

# LEO 卫星网 QoS 遗传算法路由协议

张雪东<sup>1</sup>, 饶元<sup>2</sup>

ZHANG Xue-dong<sup>1</sup>, RAO Yuan<sup>2</sup>

1.安徽财经大学 信息工程学院,安徽 蚌埠 233041

2.南京邮电大学 计算机学院,南京 210003

1.School of Information Engineering, Anhui University of Finance & Economics, Bengbu, Anhui 233041, China

2.College of Computer, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

E-mail: zxd\_01@163.com

**ZHANG Xue-dong, RAO Yuan. QoS genetic algorithm routing protocol for LEO satellite networks. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(36): 105-107.**

**Abstract:** To satisfy the QoS requirements of multimedia applications, satellite routing protocols should consider the issue of improving the utilization of network resource and providing better QoS guarantees. This paper proposes a QoS routing protocol for LEO satellite networks using genetic algorithm. This protocol is called as Genetic Satellite Routing Protocol (GSRP). Some key factors including Fitness Function, Termination Function, Mutation probability and Routing Table are improved. Simulation results show that GSRP can achieve guaranteed end-to-end delay bound with less CBP and HBP, and is more effective than traditional algorithms for load balancing.

**Key words:** Quality of Service (QoS); routing protocol; genetic algorithm; satellite networks

**摘要:** 为了满足多媒体应用的 QoS 要求, 卫星路由协议应该更有效地利用网络资源, 提供更好的 QoS 保障。为此提出了一个基于遗传算法的 LEO 卫星网络 QoS 路由协议, 称为遗传卫星路由协议 (GSRP)。改进了新的操作函数, 如适应度函数、终止函数, 以及变异率和路由表。仿真结果表明, GSRP 能够实现较少 CBP 和 HBP 的可靠的点对点时延约束, 以及比传统的算法更有效的负载平衡。  
**关键词:** 服务质量; 路由协议; 遗传算法; 卫星网络

**DOI:** 10.3778/j.issn.1002-8331.2009.36.031 **文章编号:** 1002-8331(2009)36-0105-03 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP301

## 1 引言

卫星网络因为能够提供广泛的地域覆盖和一致的服务水平, 成为未来互联网的一个理想的组成部分。对于要求服务质量 (QoS) 保障的多媒体应用<sup>[1]</sup>, 部署低轨道 (Low Earth Orbit, LEO) 卫星相对于其他卫星网络, 具有更低的通信时延和传输损耗。随着互联网上多媒体应用的发展, LEO 卫星网络需要提供高质量的 QoS 保障, 这在卫星网络提供创新应用如 VoIP 和视频会议中, 是必不可缺的。

然而, 在 LEO 卫星网络中, 卫星的快速移动不仅造成网络空间拓扑的频繁变化, 而且使得地球服务区不断变化, 后者可能会导致地球终端和对应卫星的连接发生变化<sup>[2]</sup>。这两个因素都可能导致切换时延, 卫星网络中定义了两类切换, 一类是连接切换, 它是由终端用户和对应的卫星相对位移造成的, 这类切换无法避免。另一类是链路切换, 当卫星处于或接近一些特定的位置例如地球两极时, 由于某些星间链路 (Inter-Satellite Links, ISLs) 的断开而产生, 这类切换通过一个合适的路由策略某种程度上是可以避免的<sup>[3]</sup>。显然, 一个切换事件会导致受影响

星间链路资源的重新分配。在 LEO 卫星网络中, 通常使用三个 QoS 因素来衡量网络性能: 点对点时延、新呼叫拥塞概率 (new Call Blocking Probability, CBP) 和切换呼叫拥塞概率 (Handover call Blocking Probability, HBP)<sup>[4]</sup>, 目前研究主要是来处理这三个 QoS 因素。

因为地球表面人口分布高度不均匀, 所以在 LEO 卫星网络中流量需求也是不平衡的。绝大多数热区分布在北半球, 特别是在北纬 50°N 范围<sup>[5]</sup>。因此卫星网络需要面对一些卫星拥塞而其他一些却未被充分利用的困难。如果没有一个高效的路由算法, 网络流量不平衡的分布将导致低质量的 QoS, 比如点对点时延、高 CBP 和 HBP。

