

一种基于链路稳定性模型的 LEO/MEO 双层卫星网星间链路设计方法

苑 喆 张 军 柳重堪

(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100083)

摘 要 卫星网动态拓扑、长变时延等特性及其所处的复杂空间环境带来的通信干扰是影响网络通信稳定的重要因素。综合考虑这些影响因素,提出了一种衡量星间链路稳定性的模型,并基于此模型给出了 LEO/MEO 双层卫星网的星间链路设计方案。结合具体的星座实例对该方案进行了仿真分析,结果表明通过适当的参数调整该模型可以适应不同的网络性能要求。

关键词 卫星通信, 卫星网, 星间链路, 链路稳定性

中图分类号: TN927

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)06-1086-05

A Link Stability-Based Intersatellite Link Design Strategy for LEO/MEO Two-Layered Satellite Networks

Yuan Zhe Zhang Jun Liu Chong-kan

(School of Electrical and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract Dynamic network topology, long transport delay and interferences from outer space make the intersatellite communications unstable. In this paper, a link stability model of satellite networks is presented. Based on this model, an intersatellite link design strategy is introduced for a LEO/MEO satellite network. The simulation results show that the link stability model is applicable to different performance requirements of satellite networks.

Key words Satellite communication, Satellite networks, Intersatellite links, Link stability

1 引言

宽带卫星通信网络作为未来通信发展的一个重要方向正受到越来越多人的关注,它利用中低轨卫星进行组网,采用星间链路(ISL)进行通信,通过星上路由交换实现业务数据在星间的多跳转发^[1-4]。这种具有星间链路的中低轨卫星通信网在提高系统通信性能、降低通信损耗、促进移动终端可持化等方面具有明显的优势。同时由于系统传输时延的大幅度降低,适合于承载语音、图像等实时交互的多媒体业务。

不同于一般的网络,卫星网中的节点处在不断的运动之中,星间链路随着卫星间相对位置的变化发生着频繁的通断变化,卫星在原有某条星间链路断开后需要建立一条新的链路以维持自身及整个网络的通信能力。因此星间链路设计是卫星网设计中的一个重要内容,它在很大程度上影响着网络整体性能的好坏。Chang 等人在文献[5]中针对单层 LEO 卫星网利用有限状态自动机(Finite State Automaton, FSA)原理,为每个系统时间段计算使得系统业务流量分布最均的链路分配和路由方案以避免瓶颈链路对系统性能的影响。Noakes 等人在文献[6]中利用图论方法来解决若干颗卫星通过星间链路组网中的链路分配及动态切换问题。

随着卫星通信网研究的深入,有人提出了利用高中低轨多层卫星进行组网的体系结构。这种多层卫星组网的方式以其较高的空间频谱利用率、灵活的空间通信等优点逐渐成为研究的

热点^[7-9]。但是网络层次的增多在无形中扩大了网络的规模,增加了星间链路的种类与数量,提高了多层卫星网的星间链路设计的难度。目前,国内外在这方面的研究相对较少,文献[10-12]只是在几何参数特性上对星间链路进行了分析,而没有考虑链路在整个网络通信中的特性。本文针对链路时延、生存时间及空间环境干扰等因素对网络通信性能的影响提出了卫星网星间链路的稳定性模型,并基于此模型给出了一种多层卫星网星间链路设计方案以及此种方案的性能分析。

2 系统组成

LEO/MEO 双层卫星网由 LEO 层和 MEO 层构成。LEO 卫星层由 L 颗 LEO 卫星组成,卫星均匀分布在 k_l 条高度为 H_l 的圆极(或近似圆极)轨道上,每个轨道 L/k_l 颗卫星。将 LEO 卫星按照序号 0 到 $L-1$ 进行排序便于后面使用,如第 k ($1 \leq k \leq k_l$) 条轨道上的第 l ($1 \leq l \leq L/k_l$) 颗卫星序号为 $(k-1) \times L/k_l + l - 1$ 。MEO 卫星层由 M 颗 MEO 卫星组成,卫星均匀分布在 k_m 条高度为 H_m 的轨道上,每条轨道 M/k_m 颗卫星。按照同样的方法对 MEO 卫星编排序号。该 LEO/MEO 双层卫星网的结构如图 1 所示。

