

# 基于移动 Agent 的双层卫星网动态路由算法

张 勇, 王汝传

(南京邮电大学 计算机学院, 江苏 南京 210003)

**摘 要:** 新一代 LEO/MEO 卫星体系结构成为当今卫星网通信研究的热点。结合移动 Agent 技术解决卫星网动态路由问题, 在 LEO/MEO 卫星网平台上构建了核心层功能, 并较好地处理了受复杂的星际链路切换影响的数据包转发。在 OPNET 仿真软件下模拟了卫星节点受算法工作的影响, 结果表明, 卫星处理数据包时延在理想性上处理能力和合理的链路容量条件下是可以接受的, 且数据包端到端时延是较小的。

**关键词:** 移动 Agent; LEO/MEO 卫星网; 动态路由算法

**中图分类号:** TP301.6

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-629X(2008)09-0026-04

## Dynamic Routing Algorithm for Satellite Network Based on Mobile Agent

ZHANG Yong, WANG Ru-chuan

(College of Computer, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** LEO/MEO satellite system structure has become the research focus of satellite communication nowadays. Solves the problem about dynamic satellite routing algorithm based on mobile agent. Build the core layer function on LEO/MEO satellite network platform, and better handle the packet switching affected by the complex ISLs Handoff. With the help of OPNET simulation tool, simulate the impact of mobile agent's work on satellite node. The experimental results show that satellite's packet processing delay can be acceptable in an ideal-board processing capability and reasonable ISLs' capacity, and packet's end-to-end delay is rather small.

**Key words:** mobile agent; LEO/MEO satellite network; dynamic routing algorithm

### 0 引 言

卫星网的研究是伴随着人类对外太空的不断探索而发展的, 文中主要探讨新一代卫星网络 (LEO/MEO) 中的路由算法问题。移动 Agent 是一独立可确认的计算机程序, 它可自主地在异构网络上按照一定的规程移动, 寻找合适的计算资源、信息资源和软件资源, 代表用户完成某个特定的任务。Agent 具有自治性、社会能力、主动性以及反映能力的特点。文中提出

的卫星网动态路由算法利用了移动 Agent 的上述特性, 采用类似地面的基于距离矢量的路由策略, 在卫星网上将一个区域的路由信息通过 Agent 迁移, 使其在同一个轨道平面内得到继承。由于算法对于卫星间的通信协作提出了较高的要求, 文中相应对卫星间链路失效和节点失效提出了解决方案<sup>[1,2]</sup>。

### 1 基于移动 Agent 的卫星网动态路由算法

动态路由算法采用距离矢量作为选路策略。任意选取一颗卫星网内的卫星, 称其为卫星 A。设定泛洪广播跳数  $N=2$ 。卫星 A 可将自己的链路状况发给所有与它相邻的 12 颗卫星 (四条星际链路), 同时相应地得到这 12 颗卫星的链路状况, 其中包含它们的邻居卫星, 数目就是 25 颗 (如图 1 所示)。因此, 在时间足够充分时, 卫星 A 的路由表中将有这 25 颗目的卫星所对应地面逻辑地址的路由记录<sup>[3]</sup>。

算法采用当今研究热点的 MEO/LEO 双层卫星体系结构, 借鉴了早期 Internet 网的核心路由器思想, 将 MEO 卫星看作整个卫星网的核心路由节点; 将

收稿日期: 2007-12-29

**基金项目:** 国家自然科学基金 (60573141, 60773041); 江苏省自然科学基金 (BK2005146); 江苏省高技术研究计划 (BG2004004, BG2005038, BG2006001); 国家高科技 863 项目 (2006AA01Z201); 南京市高科技项目 (2007 软资 106, 2007 软资 127); 现代通信国家重点实验室基金 (9140C1101010603); 江苏省计算机信息处理技术重点实验室基金 (kjs050001, kjs06006)

**作者简介:** 张 勇 (1982-), 男, 江苏南京人, 硕士研究生, 主要研究方向为信息安全技术; 王汝传, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为计算机软件、计算机网络和网格、信息安全、无线传感器网络、移动代理和虚拟现实技术等。