在文献 [1-4, 6-8] 中, 提出了几个 LEO 卫星网络路由算法, 除了文献 [6-7] 中的两个路由策略是基于地球表面不同的人口密度外, 其他算法都没有考虑这方面的因素。该文提出了一个遗传卫星路由协议 (GSRP), 用来解决卫星网络 QoS 路由问题, 致力于提供良好的负载平衡和点对点时延保障, 并提供较低的 CBP 和 HBP。

**基金项目:** 安徽省高等学校自然科学基金项目 (the Natural Science Foundation of Higher Education of Anhui Province of China under Grant No. KJ2009B125Z); 安徽财经大学青年科研项目 (No. ACKYQ0921)。

**作者简介:** 张雪东 (1980-), 男, 讲师, 主要研究领域为智能算法; 饶元 (1982-), 男, 博士研究生, 主要研究领域为数据挖掘、移动 Agent 等。

**收稿日期:** 2009-08-25 **修回日期:** 2009-10-12

GSRP 的思想来源于文献[9]中的算法, GSRP 的一个基因染色体由一个作为节点标识的正整数序列构成, 基因染色体的每个元素表示节点在路由路径中的顺序。基于网络拓扑信息数据库(路由表), 可以利用基因对从源节点到目标节点的路径进行编码。遗传算法中的交叉和变异操作作用于变长的染色体, 修复函数查找并消除路由路径中的环路。

## 2 GSRP 概述

### 2.1 卫星网络 QoS 路由问题

问题描述: 假设图  $G=(V, E)$  表示卫星网络拓扑结构,  $V$  代表卫星节点集合,  $E$  代表整个网络 ISLs 集合。每个链路  $ISL_{i \rightarrow j}$  有一个与之相关的代价  $C_{ij}$ , 总体代价由一个代价矩阵  $C=[C_{ij}]$  表示, 其中  $C_{ij}$  代表在链路  $ISL_{i \rightarrow j}$  上传输一个数据包的代价。每个链路有一个链路连接指示器  $I_{ij}$ , 指示从一个节点到另一个节点的链路是否包含在一个路由路径中。定义如下:

$$I_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{如果 } ISL_{i \rightarrow j} \text{ 在路由路径中存在} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (1)$$

这样, 考虑到一个源-目标顶点对  $(s, d)$  的连接请求, QoS 路由可以描述为一个组合优化问题, 最小化目标函数为:

$$\text{delay}(p(s, d)) = \sum_{i=s}^d \sum_{\substack{j=i \\ j \neq i}}^d C_{ij} \cdot I_{ij}, I_{ij} \in \{0, 1\} \quad (2)$$

QoS 要满足:

(1) 时延约束:  $\text{delay}(p(s, d)) \leq D$ 。

(2) 带宽约束:  $(\text{band}(s, v_1) \geq B) \wedge (\text{band}(v_1, v_2) \geq B) \wedge \dots \wedge (\text{band}(v_k, d) \geq B)$ 。

其中,  $v_i (i=1, 2, \dots, k)$  是中间卫星节点,  $B$  是需求带宽,  $\text{band}(i, j)$  是剩余带宽,  $D$  是预定义的常量。

### 2.2 相关定义

假设路由表每隔  $\Delta t$  时间周期性地更新, 在时刻  $t$ , 即时路径代价定义为:

$$C(t) = T_d(t) + T_b(t) \quad (3)$$

其中,  $T_d(t)$  表示传播时延,  $T_b(t)$  表示这个时间间隔预期的平均排队时延, 由下面公式计算得到<sup>[7]</sup>:

$$T_b(t) = \frac{1}{\Delta t} \int_{t-\Delta t}^t q(i) \times \frac{P_{avg}}{A} \times d_i \quad (4)$$