在 LEO 层中存在两种星间链路:一种是处于同一轨道上的 LEO 卫星间保持的 LEO 轨内星间链路(LISL);另一种是处于不同轨道上的 LEO 卫星间保持的 LEO 轨间星间链路(LIOL)。在 LEO 层中,第 1 条和第 k_l 条轨道间的区域称为“缝”(Seam),位于缝两侧的卫星的飞行方向是相反的。穿越缝的 LEO 轨间星间链路 LIOL_{Cross-Seam} 会由于卫星间的反向飞行而发生频繁的通断切换。

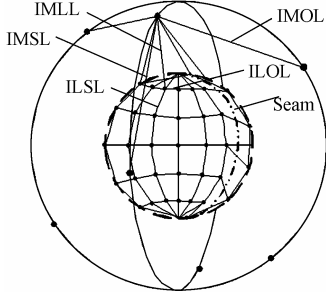


图1 LEO/MEO 双层卫星网的网络结构

Fig. 1 The architecture of LEO/MEO two-layered satellite networks

在MEO层中也存在两种星间链路:一种是处于同一轨道上的MEO卫星间保持的MEO轨内星间链路(MISL);另一种是处于不同轨道上的MEO卫星间保持的MEO轨间星间链路(MIOL)。MEO层内也有缝的存在,穿越缝的MIOL_{Cross-Seam}也会发生通断切换。

此外,在LEO层和MEO层之间还存在有层间星间链路(IMLL)。每颗LEO都会依据一定的策略选择MEO卫星建立IMLL。

3 星间链路设计方案

3.1 星间链路的稳定性模型

多层卫星网中存在有多种星间链路,如轨内链路、轨间链路、层间链路等,不同类型的链路具有不同的特性指标,如链路传播距离、链路生存时间、链路通断条件等。这些特性指标都是影响网络通信稳定的重要参数。星间链路的稳定性就是衡量卫星网中连接两节点间的通信链路能够持续保持连通状态,提供最佳数据传输能力的指标。通过对通信链路稳定性的研究来分析卫星链路生存时间、链路传输延迟、空间环境干扰等多种因素对卫星系统通信性能的影响,尤其是对卫星网动态路由的影响。

定义1 (星间可见性) 如果卫星 S_i 与卫星 S_j 之间的连线与地球表面(也可以是大气层)没有交点,即卫星 S_j 在卫星 S_i 的视距范围内,则称可见的;反之,卫星 S_j 在卫星 S_i 的视距范围外,则称它们是不可见。因此卫星 S_j 对卫星 S_i 的可见性 $V_{S_j \rightarrow S_i}$ 定义为

$$V_{S_j \rightarrow S_i} = \begin{cases} 0, & \text{交点存在} \\ 1, & \text{交点不存在} \end{cases} \quad (1)$$

定义2 (ISL的生存时间) 在一个系统周期内卫星 S_i 与卫星 S_j 间的ISL会发生 N 次的通断切换。假设在 $t_{S_j \rightarrow S_i, k}^{\text{ON}}$ ($k=1, 2, \dots, N$)时刻 S_j 飞入 S_i 的视距范围内,它们之间建立星间链路 $\text{ISL}_{S_j \rightarrow S_i}$;而在 $t_{S_j \rightarrow S_i, k}^{\text{OFF}}$ ($k=1, 2, \dots, N$)时刻 S_j 会飞出 S_i 的视距范围,此时星间链路 $\text{ISL}_{S_j \rightarrow S_i}$ 要被断掉。则此次通断过程中星间链路 $\text{ISL}_{S_j \rightarrow S_i}$ 的生存时间 $T_k(S_j \rightarrow S_i)$ 就是从时刻 $t_{S_j \rightarrow S_i, k}^{\text{ON}}$ 到时刻 $t_{S_j \rightarrow S_i, k}^{\text{OFF}}$ 的持续时间,即

$$\left. \begin{aligned} T_k(S_j \rightarrow S_i) &= t_{S_j \rightarrow S_i, k}^{\text{OFF}} - t_{S_j \rightarrow S_i, k}^{\text{ON}} \\ t_{S_j \rightarrow S_i, k}^{\text{ON}} &: V_{S_j \rightarrow S_i} \uparrow \\ t_{S_j \rightarrow S_i, k}^{\text{OFF}} &: V_{S_j \rightarrow S_i} \downarrow \end{aligned} \right\} k=1, 2, \dots, N \quad (2)$$

