

# 基于 GEO/MEO 星座的卫星网络抗毁结构研究

易先清, 汤绍勋, 罗雪山

YI Xian-qing, TANG Shao-xun, LUO Xue-shan

国防科技大学 五院 C<sup>4</sup>ISR 国防科技重点实验室, 长沙 410073

C<sup>4</sup>ISR Key Laboratory of Defense Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

E-mail: eexqvi@yahoo.com.cn

**YI Xian-qing, TANG Shao-xun, LUO Xue-shan. Research on destruction-resistant architecture's of satellite network based on GEO/MEO constellation. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(27): 122-126.**

**Abstract:** A destruction-resistant architecture of satellite network based on double-layered constellation is designed and analyzed with method of redundant and modified links in this paper. The MEO layer satellites in constellations are grouped and managed based on logic position fixed in each snapshot period by combining MEO's logic position with location. In particular, the capability of destruction-resistant in satellite constellations is improved by the mechanism of selecting backup header of group and replacing failure group manager GEO with group header MEO. With data links among groups and satellite layers and satellite constellations is designed, especially, the capability of destruction-resistant and communication and traffics in satellite constellations is improved by data links designing with redundancy among MEO layer and among a pair of satellites adjacency to failure satellite each other within sight of line scope, to satisfy requirement on transferring many kinds of servers data packages.

**Key words:** satellite network; global coverage; group destruction-resistant

**摘要:** 设计并分析了一种基于链路冗余与修补方法的双层抗毁卫星网络。通过对网络中 MEO 星层进行基于快照周期的分群管理和群首备份选择机制, 从星座组网结构方面提高卫星网络的抗毁性能; 通过设计网络结构中群内、星层以及整个星座的通信链路, 特别是对星座中 MEO 星层的通信链路进行充分的冗余设计, 以及启用视距范围内间隔失效卫星间次相邻卫星节点链路连接的链路设计, 从星座网络的通信链路上提高整个卫星网络的抗毁性能。最后对所设计的卫星网络的结构性能进行了简要分析。

**关键词:** 卫星网络; 全球覆盖; 分群; 抗毁

**DOI:** 10.3778/j.issn.1002-8331.2008.27.039 **文章编号:** 1002-8331(2008)27-0122-05 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP391.9

## 1 引言

对于由多个星层组成的复合卫星网络, 由于其结构相对复杂, 各星层之间的相对移动为星座的设计/建设与运行/管理带来了极大的难题。考虑到构成卫星通信网络的卫星节点置于太空之中, 一旦失效, 几乎无法修复, 特别是在未来的空间攻防中, 卫星节点被动失效的概率大大增加, 因此研究卫星网络中卫星节点失效对整个卫星网络的影响是专业领域一个十分关注的问题。

在由多层星座组成的复合卫星网络中, 高层 GEO/HEO 星座中的 GEO/HEO 卫星距离地球表面较远, 单颗卫星便具有较大的通信覆盖地域, 但信号传输时延也长, 损耗也大。而中/低层 MEO/LEO 星座中的 MEO/LEO 卫星则距离地球表面相对较近, 单颗卫星只能覆盖相对较小的通信地域, 由 MEO 和/或 LEO 组成的卫星网络具有相对较短的传输延时和要求相对较低的传输功率。由于 GEO 相对地面某点静止, 而 MEO 和 LEO 则与地面某点作相对运动, 因此使用一定数量的卫星和适当的

组网方式可实现真正意义上的包括极地区域的全球性持续覆盖, 且从地面上看, 由 LEO 和 MEO 卫星组成的卫星网络具有动态的拓扑结构。

为了便于分析这种动态的卫星网络拓扑结构, 一般将卫星网络按时间间隔离散化为一系列的快照, 利用逻辑位置的概念来分析这种网络中的动态拓扑结构、链路特性和路由问题<sup>[1-3]</sup>。

在由多层星座组成的复合卫星网络系统中, 整个星座系统利用层间星际链路建立了立体交叉的通信路径, 因此, 相对单层卫星网络, 多层卫星网络具有空间频谱利用率高、组网灵活、抗毁性强、功能多样化(融合天基通信、导航、定位等多种功能)等优点, 能够实现各种轨道高度卫星星座的优势互补, 多层复合卫星网络将成为未来天基网发展的一种理想组网模式<sup>[4-7]</sup>, 如美军新一代防御网采用多层卫星组网方式<sup>[8-9]</sup>。

## 2 星座组网结构设计

基于以上考虑, 提出了如图 1 所示的基于 GEO/MEO 双层

**基金项目:** 国家部委预研基金资助项目(the Pre-Research Foundation of China Ministries and Commissions)。

**作者简介:** 易先清(1966-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主研方向: C<sup>4</sup>ISR 系统分析与设计、空间信息系统等; 罗雪山(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 主研方向: C<sup>4</sup>ISR 系统、计算机建模与仿真。

