

中低轨卫星跨层激光链路二次同步切换方法

李勇军¹, 吴继礼², 赵尚弘¹, 邓博于¹, 缪新萍¹

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安 710077; 2. 空军西安飞行学院, 陕西西安 710306)

摘 要: 中低轨卫星之间跨层激光链路的无缝切换直接决定了双层卫星光网络的稳定性. 异步切换方法会导致网络拓扑频繁重构, 而集中同步切换将造成两层间连接中断, 网络运行状态失控. 为此, 本文提出了中低轨卫星星座激光链路的二次同步切换方法, 在保证中低轨道卫星连通的基础上, 可降低网络拓扑重构频率. 研究了整数周期比的中轨道和低轨道卫星空间位置特性, 建立了中低轨卫星星座构形二阶非球摄动模型, 确定了中低轨道之间轨道周期比为3的双层卫星星座构形. 按连接和切换顺序将该星座构形中跨层激光链路分为两组, 以相对周期的1/4为基准, 每次令其中一组同步切换, 通过交替完成切换. 研究表明, 二次同步切换方法使得网络拓扑重构频率降低到链路切换频率的1/7, 比集中切换方法在网络平均时延方面降低了30ms.

关键词: 卫星光网络; 跨层激光链路; 无缝切换; 同步切换

中图分类号: TN929.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2017)03-0762-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.03.037

A Two-Step Synchronous Handover Scheme of Optical Inter-Orbit Links in LEO and MEO Satellite Network

LI Yong-jun¹, WU Ji-li², ZHAO Shang-hong¹, DENG Bo-yu¹, MIAO Xin-ping¹

(1. School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China;

2. The Air Force Xi'an Flight Academy, Xi'an, Shaanxi 710306, China)

Abstract: In optical double-layer satellite network, the stability of network is determined by the OIOLs (Optical Inter-Orbit Links) seamless handover directly. Asynchronous handover method often results in frequent topology reconfiguration. However, synchronously centralized handover leads to cutoff of connection between two layers, and thus network operation condition gets out of control. A two-step synchronous handover scheme of MEO (Medium Earth Orbit) satellite and LEO (Low Earth Orbit) satellite constellation is proposed. Connection between LEO satellites and MEO satellites is guaranteed and topology reconstructing frequency is decreased. When orbit period of MEO satellite is integer multiple of LEO satellite, space position relation between LEO and MEO satellites is investigated. The second-order aspheric perturbation model of LEO satellite and MEO satellite constellation is built up. The orbit period ratio between MEO and LEO satellite is calculated as 3. The double-layer satellite network is designed. The laser links between the two layers in the elaborately configured LEO/MEO constellation pattern are divided into two groups based on connection and handover sequence. 1/4 relative periods of the MEO satellite is considered as the handover criterion. In each 1/4 relative period, one group of inter-layer laser links switches synchronously. Research results show topology reconstructing frequency is reduced to 1/7 of link handover frequency. The average network time delay is decreased by 30ms compared with synchronously centralized handover method.

Key words: optical satellite network; optical inter-layer links; seamless handover; synchronous handover

1 引言

在中低轨道 (LEO/MEO, Low Earth Orbit/ Medium Earth Orbit) 双层卫星光网络中, 跨层激光链路的高效

切换对提升网络综合性能具有重要意义^[1-3]. 如何针对跨层激光链路的长建链时间和超高速数据传输速率特征, 提出高效的切换方法是卫星光网络亟需突破的关键技术之一^[4,5]. LEO 卫星和 MEO 卫星间空间相对位

置关系呈现非周期性,且 LEO 卫星数量多,建立精确的切换数学解析模型难度较大.当前在跨层链路切换研究领域,切换时机和切换对象选取通常是基于最优准则遍历搜索,包括最短连接距离、最长连接时间及最大资源利用率等^[6-9].切换主要包括针对单颗卫星的异步切换方法^[10-12]和针对卫星网络的集中同步切换方法^[13]两类,它们很好的解决了微波卫星网络的切换问题.然而,在双层卫星光网络中采用异步切换策略时,跨层激光链路每次切换都会导致整个网络拓扑重构,频繁的切换严重降低网络性能.采用集中切换策略时,强制所有跨层激光链路在相同时间进行重建,每次切换,网络拓扑将会发生两次变化,ME0 卫星对 LEO 卫星的网络管理和控制中断,网络功能失效.