在一个系统周期内ISL的生存时间也是动态变化的,定义所有发生动态切换的ISL中生存时间的最大值为系统最大ISL生存时间 T_{\max} 。

定义3 (ISL的剩余生存时间) 在 t 时刻,星间链路 $\text{ISL}_{S_j \rightarrow S_i}$ 的剩余生存时间定义为

$$\left. \begin{aligned} T(S_j \rightarrow S_i, t) &= t_{S_j \rightarrow S_i, k}^{\text{OFF}} - t \\ t_{S_j \rightarrow S_i, k}^{\text{ON}} &\leq t \leq t_{S_j \rightarrow S_i, k}^{\text{OFF}} \end{aligned} \right\} k=1, 2, \dots, N \quad (3)$$

定义4 (ISL的传播时延) 在 t 时刻,星间链路 $\text{ISL}_{S_j \rightarrow S_i}$ 的传播时延定义为

$$D(S_j \rightarrow S_i, t) = r(S_j \rightarrow S_i, t) / c \quad (4)$$

其中 $r(S_j \rightarrow S_i, t)$ 为 t 时刻卫星 S_j 与卫星 S_i 间的距离; c 为光的传播速度。

在一个系统周期内ISL的传播时延也是动态变化的,定义 D_{\min} 为系统最小ISL传播时延。

定义5 (ISL的链路稳定性函数) 在 t 时刻, $\text{ISL}_{S_j \rightarrow S_i}$ 的链路稳定性函数定义为

$$P(S_j \rightarrow S_i, t) = w_d \cdot \left[\frac{D(S_j \rightarrow S_i, t)}{D_{\text{ISL}, \min}} \right]^{-1} + w_i \cdot \left[\frac{T(S_j \rightarrow S_i, t)}{T_{\text{ISL}, \max}} \right] + w_s \cdot P_{\text{SI}} \quad (5)$$

其中 w_d 为ISL传播时延加权系数, w_i 为ISL剩余生存时间加权系数, w_s 为空间干扰加权系数,且 $w_d + w_i + w_s = 1$ 。 P_{SI} 表示复杂的空间环境对卫星间通信的干扰程度。

空间环境对卫星通信(这里主要关注的是对星间通信)的干扰有很多方面,其中有3个主要因素 $P_{\text{SI}}^{\text{Sun}}$, $P_{\text{SI}}^{\text{Earth}}$ 及 $P_{\text{SI}}^{\text{BER}}$ 。 $P_{\text{SI}}^{\text{Sun}}$ 表示太阳对星间通信链路的影响:当星间链路两端的接收器朝向或接近太阳时,它的辐射会对传输信号产生较强的背景干扰,影响星间通信质量,甚至需要中断链路,特别是对于采用激光链路的星间通信来说,这种辐射会对光-电传感器造成物理性的损坏而造成链路中断,这种现象称为“日凌”。日凌是进行星间链路和星际路由设计时不可忽视的问题^[13],日凌对星间通信的影响程度可以用日凌的持续时间 t_{sun} 来衡量。 $P_{\text{SI}}^{\text{Earth}}$ 表示地球阻挡对卫星通信的影响。在卫星运动过程中,当地球遮挡住太阳光、卫星处于地球的阴影区内时,卫星失去了太阳光能只能靠星载蓄电池提供电能,这种现象称为星蚀。在星蚀发生期间卫星的满负荷工作必将造成通信的中断,是进行星间链路设计时不可忽视的因素。此外空间中存在的各种宇宙射线也会影响卫星的通信信道,星间链路越长这种影响就越大,相应地误码率就越高,用 $P_{\text{SI}}^{\text{BER}}$ 来表示这种链路误码率对通信质量的影响, $P_{\text{SI}}^{\text{BER}}$ 是星间距离 $r(S_j \rightarrow S_i, t)$ 的函数。空间环境干扰 P_{SI} 可以表示为

$$\begin{aligned} P_{\text{SI}} &= (P_{\text{SI}}^{\text{Sun}})^{e_1} (P_{\text{SI}}^{\text{Earth}})^{e_2} (P_{\text{SI}}^{\text{BER}})^{e_3} \\ &= (t_{\text{sun}} / t_{\text{sun}, \max})^{e_1} (P_{\text{SI}}^{\text{Earth}})^{e_2} (r / r_{\max})^{e_3} \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $e_1 \leq 0$, $e_2 \leq 0$, $e_3 \leq 0$ 分别为 $P_{\text{SI}}^{\text{Sun}}$, $P_{\text{SI}}^{\text{Earth}}$, $P_{\text{SI}}^{\text{BER}}$ 3部分对 P_{SI} 的贡献因子。