**收稿日期:** 2007-12-03 **修回日期:** 2008-02-05

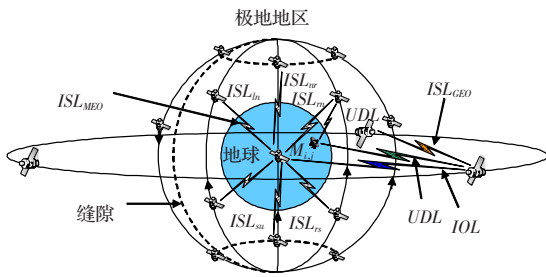


图1 基于 GEO/MEO 双层星座和用户地面终端的卫星网络体系结构

星座共同组成的多层星座组网系统组网结构。

## 2.1 组网星座

GEO 星座由均匀分布在赤道上空地球同步轨道面上的  $N_G$  ( $N_G \geq 3$ ) 颗 GEO 卫星  $G_i$  ( $i=1, 2, \dots, N_G$ ,  $N_G$  为 GEO 星座中 GEO 卫星数据) 组成, 提供全球低纬度区域 ( $+70^\circ \sim -70^\circ$ ) 的通信覆盖; MEO 星座由按极轨星座组织的  $N_M \times M_M$  颗 MEO 卫星  $M_{i,j}$  ( $i=1, \dots, N_M, j=1, \dots, M_M, N_M$  是 MEO 星座轨道面数,  $M_M$  为均匀分布在一个轨道面上的卫星数) 组成, 提供包括极地区域的全球性通信覆盖; 地面关口站由  $TG_W$  座具有强大信息处理与收发能力分布在地球表面某位置的地面用户关口站  $TG_i$  ( $i=1, 2, \dots, TG_W, TG_W$  为与多层星座组网系统具有连接关系的地面关口站数) (或其它兼容接收终端) 组成。GEO 星座、MEO 星座与地面关口站在距离地面表面不同高度上通过互连链路分层组成一个立体的通信网络。

## 2.2 组网结构

在这种多层星座组网系统中, 可以根据其结构特点进行组网。在系统扫描监视运行期间, 根据其组织结构特点, GEO 星座进行大面积扫描监视, MEO 星座进行指定区域扫描监视, 两层星座网络相对独立运行, 其间通过建立在 GEO 星座中的群管理者与 MEO 星座中群首之间星际链路  $IOL_{GEO \rightarrow MEO}$  联系。当有数据 (或自行产生或来自地面网络) 需要全网传输, 根据传输的源节点与目的节点在全网内参照路由表选择可行路径, 当需要在不同星座间传输时, 便通过其间群管理者与群首之间星际链路  $IOL_{GEO \rightarrow MEO}$  传送。

## 2.3 组网模式

在多层星座组网系统中, 可以根据其应用模式灵活组网。当 GEO 星座或 MEO 星座在扫描监视期间发现威胁目标, 发现节点立即将该信息通告全网, 系统随即进入凝视跟踪与指引运行模式, 此时整个多层星座组网系统各层星座及地面关口站便根据威胁目标飞行预测航迹调度组网, 将威胁目标飞行预测航迹附近的节点资源临时组织成一种可能包括系统各类资源的通信网络, 这些资源可以是 GEO 卫星, 也可以是 MEO 卫星, 甚至是地面关口站, 以及相互之间的通信链路。但这种组网是面向应用任务的, 并不改变系统中卫星的轨道参数, 当这种应用任务一旦完成, 这种基于各类资源的组网随即撤销, 除了基于 GEO/MEO 双层星座联合组网的多层星座组网系统组网结构支持这种应用组网外, 还需其组网路由的支持。

## 3 抗毁的分群管理模式

在基于 GEO/MEO 双层星座联合组网的多层星座组网系统中, 基于 GEO/MEO 双层星座之间的通信覆盖关系, 分群管理模式包括两方面的含义: 一是根据系统中各层星座与地面关

口站的分布特点和 GEO 卫星的通信覆盖性能对系统中的通信节点进行分群组网管理, 其中利用波束直接覆盖进行物理分群管理、通过波束间接覆盖进行一定区域内通信节点分组的逻辑分群管理; 二是根据系统中各层星座绕地飞行特点利用快照周期的概念以静态网络分析思路分析动态网络, 其中在分析的过程中还借用逻辑位置的概念对卫星节点物理位置的连续变化离散化。

