

LEO/MEO 卫星网络中的一种抗毁动态路由算法^{*}

李冬妮 王光兴

(东北大学网络与通信中心 沈阳110004)

摘要 首先分析了目前卫星网中流行的离线路由算法由于无法获知当前网络中流量的分布和链路的状态,因此无法对路由进行优化,也无法绕开故障链路的缺陷。针对这些缺陷,提出了一种抗毁动态路由算法。该算法首先通过一种基于簇的星间链路状态信息传递子算法,以较低的带宽开销将链路状态信息传遍全网;然后利用边界卫星源路由子算法,对链路状态、路由切换等因素进行综合优化。在 Iridium 系统模型的基础上对离线路由算法和抗毁动态路由算法进行了仿真,仿真结果证明后者具有更好的性能,尤其在部分链路故障时,优势更加明显。

关键词 LEO/MEO 卫星网络,星间链路,离线路由算法,抗毁动态路由算法,簇

A Destruction-Resistant Dynamic Routing Algorithm on LEO/MEO Satellite Networks

LI Dong-Ni WANG Guang-Xing

(Research Center for Network & Communication of Northeastern University, Shenyang 110004)

Abstract The popular off-line routing algorithm in the current satellite networks is firstly analyzed. Since it is unable to get the information on the distribution of traffic load and the link status, routes based on these off-line routing algorithms can neither be optimized nor kept away from the destroyed links. A destruction-resistant dynamic routing algorithm is proposed to solve these defects. This algorithm first spreads out link status information all over the network at low bandwidth cost by using a cluster-based intersatellite-link-status-delivery sub-algorithm; and then a border-satellite-source-routing sub-algorithm integratedly optimizes the factors such as link status, routing handover, and etc. Based on the Iridium system model, an offline routing algorithm and a destruction-resistant dynamic routing emulation are also presented, the emulation results give the conclusion that the latter's performance is better, especially when part of the links break down.

Keywords LEO/MEO satellite network, Intersatellite link, Off-line routing algorithm, Destruction-resistant dynamic routing algorithm, Cluster

1 引言

卫星网络作为第三代移动通信的重要组成部分,正受到越来越多的关注。而随着个人卫星通信网络(Satellite PCN)概念的提出,LEO和MEO卫星通信系统更是成为了研究的热点。要提高卫星网络的远距离传输速度和可靠性,减少其对地面系统的依赖,以满足第三代移动通信的要求,使用星际链路(ISL, InterSatellite Link)是十分必要的^[1~3]。

星际链路在LEO/MEO卫星网络中的应用也带来了许多新的问题,其中路由问题显得尤为关键。国内外学者提出了许多基于星际链路的LEO/MEO路由算法,例如Markus Werner等人的基于ATM的LEO/MEO卫星网络路由策略^[1,2], Hong Seong Chang等人的LEO卫星网络拓扑设计和路由算法^[4], Vidyashankar V Gounder等人的面向连接的、在简单标记交换基础上发展起来的卫星网络路由算法^[5]等。这些算法对路由的计算采用离线(off-line)预先计算的方式以减少星上实时计算量,简化卫星功能。为了表述方便,本文将这种路由算法通称为离线路由算法,并且将使用[Markus]中的算法作为这一类算法的代表进行分析。离线路由算法根据卫星运动的周期性和可预知性,将卫星的运行周期离散化为若干个时间片。在每一个时间片内认为星位图不变化。针对这些已知的、不变的星位图,根据某种最优化标准,分别计算各个时间片的最佳路由。考虑到随着卫星的运动,地面设备和卫星之间,卫星与卫星之间不可避免地要进行连接切换

(handover),而这些连接切换将导致系统开销和时延抖动的增加。为了减少切换的频率,有的离线路由算法还从全局的角度对各个时间片中的最佳路由选择进行了优化。最后,离线路由算法在时间片切换时将相应的最佳路由由应用到各个时间片中。

由于离线路由算法中所有的路由计算都是在离线的状态下,根据卫星运行的规律提前计算出来的,因此不可避免地存在以下两个方面的问题:1)不能根据当前网络中承载业务的统计特性而动态调整路由方案,也就不能实现全网资源的最佳分配;2)网络的抗毁性不好,当星座中部分星间链路失效时,系统性能将显著下降,进而导致大量已经存在的连接中断。但是如果采用完全动态的路由算法,比如Ad hoc网络中的路由算法,就忽略了卫星运行的规律性和可预知性,导致选路开销剧增。本文正是针对离线路由算法和完全动态路由算法存在的上述两方面问题,提出了一种既利用卫星运行的周期性和可预知性减少寻路的系统开销,又不完全依赖于这种卫星运行规律的抗毁动态路由算法。