已有对跨层激光链路的切换研究集中于切换过程本身,并没有充分利用 LEO 卫星和 ME0 卫星网络拓扑固有的周期特性.本文在分析微波卫星通信网络中异步和同步集中式链路切换的基础上,从双层卫星光网络拓扑结构设计出发,利用精确设定的 LEO 卫星和 ME0 卫星周期比,实现双层卫星网络结构的对称性和相对位置变化的周期性.利用对称性网络结构,提出一种二次同步切换方法,该方法可减小网络拓扑的重构频率,保证切换期间整个网络的稳定运行.

2 中低轨跨层激光链路的空空间几何特性

在 LEO/ME0 双层卫星光网络中,两层卫星之间连接的稳定性是实现网络功能的关键,因此 ME0 卫星星座的配置要利于跨层链路的切换和稳定.中低轨卫星在彼此坐标系中的相对位置决定了跨层链路的空空间特性,是解决跨层链路切换的必要条件.利用两颗卫星相对空空间位置的分析方法^[14],可获得 LEO 卫星在 ME0 卫星固连坐标系中的运动方程:

$$\begin{bmatrix} X_{lm} \\ Y_{lm} \\ Z_{lm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega_m t + \varphi_m) \cos(\omega_l t + \varphi_l) - \sin\Omega \cos\Omega \sin(\omega_l t + \varphi_l) \\ + \sin(\omega_m t + \varphi_m) \sin\Omega \cos(\omega_l t + \varphi_l) + \cos\Omega \sin(\omega_l t + \varphi_l) - \frac{r_m}{r_l} \\ - \sin(\omega_m t + \varphi_m) [\cos\Omega \cos(\omega_l t + \varphi_l) - \sin\Omega \cos\Omega \sin(\omega_l t + \varphi_l)] \\ + \cos(\omega_m t + \varphi_m) [\sin\Omega \cos(\omega_l t + \varphi_l) + \cos\Omega \cos\Omega \sin(\omega_l t + \varphi_l)] \\ \sin\Omega \sin(\omega_l t + \varphi_l) \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, Ω 、 ω_l 、 φ_l 分别为低轨道卫星升交点赤经、卫星运行角速率和沿迹角初始相位.由式(1)可知,中低轨卫星之间的相对关系并不是严格的周期变化.随着运行

时间增加,LEO 卫星会遍历 ME0 卫星 X 轴负方向上四个卦限,这就要求 ME0 卫星激光通信终端的伺服达到全平面范围.在这种网络结构下,星际链路的连接将会遍历所有 LEO 卫星节点,切换时机计算复杂,物理实现困难.

因此,如何保证中低轨卫星之间精确的周期性拓扑关系,是实现网络周期切换的前提,以此可满足星际激光链路切换的快速和高效要求.中低轨卫星之间运行周期具有整数比关系,则两层卫星之间相对位置关系呈现严格周期变化,卫星之间连接关系以一定时间为周期精确再现. ME0 卫星只需要同少数 LEO 卫星定期建立连接关系,节省星载激光通信终端数量,降低系统复杂度.这样带来的好处是:一方面可以只用少数 LEO 卫星同 ME0 卫星相连,节省激光通信终端数量;另一方面可使链路层、网络层和传输层具有明显的周期性,为链路切换、网络测量、流量预测提供良好的物理基础,便于网络运行和管理.

综合考虑 LEO 卫星和 ME0 卫星可选轨道高度,计算可得中低轨卫星周期比为 3 是优化的方案.图 1 给出了中轨卫星周期为低轨卫星周期 3 倍时,中低轨卫星在彼此坐标系中的相互位置关系.如果以 T_m 表示中轨道卫星的运行周期, T_l 表示低轨道卫星的运行周期,由图 1 和式(1)知,中低轨卫星之间相对位置关系严格以 T_m 为周期重复.其中 $T_m = 3T_l$ 为中低轨卫星相对周期,是 ME0 卫星两次越过 LEO 卫星升交点的时间间隔.