## 3.1 覆盖关系

基于 GEO/MEO 双层星座联合组网的多层星座组网系统中, GEO 星座物理上只能通信覆盖部分地面关口站, MEO 星座物理上则可以通信覆盖全部地面关口站网。通过 MEO 星座, GEO 星座可以逻辑上通信覆盖每一地面关口站。在某快照周期  $T_s$  内, 若考虑 GEO 覆盖波束覆盖地球南北纬  $70^\circ$  之间的区域时, GEO 星座物理上也只能通信覆盖部分 MEO 星座, GEO 星座逻辑上通信覆盖全部 MEO 星座。而在整个系统周期  $T$  内, GEO 星座物理上将实现对 MEO 星座实现全部通信覆盖, MEO 星座将对每一地面关口站实现通信覆盖。具体为: 在任何时候, GEO 星座物理上也只能通信覆盖部分地面关口站  $TG$ , 而通过合理设计则可以使 MEO 星座物理上通信覆盖全部地面关口站网, 通过 GEO 星座与 MEO 星座之间的星际链路  $IOL_{GEO \rightarrow MEO}$ 、MEO 星座内的星间链路  $ISL_{MEO \rightarrow MEO}$  和 MEO 星座与关口站之间的用户数据链路  $UDL_{MEO \rightarrow TG}$ , 可以实现 GEO 星座对全部地面关口站的间接通信覆盖, 即实现 GEO 星座对地面关口站的逻辑覆盖, 认为逻辑上 GEO 星座通信覆盖每一地面关口站。

在某快照周期  $T_s$  内, 基于 GEO 卫星通信波束覆盖上的考虑, GEO 星座物理上只能通信覆盖部分 MEO 星座, 但由于 MEO 星座中各 MEO 成员间存在冗余的星间链路  $ISL_{MEO \rightarrow MEO}$ , 因此此期间仍然可以通过 GEO 星座与 MEO 星座之间的星际链路  $IOL_{GEO \rightarrow MEO}$  和 MEO 星座内的这种星间链路  $ISL_{MEO \rightarrow MEO}$  实现 GEO 星座对全部 MEO 星座的间接覆盖, 即实现 GEO 星座对 MEO 星座的逻辑覆盖, 认为逻辑上 GEO 星座通信覆盖全部 MEO 星座。MEO 星座物理上全部通信覆盖地面关口站网, 通过 MEO 星座内星间链路  $ISL_{MEO \rightarrow MEO}$  逻辑上实现针对每一关口站的逻辑覆盖。

在整个系统周期  $T$  内, 随着整个多层星座组网系统的运行, 由于 MEO 星座对地和对 GEO 星座的相对移动, GEO 星座将对 MEO 星座实现全部通信覆盖, MEO 星座将对各地面关口站实现全部通信覆盖。

## 3.2 分群管理

对多层星座组网系统中的通信节点进行分群组网管理, 可以实现复杂卫星网络运行管理的简单化。在本文中, 分群组网管理的思想是: 将某 GEO 卫星和位于其通信覆盖波束直接照射下的所有 MEO 卫星定义为一个 MEO 物理分群, 该覆盖照射域定义为 GEO 物理覆盖域, 该 GEO 卫星定义为该物理群的群管理者, 分群时刻群中距离群管理者 GEO 最近的 MEO 卫星定义为该群群首。将同一半球范围内某 GEO 卫星和位于其通信覆盖域内的 MEO 轨道面上的所有 MEO 卫星定义为一个 MEO 逻辑分群, 包含逻辑群的区域定义为 GEO 逻辑覆盖域, 该 GEO 卫星定义为该逻辑群的群管理者。显然一个 MEO 逻辑群包含具有相同群管理者 GEO 的一个 MEO 物理群, 某物理群群管理者一定是该群的逻辑群管理者, 某物理群群首一定是该群的逻辑群群首。

通过上述群中群管理者与群首角色的备份冗余,使上述针对多层星座组网系统卫星网络进行的分群管理具有一定的抗毁能力。在一个物理群中,分群时刻将距离 GEO 卫星最近的 MEO 卫星定义为该群首选群首,次近者定义为该群第 1 备选群首,再近者定义为该群第 2 备选群首,依此类推,当首选群首失效时第 1 备份群首成为首选群首,实现原首选群首的角色功能,第 2 备选群首升级为第 1 备选群首,依此类推,这样使位于该物理群中的每颗卫星都有可能成为首选群首。当群中群管理者 GEO 失效时,群管理者的角色由群中群首 MEO 卫星充当,从而在多层星座组网系统的分群管理过程中不会因为某个卫星节点的失效导致整个分群管理模式的失败。

### 3.3 快照周期

与地面有线通信网络具有固定的网络拓扑结构不同,由 GEO/MEO 双层星座联合组成的多层星座组网系统随着星座特别是 MEO 星座的相对移动具有动态的拓扑结构,为了将地面网络的分析设计方法与成熟技术应用或借鉴到卫星网络中,也采用快照周期的概念将多层星座组网系统连续运行网络状态离散化为在一定时间段内网络结构认为不变的网络状态序列,这些序列被称为快照序列,该时间段便称为快照的周期  $T_S$ ,不同的快照周期  $T_S$  可以不同,具体依网络设计而定,为了使管理模式简单可靠,根据 GEO 星座和 MEO 星座的运行特点,各快照采用相同的快照周期  $T_S$ 。