LEO 卫星作为主要的数据包转发节点,LEO 卫星执行文中提出的“基于移动 Agent 的动态路由算法”。当 LEO 卫星不存在目的节点地址的路由信息时,就将数据包发给与之相连的 MEO 通讯卫星,通过第二层卫星之间的转发到达目的节点。

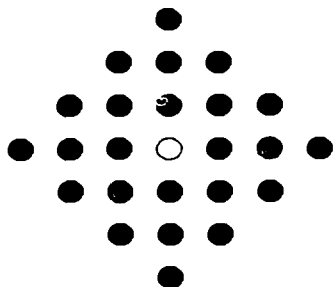
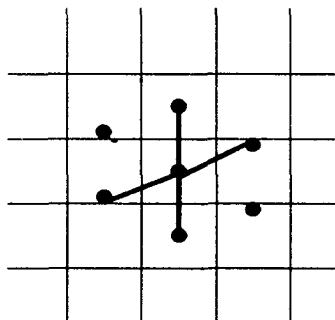


图1 泛洪跳数为2的距离矢量模型

### 1.1 动态路由算法描述(LEO 层卫星路由策略)

路由算法运行的前提条件是:卫星网采用 LEO/MEO 两层转发模型,存在星上处理能力,每颗 LEO 卫星最多有 2 条轨内星际链路和 4 条轨间星际链路(实际每次有 2 条空闲,如图 2 所示),且同一轨道上卫星运行周期一致。路由表中的路由信息采用地球表面的逻辑地址,即用经纬度表示区域中心的地址表示法。每当一颗卫星离开原来区域并进入新区域时,理论上首先要得到新区域的地面逻辑地址,然后获得相关的链路状态并重新进行路由计算。地面逻辑地址可以通过移动 Agent 获得,同时也可以与地面交互判断得到。



注:实线表示正在使用;虚线表示不再使用

图2 卫星链路模型

动态路由算法描述如下,以卫星 A 为研究对象:

- \* 卫星 A 检查六个相连的 ISL 链路状态(发送请求);根据 ISL 链路响应情况,修改本路由表信息。

- \* 在链路查询之后,生成路由更新信息包,并发送四个与卫星 A 有相连 ISL 的卫星(图 2 实线表示的链路)。

- \* 卫星 A 等待接收其他卫星上发来的路由更新信息包,计算并修改路由表;然后处理该路由信息包。

动态路由算法利用链路查询包,携带本卫星的地面逻辑地址,进行链路请求和应答,并可判断该链路是

否是要被使用(如果该轨间链路连接地面相邻两区域的卫星,则是可用的;否则将弃用该条链路)。

### 1.2 MEO 层卫星路由策略

在文中所采用的 MEO/LEO 两层卫星体系结构中,MEO 层卫星是起核心路由器功能的。为了满足核心路由器的功能需求,必须执行以下的 MEO 层卫星路由策略:MEO 卫星会主动要求获得与之相连的 LEO 层卫星的地面逻辑地址,并将其作为自己的路由信息的一部分发给邻居 MEO 卫星;MEO 层卫星上不存在缺省的路由项,每个 MEO 卫星上的路由信息都是完整的和连贯的;如果目的节点地址不在 MEO 层卫星的路由表中,MEO 卫星就会丢弃该数据包。

### 1.3 移动 Agent 的功能与工作流程

在“基于移动 Agent 的卫星网动态路由算法”中,由于卫星相对于地面做高速的运动,导致整个网络拓扑一直在动态变化,而采用移动 Agent 就可以解决由于卫星移动带来的路由信息失效现象。移动 Agent 的工作流程如下:当卫星离开某个以  $(X_i, Y_i)$  为中心的区域之前,生成移动 Agent。它可以接收相连 ISL 卫星节点的链路询问;接收来自其他卫星的路由更新信息包;并在迁移之前将本卫星上的路由表信息复制到自己的数据存储区内。然后,该移动 Agent 将上述信息带到下一颗假定进入该区域的同轨道卫星上。在迁移结束后,在下一颗卫星上,如果移动 Agent 存在链路询问信息,产生应答给询问节点;同时由移动 Agent 所携带的路由表信息在新的环境中创建路由表;对移动 Agent 中携带的路由更新信息包进行处理,更新本环境下的路由表项(对于泛洪广播跳数  $N = 2$ ,如果跳数为 1 就继续生成路由更新信息包并发送;如果为 0 就在更新后丢弃该路由更新信息包),如果是性质为不可达的路由信息包,就对路由表项进行修改<sup>[4]</sup>。

