

天基信息系统网络拓扑结构建模方法研究

马满好¹ 邱涤珊¹ 王亮¹

(1 国防科技大学信息系统与管理学院,长沙市德雅路 137 号,410073)

摘要:针对天基信息系统的网络拓扑结构提出了一种建模方法,在构建天基信息系统网络要素节点与链接模型的基础上,通过静态建模与动态建模两种方式来描述天基信息系统网络拓扑结构的运行规律。给出了一个 12 节点的仿真实例,仿真结果验证了所构建的拓扑结构模型的合理性。

关键词:天基信息系统;网络拓扑结构;链接模型;时间片

中图法分类号:P208

天基信息系统网络是由节点以及节点之间的链接组成的动态网络。不同于陆地网络的平面拓扑结构,天基信息系统网络拓扑结构是三维立体的。由于卫星节点的运动,整个网络拓扑结构是不断变化的,但由于卫星节点运动具有周期性规律性,并且空间卫星节点数目相对稳定,天基信息系统拓扑结构的变化是可以预测的^[1]。

目前,国内外对卫星网络拓扑结构进行建模主要是针对 LEO 卫星,主要方法有动态虚拟拓扑^[2,3]、有限状态自动机^[4,5]、快照序列^[6]等。本文通过建立静态与动态结构模型来描述天基信息系统网络拓扑结构的运行规律。静态模型描述了一定时刻的拓扑结构,动态模型构建中定义了时间点和时间片,并提出了时间片划分算法,反映在一定时间段内的稳态结构。本文的主要假设与边界条件为:

- 1) 只考虑某一时刻或某一时间段内的天基信息系统网络拓扑结构,假设在该时刻或该时间段内系统节点状态稳定,不发生节点的增删。
- 2) 节点间链接是对称的,即只要在某时刻某一节点与另一节点存在链接,则另一节点与该节点间亦存在同样的链接。
- 3) 对影响拓扑结构的环境条件暂不作考虑。

1 天基信息系统节点与链接建模

1.1 节点建模

天基信息系统节点是现实天基信息系统中实

体的抽象化表示。按照空间位置和功能特性,建立天基信息系统节点的层次结构图(见图 1)。

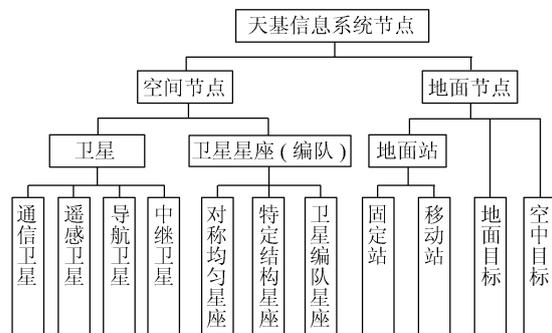


图 1 天基信息系统节点层次结构图

Fig. 1 Hierarchy of Space-Based Information System Nodes

本文对遥感卫星、中继卫星和地面站 3 种较为典型的天基信息系统节点进行分析,采取参数建模的原理给出各自的形式化模型。对于卫星节点主要考虑其节点编号、轨道参数以及其自身的一些特殊属性,即

$$\text{Sat} = \{\text{num}, \text{orbit}, \text{para}\}$$

式中,Sat 表示卫星节点;orbit 为轨道参数,一般可采用经典的 6 颗轨道根数来表示^[7];para 为卫星所携带有效载荷的功能属性,本文只以 para 表示这种属性的集合,各种卫星的功能属性可参见文献^[8]。

对于地面节点则主要考虑其节点编号与地理位置坐标,建立形式化模型为:

$$\text{Gat} = \{\text{num}, \text{posi}, \text{type}\}$$

式中, Gat 表示地面节点; num 表示地面节点在系统中的编号; posi 为地理位置坐标, 可用大地地理坐标来表示^[7]; type 表示用于区分不同种类空间节点的地面节点类别。

为了便于对天基信息系统支持目标观测的过程进行定量化的分析, 本文将目标节点都作为地面目标节点来考虑, 并假定为点目标情况。

1.2 链接建模

天基信息系统链接是指天基信息系统节点与节点之间建立的有效数据传输通路, 可分为星间链接与星地链接。星间链接又可分为星间数传链接、星间测量链接、星间监视链接。星地链接可分为星地数传链接、导航定位链接、环境监控链接、预警链接以及侦察链接。