本文第2节是对抗毁动态路由算法的详细描述;第3节给出了离线路由算法和抗毁动态路由算法在Iridium系统模型^[6,7]中的仿真结果,并进行了分析;最后总结全文。

2 抗毁动态路由算法

抗毁动态路由算法试图通过两个步骤解决离线路由算法中的问题:首先,高效地在卫星间传递链路状态信息;然后,利

^{*} 基金项目:国家高技术研究发展计划项目(2002AA784030)。李冬妮 博士研究生;王光兴 教授,博士生导师。

用链路状态信息和可以预知的卫星运动规律计算最佳路由。相应地,抗毁动态路由算法也可以分成两个部分:基于簇的星间链路状态信息传递子算法和边界卫星源路由子算法。本文将 Iridium 系统模型为例展开对算法的描述。

2.1 基于簇的星间链路状态信息传递子算法

为了能够发现星间链路的故障,并自动绕开这些故障链路以获取卫星网络路由的抗毁性,卫星必须对星间链路状态进行检测,并传递这些链路状态信息。但是如果将固定网中类似于 OSPF 这样的链路状态协议直接移植到卫星网中是不恰当的。这主要是因为在该类算法中,节点在全网范围广播链路状态信息,系统开销大,可拓性差(当系统中节点数量增多时,通信开销将急剧增加)。另外又因为卫星网中链路带宽、计算

能力、节点电能都是十分有限的,所以必须采用一种全新的链路状态传递机制。

基于簇的星间链路状态信息传递子算法正是针对卫星网络的特点提出的。它的主要思想是:按照空间位置将所有卫星划分成多个簇,并在每个簇内选定一颗卫星作为簇首。卫星首先在簇内广播链路状态信息,然后在簇首的控制下将本簇的星间链路状态信息传遍全网。

2.1.1 快速成簇方案和簇内链路状态信息传递策略

簇的划分和簇首的选择是以卫星的相对位置为依据的,位置较为接近的一组卫星被划分到一个簇中,居于簇中心位置的卫星将优先被选择为簇首。根据卫星运行的规律,簇的划分可以离线进行。本文中采用的簇划分方法如图1所示。