### 1.4 卫星上路由信息的表示

对于每一颗卫星网内的卫星来说,工作都是围绕着两张表结构来进行的:路由转发表和本地接口表。路由转发表是记录卫星网内部的网络层信息的,它可以放在移动 Agent 中从一颗卫星携带到另一颗卫星上;但对于本地接口操作表来说,它只是记录了数据链路层方面的信息,它跟本地卫星是紧密相关的。

#### 1.4.1 本地接口表的操作

本地接口表的作用是根据路由转发表的下一个节点地址,在本卫星上选择对数据包进行处理的物理接口。根据需求,该本地接口表分为三部分:下一个节点地址、本地接口号和接口状态。下一个节点地址是地面的逻辑地址(由覆盖的中心区域经纬度表示)。本地接口号是实际卫星上的物理接口编号。接口状态根据

需要,分为三种情况:连接状态,表示可通过该接口进行数据包的发送;非连接状态,表示该接口与相邻区域卫星之间的链路是阻塞的,该状态不会持续很长的时间;缺省 MEO 状态,表示该接口与相邻区域卫星之间的链路是不通的,要从该接口发出的数据包必须通过与本地卫星相连的 MEO 卫星转发。

接口表内容的修改是链路询问处理过程的一个部分。该过程发出 ISL 询问包,置所有接口状态值等于非连接状态;当时间小于卫星转换时间且收到相应链路应答包,就将接口表对应项状态置为连接状态;如果时间超过了卫星转换时间,就将所有非连接状态项的状态置为缺省 MEO 状态。

#### 1.4.2 路由转发表的操作

算法将数据包转发经过一个卫星节点记为增加一跳。路由表中包含四项内容:目的节点地址、跳数、下一个节点地址和路由项状态。目的节点地址和下一个节点地址都是地面的逻辑地址,表示数据包要到达的地面地理位置和本卫星将要把它发送到的地理位置。跳数是指到达目的地址要经过的卫星个数。路由项状态分为以下几种:缺省 MEO 状态,或者认为跳数为 $\infty$ ,表示该目的节点数据包转发到相连 MEO 卫星上;丢弃状态,表示将该目的节点数据包丢弃;可用状态,表示该路由项是可以被本地卫星利用的。

路由转发表的修改有两种情况:①在链路询问过程中修改;②在接收到其他卫星发来的路由更新信息包后修改。在第二种情况下,如果存在跳数小于本路由表对应项的,本路由表对应项的信息就要被更新;如果是新获得的一条路由信息,就必须在路由转发表中增加一条内容。

路由更新信息包是卫星节点进行路由算法过程中,根据自己得到的链路信息生成的,可以是有关链路的可达信息,也可以是有关链路的不可达信息。通常在发生链路失效或是卫星节点失效时,会产生链路不可达的路由更新信息包。当相关卫星节点收到不可达的更新信息包后,就检查各自路由表并做适当修改,使其符合当前网络的运行状态。

卫星路由模块转发数据包通常按以下过程进行:对数据包的处理是先经过路由转发表,选出下一个节点地址信息,再在本地接口表中选择发送的物理接口,然后将数据包发送到对应的接口队列上。

#### 1.4.3 路由信息的有效期限分析

LEO 卫星由于其轨道半径较静止地球卫星低,一般为几千公里,其在一个地球自转周期(24 小时)内完成 15~10 次的绕地运动。同时,本算法中路由节点地址都是以地面逻辑地址为参照的,且由于地球的自转

缘故,一个区域在一段时间后,所能看到的 LEO 卫星会处在不同轨道上。因为移动 Agent 只能在本轨道平面内移动,因此其代表的该区域路由信息会因为覆盖地区的卫星轨道变化而失效,在这里就认为路由信息的有效期为同一轨道卫星在一个区域上的覆盖时间。这个有效期的长短取决于:LEO 卫星的覆盖半径、地球表面不同地区的切向速度(赤道地区速度快,而越靠近南北极,速度越慢)。在“基于移动 Agent 的卫星网动态路由算法”中,考虑了路由信息的有效期这个问题,当发生路由信息有效期满的情况时,就将轨道内各个卫星上的路由信息废弃,重新获得新覆盖区域的逻辑地址,并用来计算路由信息。