一条链接 Link 主要包括两方面的属性: 基本属性和特殊属性, 可形式化描述为:

$$\text{Link} = \{\text{BasicAttri}, \text{PeculAttri}\}$$

BasicAttri 描述了节点间所建立链接最一般的属性, 包括链接对象 L_o 即建立链接的两个节点 N_1 、 N_2 , 链接的生存时间 L_T , 链接开始时间 LTS, 链接结束时间 LTE。PeculAttri 按照链接对象的不同具有不同的属性参数, 其属性参数的提取主要是依据链接对象即节点本身的一些特性。如对于遥感卫星与中继卫星的星间数传链接, PeculAttri 主要为建立链接时的天线波段 AntennaBand 以及数据传输数率 TransRate, 则星间数传链接模型可表示为:

$$\text{S2S_DTLink} = \{[L_o(N_1, N_2), L_T(\text{LTS}, \text{LTE})], [\text{AntennaBand}, \text{TransRate}]\}$$

2 拓扑结构建模

2.1 拓扑结构静态建模

天基信息系统网络是一个随着时间演化的动态网络, 但在某一瞬时可将该网络看作一个静态网络, 此时的静态网络主要有以下几个特征: ① 天基信息系统节点数目不发生变化; ② 节点间距离比较大; ③ 天基信息系统链接数目不发生变化; ④ 各个链接的特性均固定不变。

天基信息系统网络拓扑结构静态模型用以反映某一瞬时天基信息系统网络拓扑结构的特征, 模型可表示为: $\text{Topo_S}(t, N, L)$ 。其中, t 表示所考察天基信息系统的某一运行时刻; N 表示天基信息系统节点集合, $N = \{N_1, N_2, \dots, N_n\}$, n 为天基信息系统节点的数目; L 表示在该时刻存

在的天基信息系统链接集合, $L = \{L_1, L_2, \dots, L_m\}$, m 为 t 时刻统链接的数目, $L \subseteq N \times N$ 。

对于链接集合 L , 由于所考察的只是某一时刻的拓扑结构特征, 因此对于该链接集合中的元素不考虑链接的生存时间, 只关注建立链接的两个节点对象以及链接的特殊属性参数。

定义 1 拓扑图。拓扑图是利用几何学中的图论知识, 将天基信息系统网络拓扑结构内各个节点分别对应为图中的顶点, 以两两节点间某一时刻所形成的链接对应为图中的一条边, 即用图表示某一时刻的天基信息系统网络拓扑结构。

拓扑图模型可以使人们直观清楚地了解某时刻天基信息系统网络拓扑结构的状态, 如两两节点间的链接情况、侦察卫星与目标区域的链接数目等。本文以链接矩阵 \mathbf{M} 描述该拓扑图结构, 以一种辅助的数据结构链接表 LTA 描述拓扑图的性质。链接矩阵 \mathbf{M} 实质为一关系矩阵, 链接表 LTA 则反映了拓扑图中各个链接的特性。因此, 拓扑图模型为:

$$\text{TG} = \{t, \mathbf{M}, \text{LTA}\}$$

式中, t 为所考察天基信息系统运行的特定时刻。

以 M_{ij} 表示链接矩阵中第 i 行第 j 列的元素, 用以反映 t 时刻第 i 个节点与第 j 个节点的链接情况, 取值为 1 或 0。1 表示该元素对应的第 i 个节点 N_i 与第 j 个节点 N_j 之间存在链接, 0 反之。链接表 LTA 的各项分别为链接序号 LinkNum、索引值 Index、链接类型 LinkType、链接特殊属性 PeculAttri。

序号 LinkNum 惟一标识一条节点与节点之间存在的链接。索引值 Index 是对矩阵某一位置的索引。由于所建立矩阵为对称矩阵, 其矩阵位置 (i, j) 可与某一数据一一对应。因此, 可将该数值作为链接矩阵中某条链接的索引值, 计算公式为^[8]:

$$\text{Index} = \begin{cases} \frac{i(i-1)}{2} + j - 1, & i \geq j \\ \frac{j(j-1)}{2} + i - 1, & i < j \end{cases}$$