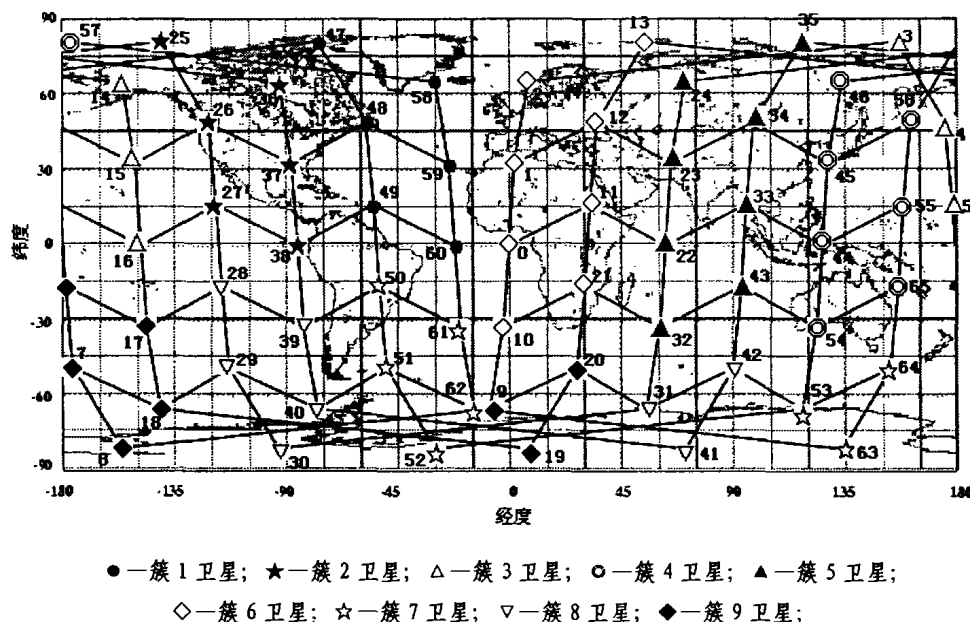


图1 快速成簇方案示意图

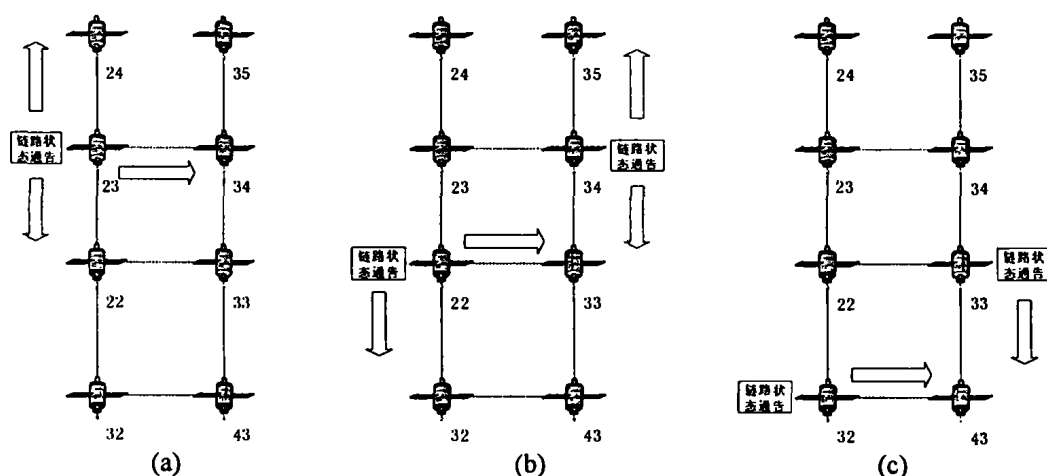


图2 簇内链路状态信息传递示意图

在图1中,每个簇由处于相邻两个轨道平面的6到8颗卫星组成。

定义1 连接簇内两颗卫星的星间链路(包括同一轨道平面内的星间链路和相邻轨道间的星间链路)为簇内链路。

定义2 连接簇内卫星和簇外卫星的星间链路(包括同一轨道平面内的星间链路和相邻轨道间的星间链路)为簇间链路。

为了获取簇内所有星间链路的状态信息,卫星通过簇内

链路在本簇内广播与之直接相连的星间链路的状态信息。下面以图1中的簇5为例详细描述这一过程。

图2描述了卫星23通告其链路状态给簇内其他卫星的过程。由于卫星24和卫星35运行到了北极附近(见图1),因此它们之间的星间链路被暂时关闭。23的卫星链路状态通告报文包含23-34、23-24、23-22和23到相邻第6簇卫星12的共4条链路状态信息。图2.a中卫星23首先将链路状态通告报文通过簇内链路传递给同簇内相邻的卫星24、22和34。然后22、34收到

的这个链路状态通告报文通过簇内链路转发给32、33、35(见图2. b),并通过32、33最终转发给43(见图2. c)。其他卫星也通过与23相同的方式,周期性地将与之直接相连的链路状态传递给簇内的其他卫星。

定义3 卫星周期性地将与之直接相连的链路状态广播到簇内其他卫星,这个时间周期为簇周期,记作 T_c 。

按图1中这种方式,选择相邻轨道的6到8颗位置邻接的卫星组成一个簇,可以为链路状态通告报文的传输提供冗余链路。当部分簇内链路出现故障时,卫星可以通过冗余的簇内链路传递链路状态通告报文。

根据对 Iridium 系统中卫星运行的规律可知簇内卫星的相对位置不会发生很大的变化,这样可以通过离线的方式,预先选择簇内较为接近簇中心位置的卫星作为该簇的簇首。簇首主要负责管理簇间链路状态信息的传递。

2.1.2 簇间链路状态信息传递策略 每一颗卫星都根据收到的链路状态通告报文更新其链路状态信息表。当卫星通过簇内链路将链路状态通告报文广播到同簇中的所有其他卫星上时,卫星就可以获知本簇内的全部簇内链路和所有与本簇卫星相连的簇间链路状态信息。

为了使卫星能够获知全网所有链路的状态信息,必须将簇内链路状态传递到簇外。通常一个簇与其相邻的簇之间存在多条簇间链路,如图3所示。

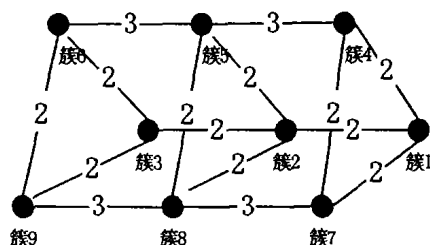


图3 簇间连接示意图

图3是根据图1的瞬间拓扑生成的。图3中的点表示簇,边上的权值表示连接两个簇的簇间链路数。例如连接簇6和簇5的边的权值为3,表示这两个簇通过3条簇间链路相连。为了获得系统中所有链路的状态信息,卫星必须将本簇的链路状态信息通过这些簇间链路传递到相邻的簇中。为了减少链路状态报文的传递对系统带宽的占用,同时又不削弱系统的抗毁能力,簇间链路状态信息的传递是在簇首的集中控制下完成的。下面以簇5为例说明簇首对簇间链路状态信息传递的控制。