## 2 算法失效性分析

在上面描述的卫星网动态路由算法中,星际链路不光传输着数据包,同时还要传输移动 Agent。因此,星际链路失效和卫星节点失效,都有可能对算法的完整性和准确性产生影响。

### 2.1 链路失效的影响与措施

(1) 链路失效发生在卫星网的不同轨道之间。

卫星不同轨道间链路产生失效,影响了失效轨道上相邻数据包的转发,造成数据包丢失情况。文中提出的解决原则是尽量早地将链路失效的情况反映在接口表或是在路由表中,以便使要转发的数据包通过其他途径到达目的节点。措施是 LEO 卫星发生区域转移时,必须通知链路另一端的卫星,希望其在一个卫星转换时间内重新进行链路询问,并进行路由更新操作。

(2) 链路失效发生在卫星网的同一轨道之间。

卫星同一轨道间链路产生失效,一方面影响同一轨道内相邻数据包转发,产生丢包现象;另一方面影响移动 Agent 的迁移,造成路由信息的丢失。由于同一轨道内的星际链路是不存在切换情况的,因此发生链路失效情况是可以通过链路询问及时发现的,避免了转发数据包的丢失。对于路由信息的丢失则是不可避免的,文中提出的解决原则是当出现无法从失效的链路上获得移动 Agent 时,该卫星节点会主动要求获取相邻卫星节点的链路信息,形成新的路由信息并以此转发数据包。

### 2.2 节点失效的影响与措施

由于多种因素的影响,卫星节点存在失效的现象,这不但带来其链路的失效,而且带来某个地面目的区域的不可达。文中提出的解决原则是针对失效卫星的相邻节点给出的。对于数据包的转发情况,相邻卫星节点都可以从路由算法的链路询问过程中了解失效状况,并相应改变路由表和接口表。对于移动 Agent 的

情况,措施还是先进行判断,如果发现无法获得移动 Agent,相邻卫星节点会主动要求获取其他卫星节点的链路信息。当然,发生节点失效必然会带来某个区域的不可达,这比链路失效所带来的影响更加严重。常常节点失效需要地面的协助判断,或采取某种措施使其退出整个卫星网络的运作。

### 3 算法性能分析

#### 3.1 基于仿真软件的性能分析

对文中提出的“基于移动 Agent 的卫星网动态路由算法”所进行的性能分析,主要是在无失效环境下,研究算法本身的一些性能参数,以及判断影响数据包传输时延的各种因素。分析平台采用 OPNET 仿真软件<sup>[5]</sup>,设计了采用本路由算法卫星节点的内部处理流程,增加了卫星区域转换所对应的状态(move\_start 和 move\_end)。move\_start 状态设置了卫星区域转换过程的准备工作,move\_end 状态设置了卫星区域转换结束后的工作。模拟过程假定卫星只能在 move\_end 状态后开始正常的数据包转发工作,在 move\_start 状态开始后就不能进行转发工作了,而要进行必要的路由算法流程,对发送的数据包进行队列缓存<sup>[6]</sup>。

实验环境:一颗采用本算法流程的中心卫星,以及和它有星际链路的四颗 LEO 卫星。设区域转换过程所需要的时间是 30 秒,卫星运行周期是 115 分钟,平均 12 分钟有一次区域转换过程。

(1) 过程一:四颗相邻 LEO 卫星各产生 80Mb/s 的流量,连接卫星的星际链路采用 96Mb/s 的容量。中心模拟算法功能的卫星节点有 400Mb/s 的处理能力。其中心卫星节点的处理时延如图 3 所示。