3.2 链路设计方案

卫星网间链路的设计可以分为静态链路设计和动态链路选择两个部分,如图2所示。静态链路设计是在卫星网的系统方案设计阶段根据系统业务需求以及网络结构的要求对卫星网间链路进行设计,相当于网络链路的初始化设计。动态链路选择是指在卫星网系统运行过程中当卫星保持的某条星间链路发生切换时需要选择建立新的链路以维持自身的通信能力。链路切换引起拓扑的变化会触发网络的重路由。

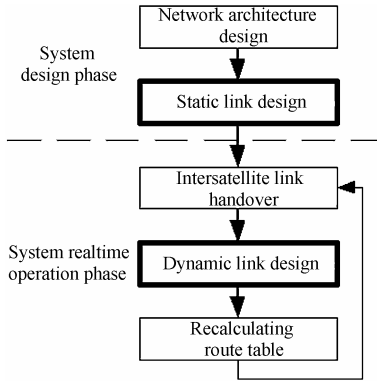


图2 系统的星间链路设计流程

Fig.2 Intersatellite links design flow

(1) 静态链路设计 静态链路设计的基本原则:对于任意一颗卫星 S_i , 所有可与它建立某种星间链路的卫星构成一个集合 A , 对于所有的 $S_j \in A$ 计算它与 S_i 间链路的链路稳定性函数, 构成集合 $P = \{P(S_j \rightarrow S_i, 0) | S_j \in A\}$, 选择集合 P 中稳定性函数最大值所对应的 S_k 作为建链对象建立 ISL, 即 S_k 满足:

$$P(S_k \rightarrow S_i, 0) = P_{\max} = \max(\{P(S_j \rightarrow S_i, 0) | S_j \in A\}) \quad (7)$$

在第2节中提出的LEO/MEO双层卫星网中存在有多种星间链路类型,包括LEO轨内星间链路(LISL),LEO轨间星间链路(LIOL),MEO轨内星间链路(MISL),MEO轨间星间链路(MIOL)和层间星间链路(IMLL)。假设在此系统中每颗LEO卫星只能建立两条LISL,两条LIOL以及一条IMLL与MEO层相连;每颗MEO卫星只能建立两条MISL,两条MIOL,但其IMLL数量不限。

对于任意一颗LEO卫星 $LEO_i (0 \leq i \leq L-1)$, 它的同轨道卫星集为

$$A_{\text{LISL}} = \left\{ \text{LEO}_j \left| \left\lfloor \frac{i \cdot k_l}{L} \right\rfloor \times \frac{L}{k_l} \leq j \leq \left\lfloor \frac{i \cdot k_l + L}{L} \right\rfloor \times \frac{L}{k_l} - 1 \right. \right\} \quad (8)$$

其中 $\lfloor \cdot \rfloor$ 为下取整运算。根据静态链路设计的基本原则从 A_{LISL} 中选择两颗卫星建立LISL。由于轨道内卫星间位置的相对固定所以两颗卫星或者始终可见(即链路生存时间 $T = \infty$) 或者始终不可见(即链路生存时间 $T = 0$)。若轨道高度 H_l 满足条件

$$\left[\cos^{-1} \left(\frac{2nk_l\pi}{L} \right) - 1 \right] \leq \frac{H_l}{R} \leq \left[\cos^{-1} \left(\frac{2(n+1)k_l\pi}{L} \right) - 1 \right] \quad (9)$$