如图4所示,簇5和簇6之间存在23-12、22-11、32-21共3条簇间链路互联。完成簇内链路状态信息的广播后,簇5中每一颗卫星都已经保存了当前所有簇内链路和该簇所有的簇间链路的状态信息。因此簇5中所有卫星都有能力将本簇的簇内链路和簇间链路状态信息打包成簇链路状态通告报文发送到相邻的簇中。显然从图4可以看出,簇5中由卫星23、22、32发送簇链路状态通告报文到簇6只需1跳,开销最小。但是如果由这3颗卫星同时向邻接的簇发送簇链路状态通告报文,开销太大,没有必要。簇5的簇首卫星23将根据三条簇间链路的状态,选择最优的一条簇间链路(例如链路32-21)发送这一簇链路状态通告报文。簇间链路选定以后,簇首将向相应的卫星32发送一个传递簇链路状态通告报文的命令。收到命令后卫星32将向命令指定的链路32-21上发送簇链路状态通告报文。卫星21收到簇5传来的簇链路状态通告报文后将马上对这个报文进

行簇内广播。当簇6的簇首卫星11收到簇5的簇链路状态通告报文后,它马上可以判断这个报文需要向簇3和簇9转发。在图4中可以看到,簇6与簇3和簇9分别有2条簇间链路相连。同样,卫星11也负责为簇3和簇9各选择一条簇间链路将簇5的簇链路状态通告报文转发出去。通过这样的机制,在各个簇首的控制下每一个簇的簇链路状态通告报文每隔一个簇周期向外发送一次,并通过中间簇的中转传遍整个网络中的所有卫星,从而使卫星获得整个网络的链路状态。

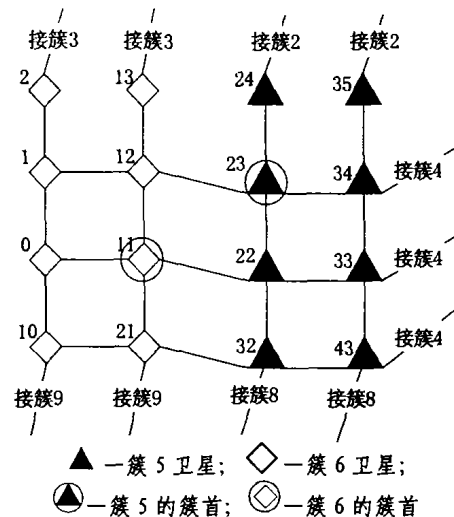


图4 簇5与簇6的连接

2.1.3 故障时的簇重组策略 为了提高系统的抗毁性,下面将专门讨论出现故障时的簇重组策略。故障可以分为星间链路的故障和簇首故障两种。

为了在簇首出现故障时,系统仍然可以正常运行,本文提出了一种簇首自动生成算法。对于簇中的任意一颗卫星 i 规定一个簇内唯一的簇首优先级(CHPi),算法使得 CHP 值最大的卫星成为本簇的簇首。这种优先级的设置可以离线完成,通常设置位于簇中心位置的卫星具有较高的 CHP 值,以使其优先成为簇首。这样设计是因为簇首位于簇中心位置发送各种信令到其他卫星跳数较少、时延短,而且处于中心位置的卫星通常有更多的簇内链路与其他卫星相连,这样当部分簇内链路故障时将提供备份链路。另外规定当卫星向同簇的其他卫星周期性地广播其直接相连的链路状态信息时,在卫星链路状态通告报文中加一个候选簇首标识(CHC),所有设定 $CHC=1$ 的卫星被认为是竞选簇首的候选人。同样卫星也可以通过设置其 $CHC=0$ 使其不参加簇首的竞选。图5描述了这种簇首自动生成算法。

从图5可以看出,卫星会定期地收到从同簇其他卫星发送来的卫星链路状态通告报文,通过这些报文,卫星可以检查是否存在有比自己 CHP 值更高的候选簇首卫星。如果持续超过 $2T_c$ 时间没有发现 CHP 高于自己的候选簇首,而本卫星又不是当前簇首,那么该卫星认为当前簇首出现故障或不可达,于是该卫星马上充任簇首,负责簇间链路状态信息的转发控制。另一方面,如果本卫星是簇首,而在检测中又发现存在 CHP 高于自己的候选簇首卫星,该卫星立刻停止簇首功能,以保证本簇内簇首的唯一性。除以上两种情况外,卫星维持原有状态。