基于上述快照周期的概念,为了分析方便,针对由 GEO/MEO 双层星座联合组成的多层星座组网系统的每一快照周期  $T_S$ ,以地面为参考系,当 MEO 星座中的 MEO 运行到一定的物理空域时,为其分配一个固定的位置编号,即不同的物理空域对应不同的位置编号,该位置编号亦称为逻辑位置  $(n, m)$ ,其中  $n$  为轨道面编号,满足:  $1 \leq n \leq N_M$ ,  $m$  为轨道面  $n$  中的卫星位置编号,满足:  $1 \leq m \leq M_M$ 。当某 MEO 卫星  $M_{i,j}$  相对地面连续移动时,其真实的物理位置(如按其经纬度表示)是连续变化的,但其逻辑位置在一定的空域内与该空域的编号对应,即在该空域中卫星  $M_{i,j}$  的逻辑位置不变,进入下一空域才发生变化。

基于多层星座组网系统中各层星座的组网结构和运行特点,结合上述分群管理模式和快照周期的分析思想,就可对各层星座中卫星的运行进行具体的预测,包括位置预测、连接关系预测等,为基于 GEO/MEO 双层星座联合组成的多层星座组网系统的路由分析与设计打下基础。

## 4 基于链路冗余修补方案的链路设计

为了充分发挥多层星座组网系统的应用效能,设计了多种基于 GEO/MEO 双层星座联合组网的多层星座组网系统的数据传输链路。

### 4.1 链路冗余连接方案

为了提高整个多层星座组网系统通信网络的性能和容量,在系统组网结构允许的情况下,只要两通信节点间满足建立通信链路的条件,就尽量在其间建立其通信链路,这便是链路冗余连接的思想。在基于 GEO/MEO 双层星座联合组网的多层星座组网系统中,基于该思想,具体的链路冗余链路方案就是:在 GEO 星座、MEO 星座内建立充分冗余的星间链路  $ISL_{GEO \leftrightarrow GEO}$  和  $ISL_{MEO \leftrightarrow MEO}$ ,在 GEO 星座、MEO 星座内以及地面关口站相互之间建立充分冗余的星际通信链路  $IOL_{GEO \leftrightarrow MEO}$ 、用户数据链路  $UDL_{GEO \leftrightarrow TC}$  和  $UDL_{MEO \leftrightarrow TC}$ 。其中特别是 MEO 星座中建立的星间链

路最能反应该链路冗余连接思想。

在 GEO 星座中建立星间链路  $ISL_{GEO \leftrightarrow GEO}$ ,是在 GEO 星座轨道面上某 GEO 卫星与其左右邻接的 GEO 卫星之间建立星间链路  $ISL_{GEO \leftrightarrow GEO}$ ,再借助 GEO 卫星与地面关口站之间建立的用户数据链路  $UDL_{GEO \leftrightarrow TC}$ ,GEO 星座就可建立一个相对完整的天基预警通信网络,可以满足多层星座组网系统分期建设和星座独立运行等要求。在 MEO 星座中建立星间链路  $ISL_{MEO \leftrightarrow MEO}$ ,是在 MEO 星座中,以 MEO 卫星  $M_{i,j}$  为中心的相同轨道面和相邻轨道面上,卫星  $M_{i,j}$  与其直接邻近的 6 颗 MEO 卫星  $M_{i,j-1}$ 、 $M_{i,j+1}$ 、 $M_{i-1,j}$ 、 $M_{i+1,j}$ 、 $M_{i-1,j+1}$ 、 $M_{i+1,j-1}$  之间建立 6 条星间通信链路  $ISL_{tra-M_{i,j} \leftrightarrow M_{i,j-1}}$ 、 $ISL_{tra-M_{i,j} \leftrightarrow M_{i,j+1}}$ 、 $ISL_{ter-M_{i,j} \leftrightarrow M_{i,j-1}}$ 、 $ISL_{ter-M_{i,j} \leftrightarrow M_{i,j+1}}$ 、 $ISL_{ter-M_{i,j} \leftrightarrow M_{i-1,j}}$ 、 $ISL_{ter-M_{i,j} \leftrightarrow M_{i+1,j}}$ ,其中  $ISL_{tra-M_{i,j} \leftrightarrow M_{i,j-1}}$ 、 $ISL_{tra-M_{i,j} \leftrightarrow M_{i,j+1}}$  为同轨星间链路,  $ISL_{ter-M_{i,j} \leftrightarrow M_{i,j-1}}$ 、 $ISL_{ter-M_{i,j} \leftrightarrow M_{i,j+1}}$ 、 $ISL_{ter-M_{i,j} \leftrightarrow M_{i-1,j}}$ 、 $ISL_{ter-M_{i,j} \leftrightarrow M_{i+1,j}}$  为邻轨星间链路。如图 2 所示。再借助 MEO 星座中 MEO 卫星与地面关口站之间建立的用户数据链路  $UDL_{MEO \leftrightarrow TC}$ ,MEO 星座也可建立一个相对完整的天基预警通信网络,以满足多层星座组网系统分期建设和星座独立运行等要求。

