链路(Up-Down Links, UDLs)和 ISLs,其中 ISLs 与骨干网络<sup>[5]</sup>中链路具有相同的属性,而具有广播覆盖属性的 UDLs 则是卫星网络所特有的。为了简化分析,假设卫星采用单波束转发器,一颗卫星上有一个 UDL 转发器和多个 ISL 转发器,而地面节点只有一副天线,一次只接入一颗卫星。卫星的星地链路是一对多的关系,一条星地链路包含多个信道,可以同时给多个地面节点服务,只有关闭 UDL 转发器即关闭所有星地链路信道时,才能实现节能的目的。

此外,由于卫星的测控需要,卫星节点并不能完全断电,文中所说的关闭卫星节点是指关闭卫

星的通信模块,包括上下行链路、星间链路和星上处理模块。关闭卫星节点和链路会导致大量的最短路径断开,增加平均路由长度、路由延时和计算开销。

在通信接口未关闭之前,考虑到通信部件总是处于工作模式,因此假设设备的能耗与传输次数相互独立。

## 2.2 链路容量设计

由于网络模型采用网络流的形式,对链路设定一个实际网络中的链路容量值并不能有效地反映卫星网络的链路拥塞状况,因而在已知最小跳数路由流量分布的情况下,选用 UDL 和 ISL 最高流量值的  $\beta$  ( $\beta = 3$ ) 倍作为 UDL 和 ISL 链路最大容量。设在最小跳数路由时的流量分布情况下,所有卫星的 UDL、ISL 链路流量最大值为  $f_{\max}^{\text{UDL}}$ ,  $f_{\max}^{\text{ISL}}$ , 从而 UDL、ISL 的链路最大容量为:

$$c^{\text{UDL}} = \beta \cdot f_{\max}^{\text{UDL}} \quad (1)$$

$$c^{\text{ISL}} = \beta \cdot f_{\max}^{\text{ISL}} \quad (2)$$

显而易见,现有的网络容量能够满足网络的流量需求。但当关闭空间网络的部分 UDL、ISL 后,剩余的 ISL 链路容量会成为限制其流量汇聚的因素之一。

## 2.3 网络流量设计

假设地面节点统一为地面终端节点,而不考虑卫星网络管理等节点,只有地面节点之间存在数据流量,该流量通过卫星网络中转传输。由于近期末出现关于卫星网络流量分布的资料,本文仍基于 Voilet 等给出的关于 2005 年的卫星网络电话流量预测<sup>[11]</sup>来模拟当前的卫星网络流量,该预测将全球分为  $24 \times 12$  个经纬度二维等分的区域,假定每个区域 (cell) 会产生的电话流量 (单位为:百万分钟/年) 为  $f_{\text{cell}}$ 。采用该数据流量的比例来产生卫星网络流量。设每个 cell 中的端到端流量参数为  $t^{sd}$ ,  $t^{sd}$  与 cell 流量值  $f_{\text{cell}}$  成正比,与 cell 间距离  $distance(s, d)$  成反比,即:

$$t^{sd} = \frac{f_s \cdot f_d \cdot \gamma}{[distance(s, d)]^\delta} \quad \forall s, d \in V_{\text{sat}} \quad (3)$$

式中,  $V_{\text{sat}}$  表示卫星节点集合,  $\gamma = U[0, 1]$  为 0、1 之间均匀分布的随机数,用于增加网络流量的随机性。因此,通过合理设定参数值  $\delta$ , cell 中的终端主要与其附近的 cell 进行通信,较远的流量仅存在于流量较高的 cell。  $distance(s, d)$  表示 cell  $s$  与 cell  $d$  中心点之间的地面距离:

$$distance(s, d) = \begin{cases} R \cdot \theta_{sd} & s \neq d \\ \frac{R \cdot \theta_{s(s+1)}}{2} & s = d \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $\theta_{sd}$  为 cell  $s$  与 cell  $d$  之间的地心角,  $R \cdot \theta_{sd}$  为 cell  $s$  与 cell  $d$  之间的地球表面距离。当 cell  $s$  内部存在数据流量时,该  $distance(s, d)$  选用 cell  $s$  和右侧临近的 cell  $s+1$  之间距离的一半表示。