其中 R 为地球半径,则LEO与其前后相邻的 $2n$ 颗卫星始终可

见,如果暂不考虑空间干扰部分的影响,根据链路设计原则为使链路稳定性最大应该选择这 $2n$ 颗卫星中传播时延最小的卫星建立链路,显然就是轨道内位置最邻近 LEO_i 的两颗卫星 LEO_j 和 LEO_k , 其中

$$j = \begin{cases} \left\lfloor \frac{i \cdot k_l + L}{L} \right\rfloor \times \frac{L}{k_l} - 1, & i = \left\lfloor \frac{i \cdot k_l}{L} \right\rfloor \times \frac{L}{k_l} \\ i - 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

$$k = \begin{cases} \left\lfloor \frac{i \cdot k_l}{L} \right\rfloor \times \frac{L}{k_l}, & i = \left\lfloor \frac{i \cdot k_l + L}{L} \right\rfloor \times \frac{L}{k_l} - 1 \\ i + 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

LEO_i 的邻轨卫星集为

$$A_{\text{LIOL}} = \left\{ \text{LEO}_j \left| 0 \leq j < \left\lfloor \frac{i \cdot k_l}{L} \right\rfloor \cdot \frac{L}{k_l} \text{ 或 } \left\lfloor \frac{i \cdot k_l + L}{L} \right\rfloor \cdot \frac{L}{k_l} < j + 1 \leq L \right. \right\} \quad (12)$$

由于系统采用圆极(或近似圆极)轨道,因此 LEO_i 与其左右轨道上的卫星的位置相对比较固定,始终保持可见。根据链路设计原则,链路稳定性最大的卫星恰为位置最邻近 LEO_i 的左右两颗卫星 LEO_l 和 LEO_m , 其中

$$l = i - L/k_l, \text{ 当 } \left\lfloor \frac{i \cdot k_l}{L} \right\rfloor \neq 0 \text{ (即 } LEO_i \text{ 不在第1条轨道上)} \quad (13)$$

$$m = i + L/k_l, \text{ 当 } \left\lfloor \frac{i \cdot k_l}{L} \right\rfloor \neq k_l - 1 \text{ (即 } LEO_i \text{ 不在第 } k_l \text{ 条轨道上)} \quad (14)$$

当 LEO_i 处于第1条或第 k_l 条轨道上时,由于缝的存在,需要建立穿越缝的轨间链路 $LIOL_{\text{Cross-Seam}}$, 这种链路会随时间发生持续的通断变化,因此该种星间链路的设计属于动态链路设计的范畴。

MEO层卫星的层内星间链路的静态设计与上面所述的LEO层的方法相同。LEO层和MEO层间的星间链路IMLL具有随时间通断的动态特性,因此它的设计也属于动态链路设计的范畴。

(2) 动态链路设计 动态链路设计的对象是在系统运行过程中会发生动态变化的星间链路,如前一节提到的 $LIOL_{\text{Cross-Seam}}$ 和IMLL。此外,如果系统运行过程中某颗卫星或某条星间链路发生故障时,也可以利用动态链路设计方法来建立新的星间链路以修复系统故障。

动态链路设计的基本原则:在时刻 t , 卫星 S_i 需要建立新的星间链路,则所有可与它建立该种星间链路的卫星构成一个集合 $A = \{S_j | V_{S_i \rightarrow S_j} = 1\}$, 对于所有的 $S_j \in A$ 计算与 S_i 间链路的链路代价函数,构成集合 $P = \{P(S_j \rightarrow S_i, t) | S_j \in A\}$, 选择集合 P 中链路稳定性函数最大值所对应的 S_k 作为建链对象建立ISL,即 S_k 满足:

$$P(S_k \rightarrow S_i, t) = P_{\max} = \max(\{P(S_j \rightarrow S_i, t) | S_j \in A\}) \quad (15)$$

4 仿真及结果分析

参照文献[14]中的方案,我们在OPNET中建立了LEO/MEO双层卫星网仿真模型。网络LEO层采用72颗LEO

卫星均匀分布在6条1375km高的卫星轨道上; MEO层由18颗MEO卫星组成,卫星分布在3条高度为12000km的轨道上,每条轨道6颗星。星间链路的传输速率为200Mbps,每个卫星路由节点的缓冲队列大小为5M字节。静、动态链路设计依照第3节中的方案实现。在卫星网络的运行过程中,每一次的星间链路通断都会导致网络拓扑结构的动态变化,触发网络的路由更新过程。在本仿真方案中网络动态路由采用传统的开放最短路径优先(OSPF)协议,路径代价取星间链路稳定性值的倒数。为了分析该链路设计方案下网络的通信性能,定义了点到点的数据业务传输,业务源以8Mbps的恒定速率向目的节点发送业务数据。在仿真中我们重点关注业务的端到端传输时延、网络的丢包率以及动态路由协议数据包的发送量等性能指标。