链接类型 LinkType 描述该链接的类型。链接特殊模型 PeculAttri 对应节点之间所形成链接的特殊属性。

2.2 拓扑结构动态建模

天基信息系统网络拓扑结构动态模型反映的是某一时间段内天基信息系统网络拓扑结构的运行特征, 模型可表示为: $\text{Topo_D}([t_s, t_e], N, L')$ 。其中, $[t_s, t_e]$ 表示所考察的天基信息系统运

行时间段; N 表示天基信息系统节点集合, $N = \{N_1, N_2, \dots, N_n\}$, n 为天基信息系统节点的数目; L' 表示在该时刻存在的天基信息系统链接集合, $L' \subseteq N \times N$ 。

不同于静态模型 $\text{Topo_S}(t, N, L)$ 中的链接集合 L , 动态模型 Topo_D 中的链接集合 L' 具有生存时间。假设在考察时间段 $[t_s, t_e]$ 内, 节点 N_i 与 N_j 之间存在一条链接 Link , $\text{Link} = \{[L_o(N_i, N_j), L_T(\text{LTS}, \text{LTE})], \text{PeculAttri}\}$, 则 $\text{Link} \in L'$ 。若某时刻 t 满足 $\text{LTS} \leq t \leq \text{LTE}$, 则在静态模型的链接集合 L 中亦有 N_i 与 N_j 相应的链接。

由于天基信息系统网络节点之间的链接具有一定的生存时间, 将全部节点间在一定时间内的链接关系纳入系统中考虑, 则可以认为在一个相对较短的时间区间内系统拓扑结构固定不变。所以, 某时刻天基信息系统运行特征建立的静态模型可反映出一个时间区间内系统的拓扑结构特征。将所考察时间段划分为若干个时间区间, 通过一系列时间区间对应的静态模型便可反映出该时间段内天基信息系统网络拓扑结构的演化, 即动态模型的结构可用一系列相应的静态结构来表示。

定义 2 时间片。 时间片是指天基信息系统网络拓扑结构不变的一个时间区间, 即在该时间区间内节点之间的链接关系保持不变。

需要说明的是, 时间片的定义只是在某一个时间区间内节点间链接关系保持不变, 而该链接的某些特性参数是变化的, 如链接的距离、俯仰角等。通过引入时间片的概念可将天基信息系统动态拓扑模型的结构转化为一组静态的结构, 这些静态结构对应为拓扑图。在每个时间片内任取一边界时间点, 可计算该时间点对应的拓扑图, 由随时间演化的拓扑图序列便可模拟天基信息系统网络拓扑结构的动态过程。

用 TPS 表示将考察时间段 $[t_s, t_e]$ 划分为 m 个时间片序列集合, $\text{TPS} = \{t_{p_1}, t_{p_2}, \dots, t_{p_m}\}$ 。用 TGS 表示对应每个时间片的拓扑图序列集合, $\text{TGS} = \{\text{TG}_1, \text{TG}_2, \dots, \text{TG}_m\}$ 。 $\text{TG}_i (1 \leq i \leq m, i \in Z^+)$ 表示对应 t_{p_i} 的拓扑图, 则 $[t_s, t_e]$ 内天基信息系统网络拓扑结构动态模型结构可表示为:

$$\text{TGE} = \{ \text{TPS}, \text{TGS} \}$$

由拓扑演化模型 TGE 便可充分表达拓扑动态模型的运行机制。

为了便于计算每一时间片内的拓扑图以及确定时间片的边界, 引入时间点的概念。

定义 3 时间点。 时间点表示天基信息系统内任意两个节点之间链接关系发生改变的時刻, 即原来没有链接关系的两个节点在时间点处建立链接, 或是原来存在链接关系的两个节点在时间点处断开链接。