为了使流量模型更接近现代宽带移动卫星网络的真实流量,本文使用流量参数  $t^{sd}$  作为比例参数,计算 cell  $s$  与 cell  $d$  之间的流量  $T^{sd}$  为:

$$T^{sd} = \frac{t^{sd}}{N_{\text{sat}} N_{\text{sat}}} \cdot T_{\text{total}} \quad (5)$$

$$\sum_{s=1}^{N_{\text{sat}}} \sum_{d=1}^{N_{\text{sat}}} t^{sd}$$

式中,  $N_{\text{sat}}$  表示卫星节点的数目,  $T_{\text{total}}$  表示网络的总流量值 (单位: Mbit/s)。

## 3 建模分析

假设卫星网络结构为有向图  $G = (V, E)$ 。边集合  $E$  表示网络链路,顶点集合  $V$  表示网络节点,其中的地面节点用  $V_{\text{ground}}$  表示,卫星节点用  $V_{\text{sat}}$  表示。节点数目为  $N = |V|$ ,  $N_{\text{ground}} = |V_{\text{ground}}|$ ,  $N_{\text{sat}} = |V_{\text{sat}}|$ , 链路数目为  $L = |E|$ 。  $c^{\text{UDL}}$  为卫星节点的星地链路容量,  $c^{\text{ISL}}$  为卫星节点的星间链路容量。

假设  $x_{ij}^{\text{ISL}} \in \{0, 1\}$  表示卫星节点  $i$  到卫星节点  $j$  的星间链路是否打开,为 1 则打开,为 0 则关闭; 设  $x_i^{\text{UDL}} \in \{0, 1\}$  表示卫星节点  $i$  的星地链路是否打开; 设  $y_i \in \{0, 1\}$  来表示卫星节点  $i$  是否打开。  $PL_{ij}^{\text{ISL}}$  表示星间链路 ISL <sub>$ij$</sub>  的能耗值;  $PL_i^{\text{UDL}}$  表示星地链路 UDL <sub>$i$</sub>  的能耗值;  $PN_i$  表示卫星节点  $i$  的能耗值,包括 ISL、UDL 和星上处理 (On-Board Processing, OBP) 部件三部分。

在考虑关闭节点和链路以降低能耗的同时,也需要考虑节点和链路关闭对路由路径长度的影响,假设  $hop_{\text{routing}}$  表示当前卫星网络中点到点路由路径的总跳数的增长比例,  $hop_{\text{flow}}$  表示网络流量部署过程中所流经的路由路径总跳数的增长比例。假设  $\eta$  为流量所经过路由跳数增长比例的最大值,并满足  $hop_{\text{flow}} \leq \eta$ 。

流量相关参数定义:

1) 设  $T^{sd}(s, d = 1, \dots, N_{\text{ground}})$  表示从源节点  $s$  到目的节点  $d$  的总流量;

2) 设  $f_{ij}^{sd} \in [0, t^{sd}]$  ( $i, j = 1, \dots, N; s, d = 1, \dots, N_{\text{ground}}$ ) 为终端源节点  $s$  到目的节点  $d$  之间的流量从链路  $E_{ij}$  上流过的流量值;

3) 设  $f_{ij}(i, j = 1, \dots, N_{\text{sat}})$  表示星间链路  $E_{ij}$  上流过的总的流量值,则有

$$f_{ij} = \sum_{s=1}^{N_{\text{ground}}} \sum_{d=1}^{N_{\text{ground}}} f_{ij}^{sd} \quad (6)$$

4) 设  $f_i^{\text{UDL}} \in [0, t^{sd}]$  ( $i = 1, \dots, N_{\text{sat}}$ ) 为卫星节

点  $i$  的 UDL 链路转发器通过的总流量值,设卫星节点  $i$  覆盖的地面终端节点集合为  $C_i, N_{C_i} = |C_i|$ ,可得

$$f_i^{\text{UDL}} = \frac{1}{2} \cdot \sum_{s=1}^{N_{C_i}} \sum_{d=1}^{N_{C_i}} T^{sd} \quad (7)$$

本文所关注的问题,即在保证网络连通性和数据传输服务质量的条件下,最大限度地关闭卫星网络中的卫星和链路,可采用整数线性规划方法表示如下:

最小化目标函数:

$$P_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{sat}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{sat}}} x_{ij}^{\text{ISL}} PL_{ij}^{\text{ISL}} + \sum_{i=1}^{N_{\text{sat}}} x_i^{\text{UDL}} PL_i^{\text{UDL}} + \sum_{i=1}^{N_{\text{sat}}} y_i PN_i \quad (8)$$

约束条件包括:

1) 经典流守恒约束:

$$\sum_{j=1}^N f_{ij}^{sd} - \sum_{j=1}^N f_{ji}^{sd} = \begin{cases} T^{sd} & i = s \\ -T^{sd} & i = d \\ 0 & i \neq s \text{ and } i \neq d \end{cases} \quad (9)$$

$$f_i^{\text{UDL}} = \sum_{s=1}^N \sum_{d=1}^N \left( \sum_{j=1}^{N_{\text{ground}}} f_{ij}^{sd} + \sum_{j=1}^{N_{\text{ground}}} f_{ji}^{sd} \right), i = 1, \dots, N_{\text{sat}} \quad (10)$$

$$f_{ij}^{\text{ASL}} = \sum_{s=1}^N \sum_{d=1}^N f_{ij}^{sd}, i = 1, \dots, N_{\text{sat}}, j = 1, \dots, N_{\text{sat}} \quad (11)$$

2) 链路容量约束:

$$f_i^{\text{UDL}} \leq \alpha c^{\text{UDL}}, i = 1, \dots, N_{\text{sat}} \quad (12)$$

$$f_{ij}^{\text{ASL}} \leq \alpha c^{\text{ISL}}, i = 1, \dots, N_{\text{sat}}, j = 1, \dots, N_{\text{sat}} \quad (13)$$

其中,  $\alpha$  为链路容量系数,即要求链路流量不超过链路最大容量的比例。

3) 节点关闭的条件是该节点的所有链路都关闭:

$$x_i^{\text{UDL}} + \sum_{j=1}^{N_{\text{sat}}} x_{ij}^{\text{ISL}} + \sum_{j=1}^{N_{\text{sat}}} x_{ji}^{\text{ISL}} \leq M y_i, M \in \mathbf{N} \quad (14)$$

4) 路由总跳数增长比例约束:

$$\text{hop}_{\text{flow}} \leq \eta \quad (15)$$

根据上述表达式,该问题可归结为链路容量受限的最小代价多商品流问题<sup>[12]</sup>,由于多商品流问题是 NP-hard 问题,无法在多项式时间内求解,本文提出简单的启发式算法来求解。

## 4 启发式算法

对地面骨干网络节能方法<sup>[5]</sup>中提出的启发式算法进行了修改和完善,考虑了卫星网络上下

行链路特殊的广播属性,即在卫星节点关闭过程中均要检查地面站的全面覆盖,并在卫星节点和链路的排序选择上也加强了贪心算法的渐进效果。具体的算法机制如算法 1 所示。

### 算法 1 启发式算法

Alg. 1 Heuristic algorithm

**初始化:**采用最小跳数路由算法计算卫星节点间的点到点路由,并将所有的网络流量按照该路由部署到整个卫星网络中。

/\* 预处理阶段 \*/

1. 关闭 UDL、ISL 流量均为 0 的卫星节点
2. **if**  $f_i^{\text{UDL}} = 0$  **then** 关闭卫星  $i$  的 UDL 链路 **end if**
3. **if**  $f_{ij}^{\text{ASL}} = 0$  **then** 关闭卫星  $i$  和卫星  $j$  间的 ISL 链路 **end if**

/\* 卫星节点关闭阶段 \*/

4. 将所有卫星以 UDL 或 ISL 链路流量升序排序
5. **for**  $i = 0$  to 卫星总数  $N_{\text{sat}}$  (按流量排序选取卫星)
6.     **if** 卫星  $i$  的 UDL 覆盖范围存在多重覆盖 **then**
7.         关闭卫星  $i$  及其所有链路
8.     **end if**
9.     计算卫星网络新的最短路径路由和流量分布
10.    **if** 卫星网络无法计算最短路径路由 || 网络流量分布超过某一链路容量 **then**
11.        打开卫星  $i$  及其所有链路
12.    **end if**
13. **end for**