由式(1)和图 1 可知,如果中低轨卫星之间周期比为 3,即 $\omega_l = 3\omega_m$,两星之间相对位置坐标中, X 和 Y 坐标分量重复周期都是 $T_m/2$,只有 Z 坐标分量重复周期分别是 $T_m/3$ 和 T_m .在任意 t 和 $t + T_m/2$ 时刻, Z 坐标分量只相差一个负号.以任意一颗卫星为参考,另一卫星在这两个时刻相对位置关于参考卫星的轨道平面 $Z = 0$ 对称,也就是两个时刻的 LEO 卫星分别在赤道平面等距的两侧.对于双层卫星网络拓扑而言,这两个位置是等效的,即网络拓扑的变化周期为 $T_m/2$.在 $T_m/2$ 的连接周期内,LEO 卫星两次同 ME0 卫星建立连接时,ME0 卫星先后位于关于 LEO 卫星轨道平面对称的位置,连接之后俯仰角和距离变化完全相同,方位角变化大小相同,方向相反.

因此,中低轨道卫星之间采用周期比为 3 的轨道配置,可令双层卫星网络连接和切换具有良好的周期性,便于星际激光链路建立、维持和切换,简化中低轨道卫星之间激光链路切换的复杂度,降低了对星际激光链路对准的难度,有效提高网络可靠性.

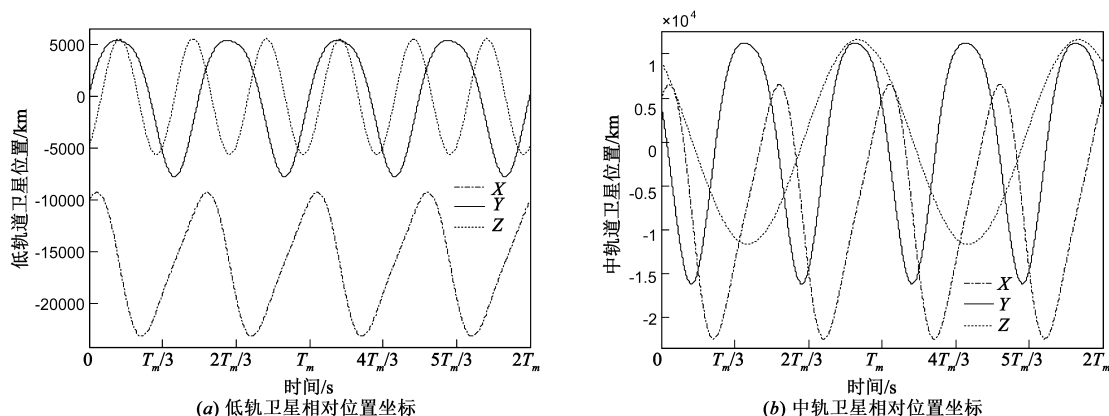


图1 整周期比的中低轨卫星相对位置关系

3 中低轨道卫星周期精确匹配

如何保持中低轨道卫星周期的精确匹配是实现网络高效切换的前提之一. 然而, 由于地球扁率存在, 受日月等天体影响, 卫星运行的轨道并不是理想二体模型下的开普勒轨道, 而是存在摄动的影响. 受此影响, 存在长期变化量的参数为右升节点赤经、近地点幅角和真近地点角. 如果忽视这种变化, 双层卫星之间构形将无法精确匹配, 网络长期稳定性无法保证. 论文用二阶非球摄动模型来表述中低轨卫星星座构形, 上述三个存在长期累积量的线性增量为^[15,16]:

$$\begin{cases} \frac{d\Omega}{dt} = -\omega\xi\cos i \\ \frac{d\varpi}{dt} = \omega\xi\left(2 - \frac{5}{2}\sin^2 i\right) \\ \frac{dM}{dt} = \omega\left[1 + \xi\left(1 - \frac{3}{2}\sin^2 i\right)\sqrt{1-e^2}\right] \end{cases} \quad (2)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{\mu}{a^3}}, \xi = \frac{3r_e^2 J_2}{2a^2(1-e^2)^2}$$