系统中除了簇首故障外还可能出现星间链路的故障。链路的故障对簇的影响可以分为两类。第一类:部分链路故障后原簇仍然是连通的;第二类:由于部分链路的故障导致原簇被

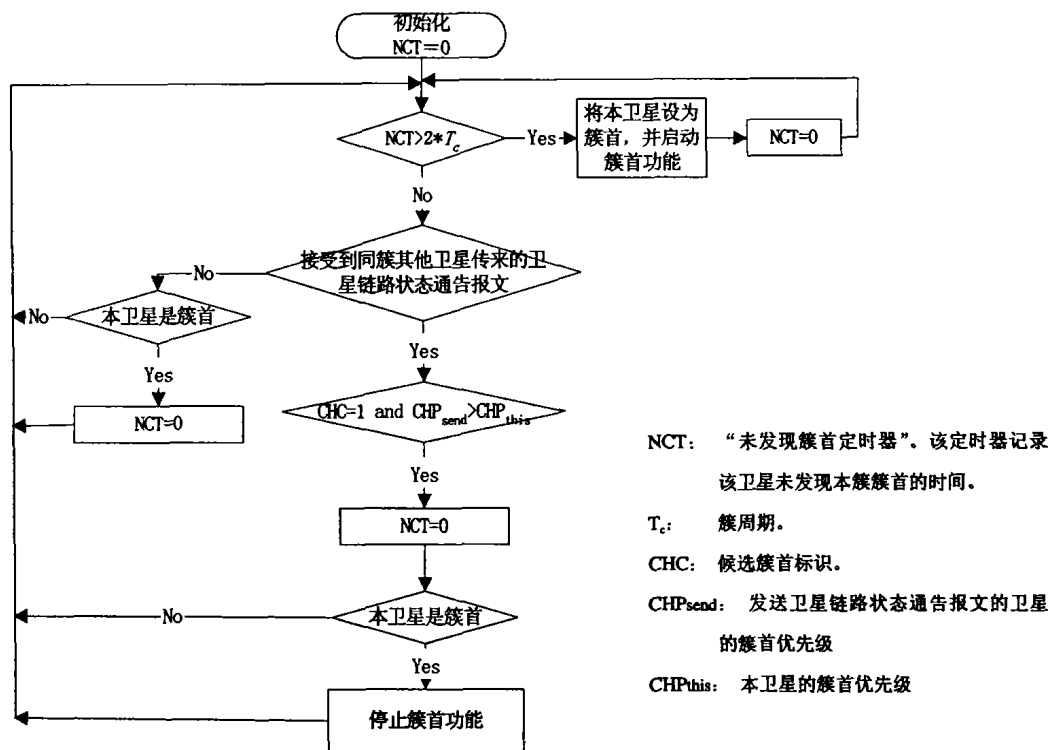


图5 簇首自动生成算法

分割成了两个或更多个互不连通的部分。图6以簇5为例描述了上述两种情况。在图6. a 中虽然出现两条簇内链路故障,但是簇内所有卫星通过剩下的簇内链路依然可以成为一个连通图;但是图6. b 中,两条故障的簇内链路将簇内卫星分割成了无法通过原簇内链路互通的两个部分。对于图6. a 中的情形,通过簇内的广播,所有卫星的卫星链路状态通告报文和簇首的控制命令仍然可以到达其他同簇卫星,对算法没有影响。但是,图6. b 中的情况使得原簇5分成两个部分。上半部分包含

簇首,仍然可以控制簇的上半部分与相邻簇交换簇链路状态信息。而下半部由于簇首原不可达,应用上述的簇首自动生成算法将自动选举出另外一个簇首。这样原簇5就自动分裂成了独立自主的两个子簇,如图6. c 所示,而且这两个子簇通过相邻簇的中转依然可以获得对方的链路状态信息。另一方面,当故障链路修复时,例如链路23-22修复,随着子簇的连通,应用簇首自动生成算法,下半部的子簇簇首将停止簇首功能,于是子簇又自动地合并了。