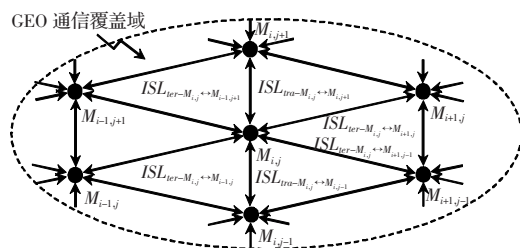


图 2 MEO 星座中链路连接关系

将分布在不同高度空间的 GEO 星座和 MEO 星座互连,可以进一步提高基于 GEO/MEO 星座卫星网络的通信性能和容量,特别是其系统抗毁性能,兼顾上述多层星座组网系统组网结构和分群管理思想,在作为群管理者的 GEO 卫星和分群群首的 MEO 卫星之间建立星际通信链路  $IOL_{GEO \leftrightarrow MEO}$ ,通过这些星际通信链路  $IOL_{GEO \leftrightarrow MEO}$  将两星座联系起来,断开这种链路连接时,两星座又可独立运行。

通过在 GEO 星座、MEO 星座与地面关口站之间建立的多条用户数据链路  $UDL_{GEO \leftrightarrow TC}$  和  $UDL_{MEO \leftrightarrow TC}$ ,地面关口站与 GEO 卫星或 MEO 卫星可以建立通信链接,甚至可以与多个 MEO 卫星或 GEO 卫星建立并保持连接,一个 MEO 卫星或 GEO 卫星也可通过维持多条  $UDL$ ,与多个地面关口站进行通信。

建立星地之间的用户数据链路,主要用于地面用户的控制和信息接收。在这些 GEO 星座和 MEO 星座与地面关口站之间建立用户数据链路  $UDL_{GEO \leftrightarrow TC}$  和  $UDL_{MEO \leftrightarrow TC}$ ,不仅可以实现上述 GEO 星座和 MEO 星座的独立组网,结合上述星间/星际链路  $ISL_{GEO \leftrightarrow GEO}$ 、 $ISL_{MEO \leftrightarrow MEO}$ 、 $IOL_{GEO \leftrightarrow MEO}$ ,还可在系统中两通信节点间建立延时更短的可达通信路径,以缩短延时。

### 4.2 卫星失效链路修补方案

由于多层星座组网系统用于军事目的,随着支持技术的发展和应用需求的提升,在未来的空间攻防中,作为多层星座组网系统的卫星网络通信节点被攻击而被动失效是可能的。再者多层星座组网系统本身是一类复杂系统且运行于太空之中,受各种环境因素的影响,系统中通信节点发生故障而主动失效也是可能的。与地面网络相比,基于卫星网络的多层星座组网系统通信节点数量相对较少,即使是少量的通信节点失效,也会

严重降低整个系统的通信性能和容量, 特别某卫星节点的失效将导致其邻近链路的全部断开。为了降低通信节点失效对多层星座组网系统的通信性能和容量的影响, 本人提出并设计了一种卫星失效链路修补方案, 通过这种方案, 可以最大程度地降低卫星节点失效对多层星座组网系统的通信性能和容量的影响, 从而使系统具有一定的抗毁能力。

设计卫星节点失效链路修补方案的理论依据是: 与基于地面有线网络的数据包传输不同, 卫星网络中数据包传输以无线射频方式建立的通信链路来实现, 因此卫星网络中某节点失效后, 失效卫星节点间的相邻相对的工作正常的卫星节点通过改变链路参数(如增大发射功率、调整发射方向等)就可以启动建立相互之间的通信链路, 这与地面有线网络中建立链路需人工敷设物理线路不同, 无线网络中的通信链路可以通过预先设计, 需要时再设置启用, 因此尽管实施这种方案会增加系统特别是链路类型设计的复杂性, 但对于整个卫星网络的建设投资和运行需求而言, 既必要也可行。

设计卫星节点失效链路修补方案的指导思想是: 启用视距范围内间隔失效卫星次相邻卫星节点的修补连接。该链路修补方案主要针对 MEO 星座。若 MEO 星座中某卫星节点  $M_{i,j}$  失效, 启用视距范围内(不被地球所遮挡)间隔失效卫星间次相邻卫星节点的链路连接, 以使卫星网络尽量恢复各节点间的原有的强连接特性, 从而增强网络的抗毁性能。过程如图 3 所示。