/\* 卫星链路关闭阶段 \*/

14. 将所有卫星以 UDL (ISL) 链路流量升序排序
15. **for**  $i = 0$  to 剩余卫星数目 (按流量排序选取卫星)
16.     关闭卫星  $i$  的 UDL (ISL) 链路
17.     计算卫星网络新的最短路径路由和流量分布
18.    **if** 卫星网络无法计算最短路径路由 || 网络流量分布超过某一链路容量 **then**
19.        打开卫星  $i$  的 UDL (ISL) 链路
20.    **end if**
21. **end for**
- /\* 最终检查阶段 \*/
22. 关闭 UDL、ISL 流量均为 0 的卫星节点

**初始状态:**首先假设所有卫星节点、星地链路和星间链路均处于开启状态,即  $x_i^{\text{UDL}} = 1, x_{ij}^{\text{ISL}} = 1$  ( $i = 1, \dots, N_{\text{sat}}, j = 1, \dots, N_{\text{sat}}$ ),然后使用最小跳数路由算法计算卫星节点间的点到点路由,并将已知区域流量分布按照该路由由路径部署到整个卫星网络中。

算法主体主要包括预处理阶段、卫星节点关闭阶段、卫星链路关闭阶段和最终检查阶段,由于卫星节点的关闭包含星间链路和星地链路的关

闭,因此算法中先考虑卫星节点的关闭。

**预处理阶段:**算法首先关闭 UDL 和 ISL 流量同时为 0 的卫星节点,因为此类卫星节点并没有参与网络流量的转发。然后,关闭所有流量为 0 的星地链路和星间链路。

**卫星节点关闭阶段:**算法首先将卫星节点按链路的流量排序,如 UDL 流量值升序排列 (UDLorder) 或 ISL 流量值升序排列 (ISLorder),然后按照该顺序依次尝试关闭卫星节点,并将网络流量在全网范围内进行重新部署。若关闭该节点后的网络流仍能够满足流量守恒约束式(9)~(11)、链路容量约束式(12)~(13)和路由总跳数增长比例约束式(15),则确认关闭该节点;若网络流无法满足上述约束,则恢复打开该节点,并按照排序依次选择下一节点进行关闭。

UDLorder 排列方法是按照式(10)中的  $f_i^{UDL}$  进行排列,而 ISLorder 则是按照流经该卫星节点的所有星间链路的流量之和进行排列,即:

$$f_i^{ASL} = \sum_{j=1}^{N_{sat}} f_{ij}^{ASL} + \sum_{j=1}^{N_{sat}} f_{ji}^{ASL} \quad (16)$$

**卫星链路关闭阶段:**与卫星节点关闭阶段采用的方法类似,依然采用试探性关闭的方法,首先将链路按照一定的顺序排序,然后依次在每次迭代中关闭一条链路,若此时的网络流仍能满足流量守恒约束式(9)~(11)、链路容量约束式(12)~(13)和路由总跳数增长比例约束式(15),则关闭该链路,否则恢复打开该链路。由于卫星节点必须覆盖地面所有的流量需求,因此即使存在双重覆盖,部分卫星的 UDL 也是不能关闭的。基于上述原因,本算法首先考虑关闭 UDL,其次考虑关闭 ISL。

**最终检查阶段:**算法再次检查是否存在 UDL 和 ISL 流量都为 0 的卫星节点,若存在,则直接关闭该卫星节点。

## 5 算法节能性能分析

通过仿真模拟实验,完成了启发式算法在卫星拓扑快照路由情况下的节能性能分析,即关闭的卫星节点比例、UDL 比例和 ISL 比例。算法程序在五中不同时间的卫星网络拓扑快照中采用随机的网络流量进行测试,参数默认值设定为  $\alpha = 0.5, \beta = 3, \delta = 1, \eta = 1.6$ 。由于文章篇幅限制,未加入参数设置对实验性能影响部分内容。

卫星网络的节能效果如图 2 所示。由于多重覆盖的原因,在预处理时即有 45% 的星地链路可

以关闭,并且网络流量已通过星间链路分布到整个卫星网络,此时没有节点可以直接关闭,只有 2% 的 ISL 可以关闭。通过采用 UDLorder 启发式算法,卫星网络的节能效果较采用 ISLorder 启发式算法的更为明显,其关闭的卫星节点、UDL 和 ISL 分别为 59%、61% 和 72%,均为所提启发式算法的最佳节能效果。假设每个卫星节点、UDL 和 ISL 有相同的功耗值,即  $PL_i^{UDL} = PL_{ij}^{ISL} = 100$ ,  $PN_i = 50$ ,则总的节能比例能达到 65%。