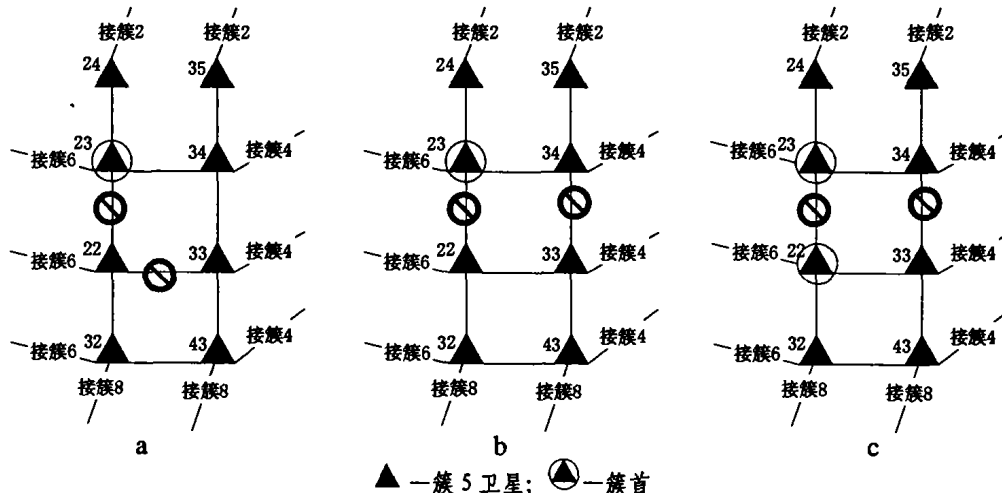


图6 部分链路故障对簇的影响

2.2 边界卫星源路由子算法

通过基于簇的星间链路状态信息传递子算法每一颗卫星都可以获知卫星网中所有的链路状态信息,为绕开出现故障或者负担过重的星间链路提供了依据。但是,如果仅仅把链路状态作为依据,直接使用类似 Dijkstra 算法的方法寻找最佳路由却是不合适的。这是因为,由于卫星的运动,为了保证连接的持续,必须在卫星之间、卫星和地面站/地面终端之间进行连接的切换。而切换则必然会导致以下三个方面的问题^[1]:

1. 连接的路由切换会造成这个连接途经的所有卫星负载

的突变。尤其当这种负载的突变使得某一颗卫星上的负载超过一定的门限值时,那么这个连接的 QoS 会显著下降。

2. 另外连接的路由切换会造成它相应的端到端的传输时延发生突变,因为这个新的连接可能走了一条与原先连接不同的路径。

3. 连接路由的切换还会导致流量控制问题的复杂化。

为了尽量地减少连接的切换,必须把一条路由可以持续的时间作为路径好坏的一个衡量标准来综合考虑。显然,一条路径持续的时间越长就认为该路径越优。

Dijkstra 算法无法处理由于连接切换导致的开销,这是因为持续时间反映的是端到端的特性,而同一个星间链路可能同时承载多个端到端的业务,无法将端到端的特性体现到途经的链路状态中。为了解决这个问题,本文提出了边界卫星源路由算法。

该算法采用文[1]中的方法,根据卫星运行的规律,对于每一个离散的时间片可以离线计算出每一颗卫星到其他所有卫星的最佳路由集合。

定义4 源卫星 S 到目的卫星 D 的一个离线最佳路由集合为 $R_D^S, R_D^S = \{r_1, r_2, r_3, \dots\}$, R_D^S 是一个有限集,其中 $r_1, r_2, r_3, \dots$ 分别表示从卫星 S 到卫星 D 的最佳路由、次佳路由、第三佳路由,而且 R_D^S 中的任意两个不同路由所经由的链路不完全相同。

需要说明的是这里的最佳路由计算规则综合考虑了根据卫星运行的规律可以离线计算的路由时间延迟、路由持续时间等因素,但是没有考虑星间链路的负载和故障问题。

定义5 与离线最佳路由集合 R_D^S 相对应的路由优先集为 $P_D^S, P_D^S = \{p_1, p_2, p_3, \dots\}$,其中 p_i 表示 r_i 在路由选择时的优先级,而且满足 $p_1 \geq p_2 \geq p_3 \dots$ 。

通过2.1节中的方法可以实时地获知卫星网络中所有星间链路的链路开销,从而也就可以计算出任意选定路由的链路开销总和。

定义6 离线最佳路由集合 R_D^S 的总链路开销集为 $C_D^S = \{c_1, c_2, c_3, \dots\}$,其中 c_i 表示 r_i 途经的所有链路的链路开销总和。

定义7 若源卫星 S 和目的卫星 D 离线最佳路由集为 R_D^S ,路由优先集为 P_D^S ,总链路开销集为 C_D^S ,那么 S 到 D 的路由开销集为 $M_D^S, M_D^S = \{m_1, m_2, m_3, \dots\}$,其中 $m_i = c_i / p_i$ 。

边界源路由算法的算法描述如下。

对于卫星网络中的任意一颗卫星 S 进行以下操作:

1. 在离线的方式下预先计算出卫星 S 到其他任意一颗卫星 D 的离线最佳路由集合 R_D^S ,并定义与之相对应的路由优先集 P_D^S 。
2. 通过基于簇的星间链路状态信息传递子算法使每一颗卫星获得当前网络中所有星间链路的链路状态,并据此计算出所有星间链路的链路开销。
3. 当有数据需要从卫星 S 发送到卫星 D 时,对于 R_D^S 根据当前的网络的链路开销计算相应的路由开销集 M_D^S 。
4. 若 $m_i \in M_D^S$ 且 $m_i = \min_{m_j \in M_D^S} \{m_j\}$,则选择 R_D^S 中的路由 r_i 作为源路由向 D 发送数据。