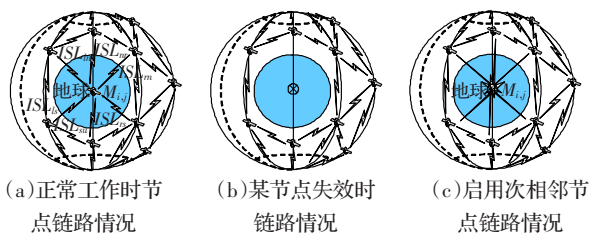


图3 启用间隔失效卫星间次相邻卫星节点的链路连接过程

如图 3(a)所示, MEO 卫星  $M_{i,j}$  与其相邻的 6 颗 MEO 卫星通过 6 条链路  $ISL_{m1}$ 、 $ISL_{m2}$ 、 $ISL_{m3}$ 、 $ISL_{m4}$ 、 $ISL_{m5}$ 、 $ISL_{m6}$  直接相连, 为整个卫星网络提供充分冗余的具有强连接特性的通信链路。

如图 3(b)所示, 当 MEO 星座中的 MEO 卫星  $M_{i,j}$  失效时, 与之相连的 6 条链路  $ISL_{m1}$ 、 $ISL_{m2}$ 、 $ISL_{m3}$ 、 $ISL_{m4}$ 、 $ISL_{m5}$ 、 $ISL_{m6}$  均被断开, 从而在 MEO 星座形成一个网络连接上的空洞, 由于整个卫星网络的总节点数和链路数与地面 Internet 网络相比规模极小, 因此卫星网络中的单一节点失效和其相连链路失效也会严重影响整个卫星网络的通信性能。

为了缓解卫星网络中的节点失效和其相连链路失效对整个卫星网络通信性能的严重影响, 提出采用如图 3(c)所示的启用视距范围内间隔失效卫星间次相邻卫星节点链路连接的链路修补方案。

与基于地面有线网络的数据包传输不同, 卫星网络中数据包传输以无线射频方式建立的通信链路来实现, 因此卫星网络中某节点失效后, 失效卫星节点间的相邻相对正常工作的卫星节点通过改变链路参数(如增大发射功率、调整发射方向等)就可以启动建立相互之间的通信链路, 这与地面有线网络中建立链路需人工敷设物理线路不同, 无线网络中的通信链路可以通过预先设计, 需要时设置启用。

通过对 MEO 星座中 MEO 卫星次相邻卫星节点链路建立能力的预先设计, 使 MEO 卫星具有这种链路修补功能。如图 3

(c)所示, 当卫星节点  $M_{i,j}$  失效时, 就可以在与它间隔的卫星节点  $M_{i,j-1}$  与卫星节点  $M_{i,j+1}$  间、卫星节点  $M_{i-1,j-1}$  与卫星节点  $M_{i+1,j+1}$  间、卫星节点  $M_{i-1,j+1}$  与卫星节点  $M_{i+1,j-1}$  间建立修补链路, 以改善因卫星节点失效对整个卫星网络通信性能的严重影响, 但前提是这些节点对之间必须存在视距通信范围, 即节点对之间的直线距离不被地球所遮挡, 通过合理设计星座中星层高度和星层中同轨卫星数, 完全可以满足这一前提。

## 5 MEO/GEO 星座系统结构性能分析

### 5.1 星层结构

本文提出的 GEO/MEO 双层星座和用户地面终端的卫星网络由空间星座与地面关口站共同组成, GEO 星层逻辑上通信覆盖 MEO 星层, GEO 星层逻辑上通信覆盖地面关口站, MEO 星层通信覆盖地面关口站, 由此组成一个覆盖全球的立体交叉的强连通网络。通过网络中这种星座分层与分层间的协同工作, 可以为不同用户或各种任务提供随时随地所需的灵活的全球性通信网络或监测监视网络。

由于本文提出的 GEO/MEO 双层星座和用户地面终端的卫星网络中只有 GEO/MEO 两层星座, 这种结构既能实现真正意义上的全球性通信覆盖, 又具有相对简单的运行与维护组织与结构。

### 5.2 星座分群

在本文提出的 GEO/MEO 双层星座和用户地面终端的卫星网络中, 为了方便分析与实施, 借用逻辑位置的概念与快照周期的概念进行 MEO 星座的分群管理, 在后续进行该卫星网络的路由分析, 依然运用逻辑位置的概念和快照周期的概念进行路由分析与构建。