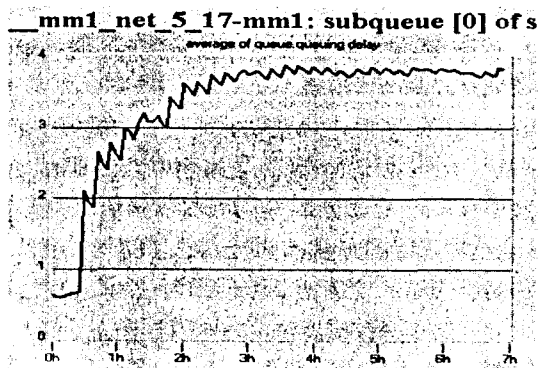


图 3 过程一处理时延

(2) 过程二:与过程一相似,只是改变了中心卫星节点的处理能力为 800Mb/s。其中心卫星节点的处理时延如图 4 所示。

从过程一和二可以看到,卫星本身处理数据包的能力(Service\_rate)是影响处理时延的主要因素。

(3) 过程三:与过程一相似,改变了中心卫星节点的处理能力为 800Mb/s,同时改变星际链路的容量为 1000Mb/s。其中心卫星节点的处理时延和数据包端到端时延如图 5、6 所示。

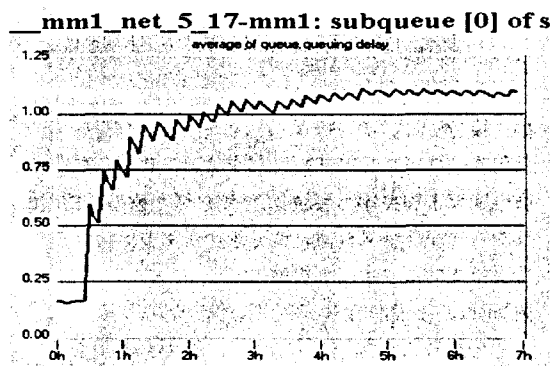


图 4 过程二处理时延

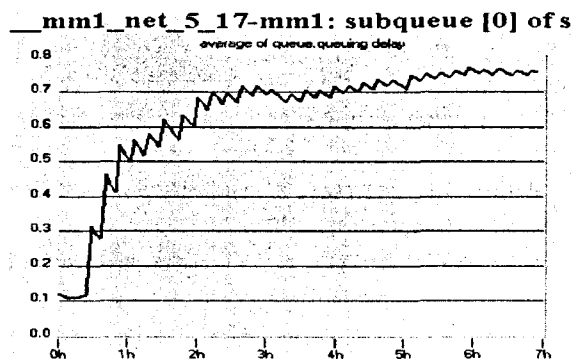


图 5 过程三处理时延

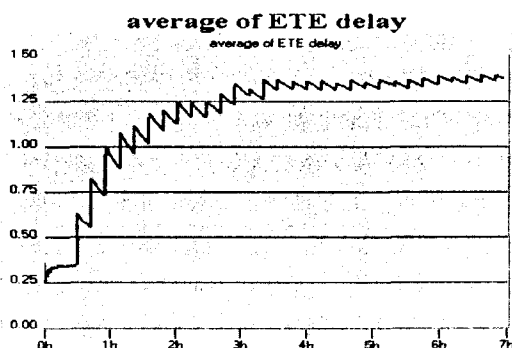


图 6 过程三端到端时延

从过程三和过程二比较看到,所采用的星际链路容量也是影响处理时延的另一个因素。在较理想的数据包工作环境下,数据包的端到端时延是容易接受的。

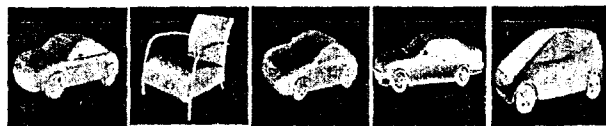
#### 3.2 算法性能的其他影响因素

通过定量分析,发现算法可以提前完成移动 Agent 的路由迁移过程,减少不必要的数据包延迟等待时间。分析了卫星转发数据包受不同轨道卫星区域转换的影响,得到以下结论:(设轨间链路一次受区域变

(下转第 33 页)