引入时间点的概念, 便可对一个时间段进行时间片的划分。 N 为天基信息系统节点集合, N_i 与 N_j 为系统内任意两个节点, 以 t_k 与 t_{k+1} 表示时间点序列中任意相邻的两个时间点。以逻辑值 m_{ij}^k 表示第 k 个时间点处节点 N_i 与 N_j 的链接关系, 为 1 时说明存在链接, 为 0 时反之。时间点选取的两个基本原则为: ① 在每个时间点处有某个节点与节点的链接发生通断变化; ② 相邻两个时间点内即时间片内, 节点之间的链接关系保持不变。

在相邻两个时间片之间, 第一个时间片的结束时间点与第二个时间片开始时间点是相同的, 因此还需要确定时间片的边界。确定时间片边界的基本原则如下所示。

1) 时间片的开始时间点若对应着此刻有两个节点之间开始建立链接, 则在时间片内包括该时间点; 若对应着此刻某两个节点之间所建立链接的结束, 则在时间片内不包括该时间点。

2) 时间片的结束时间点若对应着此刻有两个节点之间开始建立链接, 则在时间片内不包括该时间点; 若对应着此刻两个节点之间所建立链接的结束, 则在时间片内包括该时间点。

在划分时间片后, 可分别计算每个时间点的拓扑图, 包括每个时间点的链接矩阵与链接表。将各个拓扑图对应到所对应的的时间片, 便得到天基信息系统网络拓扑结构随时间的演化模型。

3 仿真实验

本文所选用的实例中, 天基信息系统共有 12 个节点, 其中一颗中继卫星 R_1 , 一个地面站 GS , 7 颗遥感卫星 $S_1 \sim S_7$ 和 3 个点目标 $T_1 \sim T_3$ 。对于本例的遥感卫星具体的有效载荷能力不作深入分析, 只考虑空间分辨率 SpaRes 和目标定位精度 LocPre 两个方面, 并且假设空间分辨率在任务执行过程中不变, 即对该参数设定的值反映的是平均值。另外, 对于遥感卫星与中继卫星、地面站建立的数传链接也只考虑天线波段 AntennaBand 以及数据传输数率 TransRate 。

通过 STK 进行仿真计算可得到天基信息系统中两两节点之间的链接数据, 对这些数据进行

时间片的划分。由计算结果可知,在考察时间段 12:00:00~15:00:00 内,可划分为 51 个时间片。时间片长度不固定,如第一个时间片的长度为 498 s,而最后一个时间片长度仅为 9 s。在第一个时间片中开始标志为 1,说明在该时间片内包含开始时刻。根据时间片边界确定原则可知,在该时间片的开始时刻,系统内至少有两个节点建立链接。在第 3、5、7、10、15 等时间片内,开始标志与结束标志均为 0,说明在这些时间片的开始时刻系统内有节点断开链接,而在结束时刻有节点建立链接。如对于第 3 个时间片,由于开始、结束标志为 0,因此,第 2 个时间片的结束标志应为 1,第 4 个时间片的开始标志应为 1。

在时间片划分完成后,便可在每个时间片内计算拓扑图。下面取前两个时间片的拓扑图计算结果。链接矩阵如 M_1 与 M_2 所示,链接表分别见表 1 与表 2。

$$M_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

对第 1 个链接表与第 2 个链接表进行对比分析可知,在第 2 个时间片新增了一条星地侦察链接,见表 2 中第 5 条链接。对 M_1 与 M_2 的第 10、11、12 列进行对比可知,此时增加的链接为 S_3 与 T_1 建立的侦察链接。进行验证, $index = j(j -$

表 1 时间片 1 链接表

Tab. 1 Links of Timeslice 1

序号	链接索引值	链接类型	链接特殊属性	
1	20	S2S_DTLink	AntennaBand:S	TransRate:10
2	22	S2S_DTLink	AntennaBand:Ka	TransRate:200
3	26	S2S_DTLink	AntennaBand:Ka	TransRate:200
4	34	S2S_DTLink	AntennaBand:Ku	TransRate:100
5	45	S2T_ISRLink	SpaRes:10	LocPre:100