对 MEO 星座进行分群管理, 将位于同一 GEO 通信覆盖域内 MEO 轨道面上处于同一半球范围内的所有 MEO 卫星分成一个逻辑群, 群中距离 GEO 卫星最近的 MEO 卫星定义为该群首选群首, 次近者定义为该群第一备选群首, 依此类推, ..., 使位于该物理群中的每颗卫星都有成为群首的机会。群首负责与群管理者 GEO 卫星之间建立连接链路, 群中其它非群首卫星只与群内 MEO 卫星保持连接, 而不与其群管理者 GEO 建立连接(除非被升级定义所属群群首), 通过该种分群与群首确定机制, 就可以使本文设计的卫星网络在分群实施上具有节点抗毁的功能。

在该卫星网络中, 当群管理者 GEO 正常工作时, 群首负责该群路由计算所需各卫星节点的状态信息的收集传输和路由表的群内分发, 群管理者 GEO 负责该群的路由表计算和层间分发, 可见星层间通信只是通过群首 MEO 与群管理者 GEO 实现, 与生成网络路由表时网络状态信息的洪泛广播相比, 该机制可以减少整个卫星网络中的通信负载, 从而提高整个卫星网络的传输性能。

在该卫星网络中, 当群管理者 GEO 失效时, 群首不仅负责该群路由计算所需各卫星节点的状态信息的收集传输和路由表的群内分发, 还充当群管理者的角色, 负责该群的路由表计算和分发, 这样即使卫星网络中的 GEO 失效, 整个网络仍然能够正常工作, 具有只是在卫星网络的整体性能上有所下降, 但又增加了卫星网络的抗毁能力。

### 5.3 网络链路

在上述 GEO/MEO 双层星座和用户地面终端的卫星网络

中,存在  $ISL_s, IOL_s, UDL_s$  3 种类型星间/星地链路,其中中层星座之间通过  $ISL_s$  通信,异层星座之间通过  $ISL_s$  通信,星座与地面关口站之间通过  $UDL_s$  通信。特别是在 MEO 星层中,每一 MEO 卫星与其相邻的 6 颗 MEO 卫星通过 6 条链路直接  $ISL_m, ISL_{su}, ISL_{in}, ISL_{ls}, ISL_m, ISL_{ns}$  相连,如图 2 所示,这样设计可以。(1)提高整个卫星网络的通信带宽,特别是 MEO 星层的通信带宽,为传输星座综合业务提供支持;(2)提高整个卫星网络的抗毁性能,特别是通过 MEO 星层通信链路的冗余设计,即使星层中发生链路或卫星节点失效,星层中仍具有充分的备用链路和卫星节点启用,通过重路由计算可以继续完成数据包的传输。另外启用视距范围内间隔失效卫星间次相邻卫星节点的链路连接,维护卫星网络尽量恢复各节点间的原有的强连接特性,也是提高整个卫星网络的抗毁性能和保障网络通信带宽的一种有效措施;(3)降低整个卫星网络的传输延时,由于网络中各卫星节点间具有多条冗余通信链路,进行路由计算选择路径时就可以充分避开流量拥塞链路,从而缩短传输过程中数据包因链路流量拥塞而导致的长延时;(4)充分支持各种 QoS 需求的数据包传输,由于网络中各卫星节点间具有多条冗余通信链路,网络中可以采用多协议标签交换 MPLS 技术支持各种 QoS 需求的不同业务数据包的传输,甚至预留信道以高优先级的面向任务的数据包传输。

### 6 总结

利用卫星节点逻辑位置与物理位置,对星座中 MEO 星层进行基于快照周期内位置固定的方法对 MEO 进行分群管理:建立 MEO 分群、选择 MEO 分群群首和其群管理者 GEO,通过分析卫星网络中数据传输链路与类型,设计网络结构中群内、星层以及整个星座的通信链路。

进行星座中 MEO 有效分群时,设计其群首的备份选择机制,以及群首 MEO 替代失效群管理者 GEO 机制,可以从整个卫星网络结构提高系统的抗毁性能;通过对星座中 MEO 星层的通信链路进行充分的冗余设计,以及启用视距范围内间隔失

效卫星间次相邻卫星节点链路连接的链路设计,可以从星座网络的通信链路上提高整个卫星网络的抗毁性能,并同时提高整个卫星网络的通信性能和通信容量,满足各种不同业务需求的数据包传输。