采用形状分布特征得到的检索结果



采用球面调和特征得到的检索结果



采用特征集成得到的检索结果

图5 检索最终结果

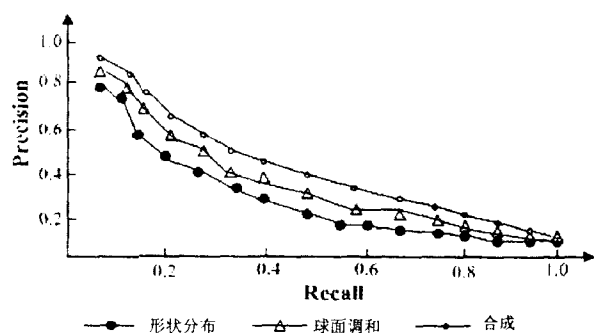


图6 检索性能比较

采用动态权值集成多种特征,建立模型的权值知识库,采用用户反馈的方法更新权值。实验表明文中方法具有较好的效果,能够较大提高系统检索的准确率。在今后的研究中,多特征集成方法仍将是研究的重点,如何将非形状描述的知识信息融入到检索系统中也将是一个需要解决的重点问题。

(上接第29页)

换数据包延迟时间为  $T_A$ ; 轨内链路一次受区域变换数据包延迟时间为  $T_B$ ; 数据包从源端到目的端所经过的路径中有  $N$  次轨内链路、 $M$  次轨间链路) 数据包可能的延迟时间  $T \leq M * T_A + T_B$ 。所以,在数据包转发有多条路径可供选择时,优先选择轨内链路发送,这样可以降低数据包的传输延迟。

#### 4 结束语

提出了一种基于移动 Agent 的卫星网动态路由算法。该算法考虑了 LEO/MEO 卫星网络的基本特性,以及卫星节点动态移动导致的链路切换等因素,采用了类似地面距离矢量的方法,以地面逻辑地址作为数据包的转发依据,并将移动 Agent 的自主性和移动性运用在路由信息的继承方面,可以说这是一个比较新

#### 参考文献:

- [1] Min P, Halderman J A, Kazhdan M, et al. Early Experiences with a 3D Model Search Engine[C] // In Proc. of Web 3D Symposium. Isenbourg, France: [s. n.], 2003: 7-18.
- [2] Bustos B, Keim D A, Saupe D, et al. Automatic Selection and Combination of Descriptors for Effective 3D Similarity Search[C] // IEEE International Workshop on Multimedia Content - based Analysis and Retrieval. Miami, Florida, USA: [s. n.], 2004: 514-521.
- [3] Kirtler J, Hatefm, Duin R P W. On combining classifiers[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligent, 1998, 20(3): 226-239.
- [4] 高波涌, 莫国良, 张三元. 基于混合形状特征的三维模型检索研究与实现[J]. 计算机应用研究, 2007, 24(4): 221-223.
- [5] 章志勇, 潘志庚, 李黎. 累进三维模型相似匹配算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 8(8): 1760-1765.
- [6] 郑伯川, 张征. 特征间互补性结合使用的 3D 模型检索技术[J]. 重庆邮电学院学报: 自然科学版, 2006, 18(1): 119-122.
- [7] Rui Y, Huang T S, Ortega M, et al. Relevance feedback: A power tool for interactive content - based image retrieval[J]. IEEE Transactions on Circuits and Video Technology, 1998, 8(5): 644-655.
- [8] Osada R, Funkhouser T, Chazelle B, et al. Shape distributions[J]. ACM Transaction on Graphics, 2002, 21(4): 807-832.
- [9] Kazhdan M, Funkhouser T, Rusinkiewicz S. Rotation invariant spherical harmonic representation of 3D shape descriptors [C] // Computer Graphics Proceeding, Annual Conference Series. Los Angeles: ACM SIGGRAPH, 2003: 56-164.

颖的卫星网路由算法。

#### 参考文献:

- [1] 王汝传, 李映, 徐小龙, 等. 基于移动代理的动态路由算法的研究[J]. 计算机学报, 2005, 28(3): 420-426.
- [2] Farserotu J, Prasad R. IP/ATM 移动卫星网络[M]. 谷深远, 黄国策译. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [3] 王晓梅, 胡鹏, 冉崇森. 宽带卫星网络路由交换问题的思考[J]. 无线通信技术, 2003(4): 53-59.
- [4] 王汝传, 徐小龙, 黄海平. 智能 Agent 及其在信息网络中的应用[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2006.
- [5] 孙屹, 孟晨. OPNET 通信仿真开发手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [6] OPNET Modeler Homepage[EB/OL]. 2005. <http://www.opnet.com>.