3 算法的性能分析

利用 Iridium 系统的系统模型,对本文中的抗毁动态路由协议进行了仿真,并且将其与文[1]中的离线路由算法进行了性能比较。

仿真采用 Iridium 系统的卫星网拓扑结构,并采用如图1所示的簇划分方式。设定星间链路 ISL 的带宽为10Mbps,链路传输延时为10ms。各卫星以 CBR (Const Bit Rate) 的方式发送数据,数据包大小为200byte,发包时间间隔为100ms。信令包大小统一设置为200byte。

图7描述了分别采用离线路由和动态抗毁路由,从卫星22到其他所有卫星路由的链路开销。从图7可以发现,由于离线路由算法没有考虑到星间链路上的实时流量,因此其所选路

径的链路开销大于动态抗毁路由。

图8描述了部分星间链路故障时,离线路由和动态抗毁路由的链路开销。仿真中设定28-39,38-49,33-44三条星间链路故障。当星间链路故障时,链路的开销被设置为无穷大。从图8中可以看到,由于离线路由算法无法发现链路的故障,将导致从卫星22到卫星44、53、54、55、63、64、65的7条路径出现连接中断。与之相比,抗毁动态路由则通过对当前链路状态的探知,可以成功地绕开出现故障的链路。在部分链路故障时,抗毁动态路由的性能要明显优于离线路由。

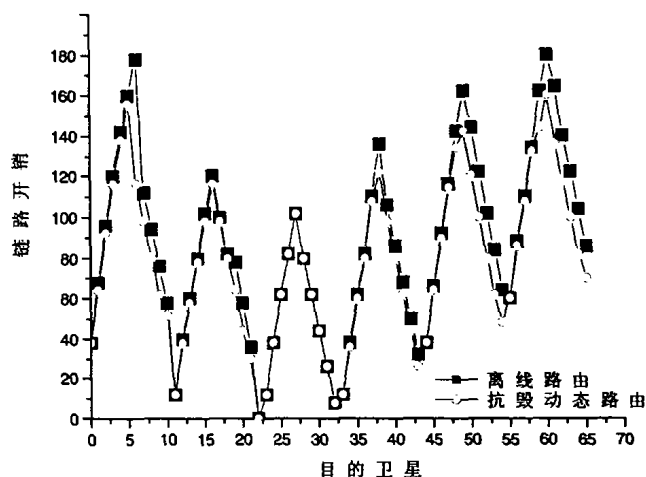


图7 链路无故障时抗毁动态路由与离线路由的链路开销比较

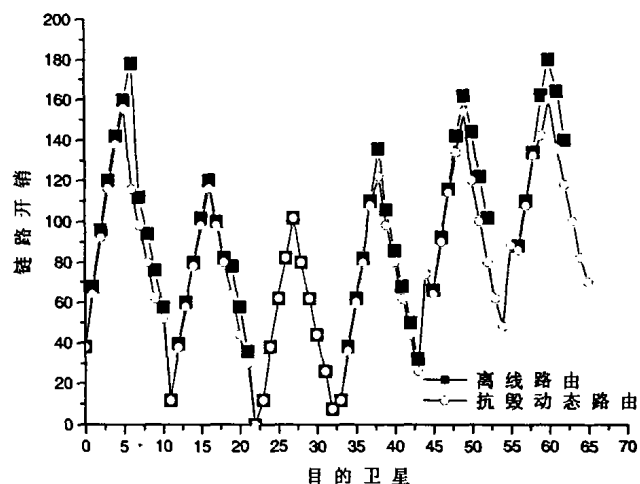


图8 部分链路故障时抗毁动态路由与离线路由的链路开销比较

结论 本文对当前卫星网中常见的离线路由算法进行了分析,指出了该类算法由于无法获知当前网络中星间链路的状态,因此无法根据当前网络流量的分布优化路由,也无法在选路时绕开出现故障的链路。针对离线路由算法的这些弱点,本文提出了一种抗毁动态路由算法。这种算法将卫星网络分成若干个可以动态重组的簇,限制了广播路由信息时占用的系统带宽;同时又采用边界卫星源路由算法对路由切换带来的负面影响进行了优化。最后,以 Iridium 系统为模型,对离线路由和抗毁动态路由进行了仿真。从仿真结果看来,抗毁动态路由算法具有比离线路由算法更好的性能,尤其是当部分星间链路故障时,这种优势更加明显。由于抗毁动态路由需要在网络中传递链路状态信息,这将造成部分额外的系统开销,当网络负载较重时,可以考虑仅在链路状态信息中包含链