式中 μ 是地球引力常数, r_e 是地球半径, a 是轨道半径, i 是轨道倾角, ω 是卫星的角速度, J_2 是二阶非球摄动常数. 由于选用了圆轨道星座, 轨道偏心率为 0, 只需用沿迹角 $\lambda = \omega + M$ 代替近地点幅角和平近地点角. 对倾角为 0 的圆轨道 MEO 卫星, 升交点赤经也一并纳入真黄经 $E_c = \lambda + \Omega$. 要实现中低轨道卫星之间相对位置关系的精确重复, 则在一个中低轨相对周期内, 低轨道卫星需运行整周期, 且赤经变化量加上 2π 应等于 MEO 卫星真黄经增量. 在确定低轨道卫星高度和倾角后, 用式(2)获得低轨道卫星的沿迹角变化率:

表1 MEO 卫星精确配置高度

中低轨周期比(K_T)	2	3	4	5	6	7
初始高度 H_{m0} (km)	5968.89	9801.04	13221.54	16365.28	19304.71	22084.45
精确高度 H_m (km)	5980.14	9820.08	13252.45	16411.35	19368.85	22169.31

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{dM}{dt} + \frac{d\varpi}{dt} \quad (3)$$

由此可得 LEO 卫星经过赤道平面的精确周期 T_l , LEO 卫星在一周期内升交点漂移量也可确定.

MEO 卫星运行实际角速率可由真黄经变化率计算:

$$v_e = \frac{dE_c}{dt} = \frac{d\lambda}{dt} + \frac{d\Omega}{dt} \quad (4)$$

若将中低轨卫星间相对运行周期比例定位为 K_T , 则中低轨卫星相对位置在 J_2 近似条件下重复的条件是: K_T 倍低轨卫星实际运行周期 T_l 内, MEO 卫星真黄经变化量等于 2π 加上低轨道卫星升交点赤经角位移摄动量.

$$2\pi + \frac{d\Omega_l}{dt} K_T T_l = v_{em} K_T T_l \quad (5)$$

Ω_l 为低轨道卫星升交点赤经, v_{em} 是将 MEO 卫星轨道高度代入式(4)得到的真黄经角速率. 最终方程转化为:

$$a_m^2 = A_f (a_m^2)^{\frac{7}{4}} - 3J_2 r_e^2 \quad (6)$$

其中

$$A_f = \frac{1}{\sqrt{\mu}} \left(\frac{2\pi}{K_T T_l} - \xi_l \omega_l \cos i \right) \quad (7)$$

A_f 为已知系数, 由低轨道参数和中低轨卫星运行周期共同确定, 其中 ξ_l 是依据式(2)得到与 LEO 卫星摄动相关的系数, ω_l 为 LEO 卫星的无摄动角速度, i 为 LEO 卫星轨道倾角. 以 $K_T T_l$ 为 MEO 卫星无摄运行周期, 得到相应轨道半径 a_0 , 并作为初始值代入式(6)迭代, 可求得 MEO 卫星高度. 将 LEO 卫星高度设定为 1400km, 轨道倾角 46° , 不同中低轨卫星运行周期比例得到 MEO 卫星运行高度如表 1 所示.

因此,最终选取 MEO 卫星轨道高度为 9820.08km,在二阶摄动模型下,实际运行周期为 20506s, MEO 卫星相对运行周期为 20460s. 由此可见 MEO 卫星间的相对周期小于 MEO 卫星实际运行周期. 但是由于 MEO 卫星运行在赤道平面, T_m 相对于其实际运行周期能更加直观反映网络拓扑变化, 后文以 T_m 近似 MEO 周期, 把相对周期 $T_m = 3T_l$ 的中低轨卫星间关系仍然称为 3 倍周期关系.

4 切换周期选取

将跨层激光链路按照连接和切换顺序分为两组, 交替完成切换, 能在降低切换风险的同时显著降低网络拓扑重构频率. 由于 $T_m/4$ 的切换周期内, 每组链路各进行一次切换, 从而称该切换方法为二次同步切换.