在仿真中我们先不考虑空间干扰对星间链路的影响,定义了3组 (w_d, w_t, w_s) 值。当 $(w_d, w_t, w_s) = (1, 0, 0)$ 时,链路设计只考虑传输时延的影响,建立的星间链路都具有最小的传输时延;当 $(w_d, w_t, w_s) = (0, 1, 0)$ 时,链路设计只考虑链路剩余生存时间的影响,建立的星间链路都具有最长的持续通讯时间,亦即是网络具有最少的链路切换次数;当 $(w_d, w_t, w_s) = (0.5, 0.5, 0)$ 时,链路设计同时考虑链路传输时延和剩余生存时间两个因素,取它们的折衷。

从仿真结果中可以看出,采用最小时延的链路设计策略时,网络在语音和视频会议业务的端到端传输时延上具有相对较优的性能(如图3),但是由于在路由中没有考虑链路的剩余生存时间使得系统运行过程中星间链路的切换过于频繁,导致网络过多的重路由过程,用于重路由的路由协议数据包消耗的系统资源较多,丢包率也明显增加(如图4)。采用最少切换策略可以抑制星间链路的频繁切换,使得网络的重路由过程明显减少,但是它在业务端到端传输时延方面性能最差。相比之下,折衷的链路设计策略在网络端到端传输时延、丢包率以及抑制星间链路切换等方面都具有较好的性能表现。

在不考虑空间干扰对星间通信影响的前提下, (w_d, w_t) 取值不同,网络表现出来的性能就不同。取值为 $(1, 0)$ 时的最小时延策略适用于承载一般的网络数据业务,如文件传输、网页浏览、电子邮件等;取值为 $(0.5, 0.5)$ 时的折衷策略适合于承载实时性要求比较高的多媒体业务,如网络电话、视频会议等。在实际应用中可以根据网络承载业务的不同适当的调整 (w_d, w_t) 值,以获得最佳的网络传输性能。

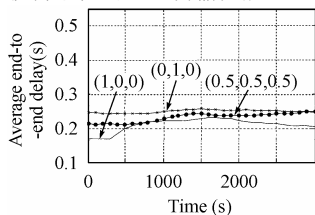


图3 业务的平均端到端时延
Fig.3 Average traffic end-to-end delay

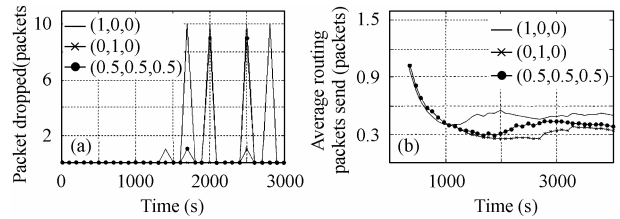


图4 协议性能
(a) 网络丢包 (b) 路由协议数据包的平均发送量
Fig.4 Protocol performance
(a) packets dropped (b) Average number of routing protocol packets

在仿真中加入空间干扰模型,主要考虑日凌的影响^[13]。在日凌发生时,如果日凌持续时间 t_{sun} 较小则暂时关闭星间通信链路待日凌结束后继续使用,如果 t_{sun} 较大则需要网络重新选择路由的传输路径。从图5的仿真结果可以看出,当链路设计只考虑链路传输时延和生存时间两个因素而没有考虑空间干扰对星间通信的影响时,即 $(w_d, w_t, w_s) = (0.5, 0.5, 0)$,在 t_1 时刻当通信路径上的某条星间链路发生日凌会导致该路径暂时不可用,丢包率急剧增大。只有当 t_2 时刻日凌结束或网络进行了重路由后,业务传输才会继续。这种传输的暂时中断会严重降低网络性能,并且它对语音、视频等实时业务的影响是致命的。如果在链路设计时将 (w_d, w_t, w_s) 取值为 $(1/3, 1/3, 1/3)$,即在链路传输时延和生存时间的基础上同时考虑空间干扰因素的影响,这样会使网络链路变化时尽可能选择在链路生存期内不受日凌等干扰影响或影响程度较小的链路建立星间通信。这种策略下系统的传输时延指标虽然略高,但在传输的连续性和网络丢包率等方面的性能明显要好得多。