时空推理前沿研究综述^{*}

王生生 刘大有

(吉林大学计算机科学与技术学院 符号计算与知识工程教育部重点实验室 长春130012)

摘要 本文对时空推理及应用中若干前沿研究方向进行了综述和分析。概括了时空推理的概念和主要研究方向,总结了近10年来时空推理中时空代数、时空信息综合、时空粒度等理论方向及地理信息系统和时空数据库等应用方向的研究工作,分析了存在的问题并指出了发展趋势。

关键词 时空推理,时空代数,时空数据库,GIS

Overview of Advanced Spatio-Temporal Reasoning Researches

WANG Sheng-Sheng LIU Da-You

(College of computer science and technology, Key laboratory of symbolic computing and knowledge engineering of ministry of education, Jilin University, Changchun 130012)

Abstract The advanced spatio-temporal reasoning researches are analysed and summarized. The major research aspects and basic conceptions are discussed. The theoretical works such as spatio-temporal algebra, integrating spatio-temporal information, spatio-temporal granularity et al. and the applied works such as Geographical Information System and spatio-temporal database are briefly introduced. The flaws of those work are pointed out. Finally the emerging trend is indicated.

Keywords Spatio-temporal reasoning, Spatio-temporal algebra, Spatio-temporal database, Geographical information system

1 引言

近年来,时空推理已成为十分活跃的研究领域,在规划、地理信息系统(GIS)、自治机器人高级导航、自然语言理解等方面都有着广泛的应用。时空推理涵盖了时空表示和建模等研究内容。时空推理由时态推理和空间推理发展而来。时态推理研究起源于20世纪50年代末,一直到现在从未间断过。从上世纪90年代初开始,空间推理已成为AI的主要研究方向之一。Lee和Cohn等都指出,尽管空间推理的概念被广泛使用,但很难对它给出广泛认同的定义。1991年,Egenhofer^[1]指出空间推理是关于空间内的点和点集的推理。1997年,Takashi Matsuyama和Toshikazu Wada^[2]指出空间推理是利用空间信息进行的推理,是图像理解和计算机视觉系统的一个重要功能。2000年,NCGIA指出空间推理是涉及空间对象位置的

推理,在GIS和机器人技术领域非常重要,并且已经被用于图像处理系统。本文针对几个热点研究方向,概括总结了10年来时空推理的部分前沿研究工作。

2 时空代数

逻辑方法和代数方法是主要的形式化知识表示方法,它们也是时空推理的主要方法。代数方法因为其理论体系严谨、运算和操作方便等在表示方面的优势,以及便于进行复合运算等推理方面的优点,而被众多的应用系统(如关系数据库管理系统)广泛使用。本节主要介绍时空代数方面的研究工作。

时空代数的代表性工作是Allen的时间区间代数^[3]及其衍生理论(如Ladkin代数),其公理系统、复合表、推理、计算复杂性及应用等方面的研究都比较完善。此外,1991年McKenzie^[4],1996年Dey^[5],2003年Wijsen^[6]等分别提出了面

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(No. 60373098);国家高技术研究发展计划项目(2003AA118020);吉林省自然科学基金项目(20030523);吉林大学创新基金项目(2002CX028)。王生生 讲师,博士,研究方向为定性空间推理,GIS。刘大有 教授,博士生导师,研究方向为知识工程和空间推理等。

路的可用性信息,减小开销。

参考文献

- 1 Werner M, et al. ATM-Based Routing in LEO/MEO Satellite Networks with Intersatellite Links. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1997, 15(1)
- 2 Werner M. A Dynamic Routing Concept for ATM-Based Satellite Personal Communication Networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1997, 15(8)
- 3 Sturza M A. Architecture of the TELEDISIC satellite system. In: Proc. IMSC'95, Ottawa, Canada, June 1995. 212~218
- 4 Chang H S, et al. Topological Design and Routing for Low-Earth Orbit Satellite Networks. In: Proc. of IEEE GLOBECOM, 1995. 529~535
- 5 Gounder V V, Prakash R, Abu-Amara H. Routing in LEO-based satellite networks. In: Proc. of IEEE Emerging Technologies Symp. Wireless Communications and Systems, Apr. 1999
- 6 Hutcheson J, Laurin M. Network flexibility of the IRIDIUM global mobile satellite system. In: Proc. 4th IMSC, Ottawa, Canada, June 1995. 503~507
- 7 Pratt S R, et al. An Operational and Performance Overview of the IRIDIUM Low Earth Orbit Satellite System. IEEE Communications Surveys, 1999, 1(3): 2~10