记 MEO 卫星为 M , 第一颗中轨道卫星为 M_1 , 两层卫星之间要建立通信取决于链路相对于地表的余隙. 按照此前设计, M_1 与 LEO 卫星周期比为 3, 以 100km 为余隙下限, M_1 同 LEO 卫星之间连接时间略大于断开时间. 而中低轨周期比为整数倍, 余隙将严格以 $T_m/2$ 为周期变化, 跨层链路也将以相同周期重复. 因此只要增加一颗初始相位与 M_1 相差 180° 的中轨道卫星 M_3 , 后文称之为镜像关系, 可使当前低轨卫星在全时段内与 MEO 卫星取得联系. 图 2 给出了 MEO 卫星 M_1 、 M_3 同 LEO 卫星之间链路余隙变化曲线, 图中实线对应 M_1 与 LEO 链路, 圆点对应 M_3 与 LEO 链路, 虚线仍为 100km 的参考余隙. 两条曲线位于虚线以上部分即为 LEO 卫星同 MEO 卫星之间具备可视连接的部分. 从图中可以看到 LEO 卫星同两颗 MEO 卫星之间的连接时间包含重叠部分, 这是 LEO 卫星具备同 MEO 卫星进行无缝切换的空间位置条件.

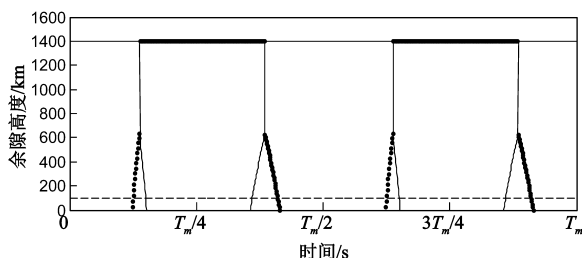


图2 低轨卫星与两颗中轨卫星链路余隙

由于 M_1 与 M_3 间没有直接的可视连接, 同时两颗 MEO 卫星同地面网关连接不具备持续连接和通道分集条件, 对地接入能力有限, 因此需要增加 MEO 卫星数量. 在赤道中轨等间隔配置 4 颗卫星可以同时满足实际应用要求, 且两层卫星相对位置仍然保有高度的对称性和周期性.

因此, 将四颗 MEO 卫星依次编号为 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 . 其中 M_1 与 M_3 、 M_2 与 M_4 的相位差均为 180° , 把

这种关系定义为镜像关系. 当一颗 MEO 卫星 M_1 (或 M_2) 同某颗 LEO 卫星存在连接时, 在地球另一侧, 其镜像 M_3 (或 M_4) 必定可以和该 LEO 卫星的镜像具有完全相同的连接, 将这两条链路之间关系也称为镜像关系. 切换周期选择为余隙变化周期 $T_m/4$, 每次切换时, 互为镜像的跨层链路所连接的卫星恰好对调. 由于两层卫星之间链路最长持续时间 6264s, 合 $T_m/3.27$, 故 $T_m/4$ 的切换周期是中低轨链路能够达到的最长整周期切换, 可以将两层卫星的构形的周期性和对称性优势发挥到极限, 实现跨层连接终端资源利用率最大化.

5 二次同步切换的实现

在 LEO 卫星网络中, 将位于第 i 个轨道面内的第 j 个卫星记为 L_{ij} . 每条轨道有 2 颗互为镜像关系的 LEO 卫星配置了同 MEO 卫星通信的终端, 将此类 LEO 卫星称为内部网关. 内部网关是 MEO 卫星在 LEO 卫星网络的管理入口, 因此内部网关在 LEO 卫星层处于非常关键地位. 为发挥最大作用, 内部网关需均匀分布在 LEO 卫星星座中.

MEO 卫星之间相对位置关系可以通过调整 MEO 卫星初始相位 φ_m 改变, 所以 LEO 卫星层内部网关从 L_{11} 开始选择具有代表性. 而 MEO 卫星 M_1 同 M_3 、 M_2 同 M_4 的连接具有对等关系, 因此只须考察 M_1 和 M_2 同内部网关之间的切换即可. 因为每次切换都是具有镜像关系的中低轨卫星之间跨层链路的对调, 相比每次一条链路的切换, 切换频率降低一半. 如果再能找出多条链路具有超过 $T_m/4$ 的共同生存时间, 则可令其同步切换, 进一步降低切换和拓扑重构频率.