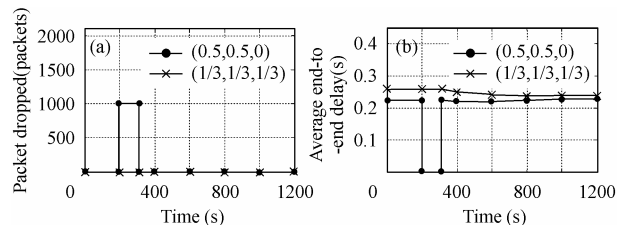


图5 加入空间干扰后的协议性能比较
(a) 网络丢包 (b) 平均端到端时延
Fig.5 Protocol performance comparison with space interferences
(a) Packets dropped (b) Average end-to-end delay

5 结束语

星间链路设计是卫星网组网与路由设计的基础。本文提出的卫星网星间链路稳定性模型及相应的星间链路设计方案可以很好地解决多层卫星网星间链路设计的难题。为了适应多种网络性能要求,可以根据网络承载业务的不同以及考虑空间干扰因素与否来调整稳定性模型中的 (w_d, w_t, w_s) 参数值。如果网络业务多以数据业务为主,应该适当增加 w_d 值,减小 w_t 值;如果网络业务中实时多媒体业务比例较高,则应该适当减小 w_d 值,增加 w_t 值;如果忽略空间干扰对通信的影响,则设 w_s 值为0,否则设为非零值。

参 考 文 献

- [1] Del Re E, Pierucci L. Next-generation mobile satellite networks. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(9): 150–159.
- [2] Farserotu J, Prasad R. A survey of future broadband multimedia satellite systems, issues and trends, *IEEE Communications Magazine*, 2000, 38(2): 128–133.
- [3] Chitre P, Yegenoglu F. Next-generation satellite networks: architectures and implementations. *IEEE Communications Magazine*, 1999, 37(3): 30–36.
- [4] Jamalipour A. Broad-band satellite networks – The global IT bridge. *Proc. IEEE*, 2001, 89(1): 88–104.
- [5] Chang H S, Kim B W, Lee C G, *et al.*. FSA-based link assignment and routing in low-earth orbit satellite networks. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 1998, 47(3): 1037–1048.
- [6] Noakes M D, Cain J B, Adams S L, *et al.*. An adaptive link assignment algorithm for dynamically changing topologies. *IEEE Trans. on Communications*, 1993, 41(5): 694–706.
- [7] Lee J, Kang S. Satellite Over Satellite (SOS) network: A novel architecture for satellite network, INFOCOM'2000, Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, California, USA, 2000, 1: 315–321.
- [8] Akyildiz I F, Ekici E, Bender M D. MLSR: A novel routing algorithm for multilayered satellite IP networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2002, 10(3): 411–424.
- [9] 胡剑浩, 李涛, 吴诗其. 具有星际链路的 LEO&MEO 双层卫星网络路由策略研究. *电子学报*, 2000, 28(4): 31–35.
- [10] 王亮, 张乃通, 刘晓峰. 低轨卫星通信网络星间链路几何参数动态特性. *哈尔滨工业大学学报*, 2003, 35(2): 184–187.
- [11] 王亮, 张乃通, 汪洋, 初海彬, 李辉. LEO/MEO 双层卫星网络中层间 ISL 空间参数研究. *中国空间科学技术*, 2004, 1: 26–30.
- [12] 刘刚, 吴诗其. 非静止轨道卫星通信系统中星际链路性能研究. *系统工程与电子技术*, 2001, 24(1): 105–109.
- [13] 胡剑浩, 吴诗其, 李乐民. 卫星移动通信系统中星际链路背景干扰分析模型. *通信学报*, 1999, 20(2): 58–63.
- [14] 苑喆, 张军, 柳重堪. 一种简化的移动卫星网仿真方案. *系统仿真学报*, 2005, 17(1): 207–209.
- 苑 喆: 男, 1977 年生, 博士生, 研究方向为卫星网组网及路由交换技术.
- 张 军: 男, 1965 年生, 博士生导师, 研究方向为天空地一体化信息传输与处理.
- 柳重堪: 男, 1941 年生, 博士生导师, 研究方向为信号与信息处理.