### 参考文献:

- [1] Kimura K, Inagaki K. Double layered inclined orbit constellation for advanced satellite communications network[J]. IEICE Transaction on Communication, 1997: 93-102.
- [2] Ekici E, Akyildiz I F, Bender M D. A distributed routing algorithm for datagram traffic in LEO satellite networks[J]. IEEE/ACM Transaction on Networking, 2001, 9(2): 137-147.
- [3] Werner W, Berndt G, Edmaier B. Performance of optimized routing in LEO intersatellite link networks[C]//Proceedings of IEEE 47th Vehicular Technology Conference, 1997, 1: 246-250.
- [4] Foster M. A delay efficient satellite network for multimedia communication: a pilot study[D]. USA: Master Thesis, University of Florida, 2002.
- [5] Werner M, Frings J, Wauquiez F, et al. Topological design, routing and capacity dimensioning for ISL networks in broadband LEO satellite systems[J]. Int J Sat Commun, 2001, 19(6): 499-527.
- [6] Duresi A, Dash D, Anderson B L, et al. Routing of real-time traffic in a transformational communications architecture[C]//Proc of IEEE Aerospace Conference, 2004: 65-75.
- [7] 洪志国, 吴凤鸣, 范植华, 等. 基于 PETRI 网模型的 LEO/MEO/GEO 三层卫星网络的性能分析[J]. 电子学报, 2005, 1: 354-357.
- [8] Dash D, Duresi A, Jain R. Routing of VoIP traffic in multi-layered satellite networks[C]//Proc of Performance and Control of Next-Generation Communications Networks, Orlando, Florida, 2003: 7-11.
- [9] Chen C, Ekici E, Akyildiz I F. Satellite grouping and routing protocol for LEO/MEO satellite IP networks[C]//Proc of the Fifth International ACM Workshop on Wireless Mobile Multimedia (WoW-MoM 2002), Atlanta, Georgia, 2002: 109-116.

(上接 105 页)

$$B_1 = A_1 \circ R_1 = (0.290\ 2, 0.323\ 6, 0.261\ 0, 0.125\ 4, 0), B_2 = A_2 \circ R_2 = (0.460\ 0, 0.360\ 0, 0.140\ 0, 0.040\ 0, 0), B_3 = A_3 \circ R_3 = (0.159\ 7, 0.346\ 0, 0.277\ 0, 0.152\ 6, 0.064\ 8), B_4 = A_4 \circ R_4 = (0.342\ 9, 0.314\ 3, 0.242\ 9, 0.100\ 0, 0)$$

由此得出该政府网站的模糊综合评估结果:

$$B = A \circ R = (0.109\ 3, 0.350\ 7, 0.350\ 7, 0.189\ 2)$$

$$\begin{bmatrix} 0.290\ 2 & 0.323\ 6 & 0.261\ 0 & 0.125\ 4 & 0.000\ 0 \\ 0.460\ 0 & 0.360\ 0 & 0.140\ 0 & 0.040\ 0 & 0.000\ 0 \\ 0.159\ 7 & 0.346\ 0 & 0.277\ 0 & 0.152\ 6 & 0.064\ 8 \\ 0.342\ 9 & 0.314\ 3 & 0.242\ 9 & 0.100\ 0 & 0.000\ 0 \end{bmatrix} = (0.313\ 9, 0.342\ 4, 0.220\ 7, 0.100\ 2, 0.022\ 7)$$

其中,上述运算中,“ $\circ$ ”选用加权平均模型  $M(\cdot, +)$ 。

这一结果反映了该政府网站对于各评估等级隶属度的分布状况。若按最大隶属法,可判定其评估等级为“良好”。

若需要具体的定量评估结果,可采用加权平均法进行量化。具体做法是:先规定评语集  $V$  中各评语的量化值  $f(v_h)$ ,然后通过加权平均计算出综合评估的量化结果  $v = \sum_{h=1}^5 b_h \circ f(v_h)$ 。

如果取  $f(v_1)=100, f(v_2)=85, f(v_3)=70, f(v_4)=55, f(v_5)=40$ , 则最终评估结果为:  $v=82.36$ (分)。

### 5 结束语

面向用户的政府网站模糊综合评估,是根据对用户的调查统计,对政府网站进行数学化、模糊化的多层次综合评估,它全面地反映了用户对政府网站的综合评价,评估结果有利于促进和指导政府网站的建设。这一方法的推广应用,将使政府网站的评估工作进一步科学化。

### 参考文献:

- [1] Saaty T L. 层次分析法[M]. 许树柏,译.北京:煤炭工业出版社,1988.
- [2] Gupta M P, Jana D. E-government evaluation: a framework and case study[J]. Government Information Quarterly, 2003(20): 365-387.
- [3] 佟岩. 政府网站绩效评估指标体系研究[J]. 办公自动化, 2007(4): 20-23.
- [4] 费军, 石青, 余丽华. 高校信息化评价指标体系及评价方法探讨[J]. 实验技术与管理, 2004, 21(3): 13-18.
- [5] 费军, 陈绵云. 基于层次分析法的领导干部经济责任审计评价[J]. 计算机工程与应用, 2003, 39(18): 25-27.
- [6] 费军. 军队领导干部经济责任审计模糊综合评价探讨[J]. 军事经济研究, 2002, 23(10): 62-64.