为了找到 M_1 、 M_2 同内部网关之间具有共同生存时间的链路, 记录在 T_m 时段内两颗 MEO 卫星可能建立的所有跨层链路, 将每条链路第一个具有完整生存周期的连接记录为 $\text{Link}(k)$. $\text{Link}(k)$ 的时间分量包含起始时刻和中止时刻两个参量: $\text{Link}(k) \rightarrow \{t_{\text{start}}(k), t_{\text{stop}}(k)\}$.

以链路连接中间时刻 $t_{\text{middle}} = (t_{\text{start}} + t_{\text{stop}})/2$ 对链路进行升序排列并重新编号, 列于表 2. 表中首列为链路的新索引号, 第二、三列分别是中低轨卫星编号, 后面各列时间单位一律为秒. 第 k 条链路同 J_c 条链路共同生存时间可以表示为: $\text{Life}(J_c, k) = \min\{t_{\text{stop}}(k), t_{\text{stop}}(k-1), \dots, t_{\text{stop}}(k-J_c+1)\} - \max\{t_{\text{start}}(k), t_{\text{start}}(k-1), \dots, t_{\text{start}}(k-J_c+1)\}$.

当 $\text{Life}(J_c, k) > T_m/4$, 意味着当 $\text{Link}(k)$ 同此前的 J_c 条链路可以同步切换, 表格带下划线的共同生存时间都满足这一条件.

表 2 跨层链路共同生存时间

链路	MEO	LEO	起始(s)	终止(s)	中值(s)	共同生存时间(s)		
						2 星	3 星	4 星
1	2	11	145	5604	2874	2 星	3 星	4 星
2	1	52	266	6062	3164	<u>5338</u>	×	×
3	2	44	1031	6298	3664	5031	4573	×
4	1	33	1603	6892	4248	4695	4459	4001
5	2	71	1527	7529	4528	<u>5289</u>	4695	4459
6	2	25	1823	7665	4744	<u>5706</u>	5069	4475
7	1	66	2324	7742	5033	<u>5341</u>	<u>5205</u>	4569
8	1	14	2276	8484	5380	<u>5418</u>	<u>5341</u>	<u>5205</u>
9	2	52	2995	8205	5600	<u>5211</u>	4747	4670
10	1	41	3333	8931	6132	4872	4872	4409
11	1	33	3625	9743	6684	<u>5306</u>	4580	4580
12	2	74	4336	9555	6945	<u>5219</u>	4595	3869
13	1	22	4285	10549	7417	<u>5219</u>	5219	4595
14	2	66	4828	10209	7519	<u>5381</u>	4727	4727
15	1	55	5034	11001	8017	<u>5175</u>	<u>5175</u>	4521
16	2	14	5082	11242	8162	<u>5918</u>	<u>5127</u>	<u>5127</u>
17	2	41	5578	11819	8698	<u>5664</u>	<u>5422</u>	4631
18	2	74	6515	12262	9389	<u>5303</u>	4727	4485
19	1	36	6343	12574	9458	<u>5747</u>	<u>5303</u>	4727
20	1	63	6902	13080	9991	<u>5672</u>	<u>5360</u>	4917
21	2	22	7161	13089	10125	<u>5918</u>	<u>5412</u>	5101
22	1	11	7947	13294	10620	<u>5142</u>	<u>5133</u>	4626
23	2	55	7610	13872	10741	<u>5347</u>	<u>5142</u>	<u>5133</u>
24	1	44	8420	14512	11466	<u>5452</u>	4874	4669
25	2	36	9228	14778	12003	<u>5284</u>	4644	4065
26	1	71	8891	15150	12021	<u>5550</u>	<u>5284</u>	4644
27	1	25	9942	15148	12545	<u>5205</u>	4836	4570
28	2	63	9678	15872	12775	<u>5205</u>	<u>5205</u>	4836

只要为每条轨道的一颗 LEO 卫星找准连接关系,同轨道的另一颗卫星很容易通过对称关系得到. 因共同生存时间大于 $T_m/4$ 的链路最多为 4 条,7 轨道可以分解为 4+3 组合,分两次完成切换,每次分别有 4 条链路和 3 条链路同步切换. 由表 2 可以找到 4 条链路同步切换的链路组合:

第一组,Link(5)~Link(8),对应轨道编号 1,2,6,7;

第二组,Link(13)~Link(16),对应轨道编号 1,2,5,6;