表 2 时间片 2 链接表

Tab. 2 Links of Timeslice 2

序号	链接索引值	链接类型	链接特殊属性	
1	20	S2S_DTLink	AntennaBand:S	TransRate:10
2	22	S2S_DTLink	AntennaBand:Ka	TransRate:200
3	26	S2S_DTLink	AntennaBand:Ka	TransRate:200
4	34	S2S_DTLink	AntennaBand:Ku	TransRate:100
5	37	S2T_ISRLink	SpaRes:5	LocPre:70
6	45	S2T_ISRLink	SpaRes:10	LocPre:100

1)/2+i-1=37,与表 3 中第 5 条链接索引值相同。由此可知,在第 2 个时间片的开始时刻,由于 S_3 与 T_1 建立的链接而引起天基信息系统拓扑结构的变化。

4 结 语

本文对天基信息系统拓扑结构建模方法进行初探。为了建模研究能够较流畅进行,对许多现实问题作了假设和简化。这些假设简化一方面突出了主要矛盾,但另一方面又将天基信息系统本身的一些实际特性作了简化,这些问题将作为本文下一步的研究方向给予解决。同时,在仿真实例中,假定了地面站同时支持各类卫星,并且链路保持的时间性往往与星上有效载荷有较大关联,在实际应用中可进行一定的后续处理,以适合应用的拓扑结构。

参 考 文 献

[1] 金士尧,程志全. 天网综合仿真和演示验证系统[J]. 系统仿真学报, 2005, 17 (3):513-517

[2] Werner M, Jahn A, Lutz E. Analysis of System Parameters for LEO/MEO Satellite Communication Networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1995,13(2):542-551

[3] Werner M, Lutz E. Neural Network Approach to Distributed Adaptive Routing of LEO Intersatellite Link Traffic[C]. IEEE Vehicular Technology Conference, Ottawa, Canada,1998

[4] Chang H S, Kim B W, Lee C G. FSA-based Link Assignment and Routing in Low Earth Orbit Satel-

- lite Networks[J]. IEEE Transaction on Vehicular Technology, 1998, 47(3): 1 289-1 297
- [5] Chang H S, Kim B W, Lee C G, et al. Topological Design and Routing for Low-Earth Orbit Satellite Networks[C]. IEEE 1995 Global Telecommunications Conference, Singapore, 1995
- [6] Gounder V. Routing in LEO-based Satellite Networks[EB/OL]. http://www.utdallas.edu/ravip/papers/ets99_satellite.pdf, 1999
- [7] 凌云翔, 邱涤珊, 徐培德. 航天军事装备应用[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2005
- [8] 严蔚敏, 吴伟民. 数据结构(C语言版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997

第一作者简介: 马满好, 博士生, 讲师。主要从事军事运筹与作战模拟研究。

E-mail: mhma@sina.com

Modeling Topology Structure of Space-Based Information Systems

MA Manhao¹ QIU Dishan¹ WANG Liang¹

(1 College of Information System and Management, National University of Defense Technology, 137 Deya Road, Changsha 410073, China)

Abstract: The space-based information system, (SBIS) is an important aerospace equipment to obtain the information superiority in the battlefield with a dynamic network of spatial-temporal feature. A modeling for the SBIS network topology was proposed, which is on the basis of the modeling of nodes and links, using static and dynamic modeling to describe the SBIS network topology regularity in the operation. The static model describes the topologic structure at a given break. In the proposed dynamic model, time break and timeslice were defined, and an algorithm of timeslice dividing was presented. Finally, a simulation sample with 12 nodes was built. The simulated results indicate the topology models built are reasonable that can reflect the regularity of the SBIS network in a certain extent.

Key words: space-based information system; network topology structure; linking model; timeslice

About the first author: MA Manhao, Ph.D candidate, lecturer, majors in military operational research and war game.

E-mail: mhma@sina.com

下期主要内容预告

- ▶ 基于时空模糊本体的交通领域知识建模 李德仁, 等
- ▶ 面向道路网的 GPS 浮动车覆盖率模型研究 李清泉, 等
- ▶ 基于有理函数模型的高分辨率卫星遥感影像匹配 袁修孝, 等
- ▶ 基于蚁群算法的正射影像镶嵌线自动选择 张剑清, 等
- ▶ 震后松弛过程的粘弹性模型在 1997 年 Mw7.6 玛尼地震中的应用研究 许才军, 等