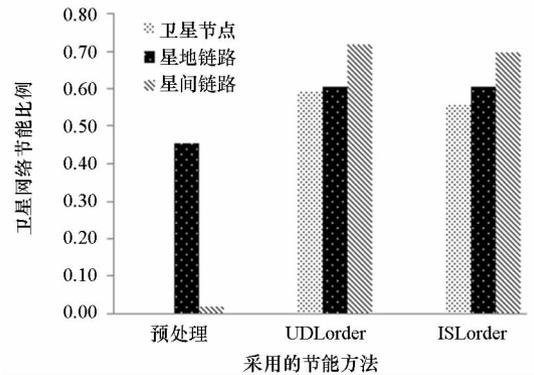


图 2 卫星网络节能比例

Fig. 2 Energy-saving ratio of satellite network

## 6 结论

本文讨论了基于快照路由的卫星网络节能问题,即如何在保证网络连通性和满足一定的链路带宽限制的条件约束下,达到最大化节能效果。将该问题归结为链路容量受限的最小代价多商品流问题,并采用整数线性规划方法对该问题进行了描述。基于卫星的多重覆盖机制,提出了启发式算法将分布在多个卫星上的流量汇聚到单颗卫星上,从而关闭部分不需要的卫星节点、星地链路和星间链路。实验证明,在链路利用率  $\alpha = 0.5$  和路由跳数增加比例  $\eta = 1.6$  的参数设置下,卫星网络的总节能比例为 65%,算法关闭卫星节点、星地链路和星间链路的比例分别可达 59%、61% 和 72%。

## 参考文献 (References)

- [1] Gounder V V, Prakash R, Abu-Amara H. Routing in LEO-based satellite networks [C]//Proceedings of IEEE Emerging Technologies Symposium on Wireless Communications and Systems, 1999: 91-96.
- [2] Cianfrani A, Eramo V, Listanti M, et al. An energy saving routing algorithm for a green OSPF protocol [C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Communications Workshops, 2010: 1-5.
- [3] Gupta M, Singh S. Greening of the internet [C]//Proceedings of ACM Special Interest Group on Data

- Communication, 2003; 19 – 26.
- [4] Barford P, Chabarek J, Estan C, et al. Power awareness in network design and routing [ C ] // Proceedings of the 27th Conference on Computer Communications, 2008; 457 – 465.
- [5] Chiaraviglio L, Mellia M, Neri F. Reducing power consumption in backbone networks [ C ] // Proceedings of the IEEE International Conference on Communications, 2009; 1 – 6.
- [6] Fisher W, Suchara M, Rexford J. Greening backbone networks: reducing energy consumption by shutting off cables in bundled links [ C ] // Proceedings of the First ACM SIGCOMM Workshop on Green Networking, 2010; 29 – 34.
- [7] Fu A C, Modiano E, Tsitsiklis J N. Optimal energy allocation and admission control for communications satellites [ J ]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2003, 11 ( 3 ): 488 – 500.
- [8] Hefeeda M, Hsu C H. On burst transmission scheduling in mobile TV broadcast networks [ J ]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2010, 18(2): 610 – 623.
- [9] Alagoz F, Gur G. Energy efficiency and satellite networking: a holistic overview [ J ]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(11): 1954 – 1979.
- [10] Stephen R P, Richard A R, Carl E, et al. An operational and performance overview of the iridium low earth orbit satellite system [ J ]. IEEE Communications Surveys, 1999, 2(2): 2 – 10.
- [11] Voilet M D. The development and application of a cost per minute metric of the evaluation of mobile satellite systems in a limited-growth voice communications market [ D ]. Cambridge, MA, USA: Massachusetts Institute of Technology, 1995.
- [12] Crainic T G, Gendreau M, Ghamlouche I. Cycle-based neighbourhoods for fixed-charge capacitated multicommodity network design [ J ]. Operations Research, 2003, 51 ( 4 ): 655 – 667.