第三组,Link(20)~Link(23),对应轨道编号 1,2,5,6;

出于对低轨卫星网络数据分流的需要,跨层链路连接的 LEO 卫星之间具有较大逻辑距离者占优,故第一组不及第二、三组. 后两组连接的轨道一致,暂且不做选择,转而寻找第 3,4,7 轨道中满足 3 链路同步切换条件组合:

第四组,Link(17)~Link(19);

第五组,Link(24)~Link(26);

这两种组合也是等效的. 但对照表 2 可发现,如果 4 链路同步切换组合选择第三组,则 3 链路同步切换的时间都将与前者相距较近,容易受其影响. 因此最优的方案为“第二组”+“第五组”,即表 2 中编号带下划线的两组链路.

综上所述具体切换过程为:在运行过程中,第二组链路首次切换发生时刻以该组链路结束最早的 Link(13)为准,强制切换该组 4 条链路,一并切换的还有另外 4 条镜像链路(对应中低轨卫星初始相位同第二组分别相差 180°),切换的方法为 M_1 同 M_3 连接的 4 颗低轨卫星互换, M_2 同 M_4 连接的 4 颗低轨卫星也互换.此后每 $T_m/4$ 进行类似切换.这样在该组链路切换时,另外 6 条链路不受影响,且每颗 MEO 卫星仍然可以保持同低轨卫星连接.第五组及其对称链路的切换过程类推.在一个 MEO 周期中,14 条链路各进行了 4 次切换.每组链路 4 次,共需 8 次切换即可,整个网络切换频率可降低到原来的 $1/7$.

6 仿真分析

为了研究二次同步切换的综合性能,将其和跨层激光链路的集中切换方法进行对比,如图 3(a) 示,图 3(a) 是实时时延,图 3(b) 是时延平均值.图中实线为二次同步切换时低轨层接收数据包的最大时延,对应于二次同步切换时切换过程中的最大时延,称之为 MEO delay,虚线为集中切换时低轨层接收到数据包的最大时延,对应于集中切换时切换过程中最大时延,称之为 max LEO delay.由图 3 可知,相较于集中切换方法,经过跨层激光链路的二次同步切换,网络的时延抖动性能改善明显,最大时延和平均时延分别可降低 60ms 和 30ms.

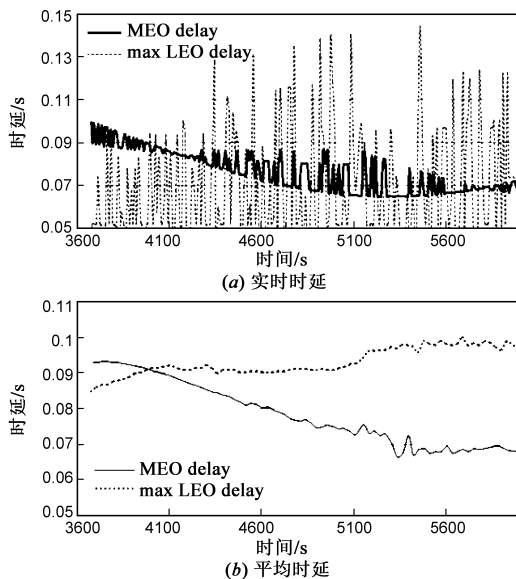


图3 网络时延图

7 结论

针对双层卫星光网络中跨层激光链路切换难度大、重建时间长的特点,设计了中低轨道周期比为 3 的双层卫星星座结构.利用周期性变化的星座构形,提出

了中低轨卫星之间跨层激光链路的二次同步切换方法.每次切换,令一部分链路强制切换,另一部分链路保持连接,弥补了跨层激光链路切换频繁和重建时间长的不足.研究表明,网络拓扑重构频率降低到链路切换频率的 $1/7$,相较于集中切换方法,网络最大和平均时延分别降低了 60ms 和 30ms.该方法实现了跨层激光链路的无缝切换,降低了网络切换频率和全网端到端时延,提升了网络的综合性能.

参考文献

- [1] Qinglong Yang, Liying Tan, Jing Ma, Shiqi Jiang. An analytic method of dimensioning required wavelengths for optical WDM satellite networks [J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15(2): 247 - 249.
- [2] Vincent W S Chan. Optical satellite networks [J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(11): 2811 - 2827.
- [3] Zhe Yuan, Jun Zhang, Zhongkan Liu. A simplified routing and simulating scheme for the LEO/MEO two-layered satellite network [A]. 2005 Workshop on High Performance Switching and Routing [C]. Hong Kong, China: IEICE Communications Society, 2005. 525 - 529.
- [4] Tengyun Dong, Gangxiang Shen. Traffic grooming for IP over WDM optical satellite networks [A]. 2014 13th International Conference on Optical Communications and Networks [C]. Suzhou, China: IEEE, 2014. 1 - 6.
- [5] 吴继礼. 双层卫星光网络链路稳定及切换技术研究 [D]. 西安: 空军工程大学, 2010.
- [6] Giovanni Giambene, Doanh Kim Luong, Van Anh Le, et al. Gateway handover implications on transport layer performance in terabit satellite networks [A]. 2014 7th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 13th Signal Processing for Space Communications Workshop [C]. Livorno, Italy: IEEE Communications Society, 2014. 9 - 16.
- [7] E Papapetrou, F N Pavlidou. QoS handover management in LEO/MEO satellite systems [J]. Wireless Pers Commun, 2003, 24(2): 189 - 204.
- [8] Aysegul Tuysuz, Fatih Alagoz. Satellite mobility pattern scheme for central and seamless handover management in LEO satellite networks [J]. Journal of Communications and Networks, 2006, 8(4): 451 - 460.
- [9] Ki-dong Lee. Variable-target admission control for nonstationary handover traffic in LEO satellite networks [J]. Journal of Communications and Networks, 2005, 54(1): 127 - 135.
- [10] Werner M, Delucchi C, Vogel H J, et al. ATM-based routing in LEO/MEO satellite networks with inter-satellite links [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communica-

- tions, 1997, 15 (1): 69 - 82.
- [11] 张涛, 张军. 一种新的星间链路切换保护算法[J]. 航空学报, 2007, 28(4): 922 - 929.
Zhang Tao, Zhang Jun. Novel ISLs handover protection algorithm[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2007, 28(4): 922 - 929. (in Chinese)
- [12] 杨斌, 何锋, 靳瑾, 徐广函. LEO 卫星通信系统覆盖时间和切换次数分析[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(4): 804 - 809.
Yang Bin, He Feng, Jin Jin, Xu Guang-han. Analysis of coverage time and handoff number on LEO satellite communication systems[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(4): 804 - 809. (in Chinese)
- [13] 吴廷勇, 吴诗其. LEO/MEO 双层卫星网络层间星际链路建立策略的性能研究[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(1): 67 - 71.
Wu Ting-yong, Wu Shi-qi. Performance analysis of the inter-layer inter-satellite link establishment strategies in two-tier LEO/MEO satellite networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(1): 67 - 71. (in Chinese)
- [14] Wang Zhen-yong, Li Ji-lin, Guo Qin, Gu Xue-mai. Analysis on connectivity of inter-orbit-links in a MEO/LEO double-layer satellite network [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2006, 19(4): 340 - 345.

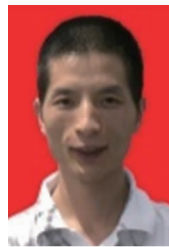
- [15] 范丽. 卫星星座一体化优化设计研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
- [16] 项军华, 范丽, 张育林. 卫星星座结构自稳定设计研究[J]. 飞行力学, 2007, 25(4): 81 - 85.
Xiang Jun-hua, Fan Li, Zhang Yu-lin. Study on design of the structure self-stabilization for satellite constellation [J]. Flight Dynamics, 2007, 25(4): 81 - 85. (in Chinese)

作者简介



李勇军 男, 1979 年 12 月出生于陕西省清涧县. 现为空军工程大学信息与导航学院副教授、硕士生导师. 获军队科技进步二等奖 2 项. 在国内外发表学术论文 30 余篇.

E-mail: tz_228@163.com



吴继礼 男, 1981 年 3 月出生于四川雅安. 现为空军西安飞行学院讲师, 从事卫星光通信组网与光电对抗研究工作.

E-mail: aa36524@126.com