其中,  $A$  表示 ISL 容量,  $q(i)$  表示时刻  $i$  队列占用率,  $P_{avg}$  表示平均数据包大小。

**定义 1** 拥塞指数。令  $I$  和  $O$  分别表示给定卫星  $i$  的输入和输出传输率,  $Q_t$  表示时刻  $t$  队列总长, 时刻  $t$  拥塞指数定义为:

$$\delta_i(t) = \frac{(Q_t - q(t)) \times P_{avg}}{I - O} \quad (5)$$

其中,  $q(t) = \frac{1}{\Delta t} \int_{t-\Delta t}^t q(i) \times d_i$ ,  $q(t)$  表示时间间隔  $\Delta t$  内平均队列占有率。

**定义 2** 代价修改因子。假设  $lat_i$  是卫星节点  $i$  的纬度, 卫星  $i$  的所有 ISLs 的代价修改因子定义如下:

$$\lambda_i = e^{lat_i/90} \quad (6)$$

**定义 3** 链路状态通告(Link State Advertisement, LSA)。令  $LSA(i)$  表示节点  $i$  的 LSA, 那么  $LSA(i)$  定义为一个集合  $(x, C_{i \rightarrow x}, \text{band}(i, x))$ , 其中  $x$  是  $i$  的直接邻居。

$$LSA(i) = \{(x, C_{i \rightarrow x}, \text{band}(i, x)) | x \text{ 是 } i \text{ 的直接邻居}\} \quad (7)$$

卫星状态通告(Satellite State Advertisement, SSA)。节点  $i$  的 SSA 定义为:

$$SSA(i) = \{\lambda_i, \delta_i, LSA(i)\} \quad (8)$$

轨道面状态通告(Plane State Advertisement, PSA)。定义同一个轨道平面  $K$  内所有卫星的 SSA 的集合:

$$PSA(K) = \{SSA(i) | i \text{ 是轨道平面 } K \text{ 内的卫星}\} \quad (9)$$

**定义 4** 路由表。如表 1 所示, 由 4 项构成, 分别是目标、路由、时延和权重。目标表示数据包的目的节点, 对于每一个目标, 都有一系列可选的路由表项, 路由表项是路由路径上的节点 IDs 的列表。时延表示路由上点对点的时延。权重表示的是当一个请求到来时路由被选中的概率。

表 1 路由表

目标	路由	时延	权重
3	(1, 4, 5, 3)	100	0.32
	(1, 2, 4, 3)	80	0.40
	(1, 6, 3)	120	0.28
5	(1, 4, 5)	100	0.52
	(1, 2, 5)	105	0.48
8	(1, 8)	110	0.50
	(1, 7, 8)	110	0.50
...	...	...	...

在文献[10]中, 提出了一个分布式层次链路状态更新机制, 该文也采用了这一机制。轨道发言者收集本轨道面的通告, 和网络中其他的轨道发言者交换信息, 经过一个周期后每一个轨道发言者可以获得其他所有轨道面的通告。这样, 整个网络的拓扑结构和网络状态库(Network State Base, NSB)将被构建, 最后, 网络状态库可以通过轨道面内部的 ISLs 分发到其他卫星。

### 2.3 遗传卫星路由协议(GSRP)

GSRP 中的遗传表达式、人口初始化、选择、交叉和修复函数在概念上与最短路径路由问题<sup>[9]</sup>中的遗传算法类似, 在此基础上, 引入了适应度函数、终止函数和变异概率。

(1) 适应度函数: 遗传算法执行中对基因表的解的评价, 希望找到代价最小的路径, 因此适应度函数指示计算的有效性和准确性, 定义如下:

$$f_i = \begin{cases} \frac{1}{\sum_{j=1}^{l_i-1} \lambda_{g(j+1)} C_{g(j), g(j+1)}} & \forall \text{band}(g(j), g(j+1)) \geq B \\ \min(f_i) & \text{否则} \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $f_i$  表示第  $i$  个染色体的适应度值,  $l_i$  是第  $i$  个染色体长度,  $l_i(j)$  表示第  $i$  个染色体中第  $j$  个基因(节点),  $C$  表示节点间的链路代价。

**定理 1** 包含北半球卫星的路径的适应度偏小, 而包含南半球卫星的路径的适应度偏大。

$$\text{证明 显然, } \lambda_i = \begin{cases} e^{lat_i/90} & > 1, lat_i > 0 \\ e^{lat_i/90} & < 1, lat_i < 0 \end{cases}, \text{ 所以, 包含北半球卫星的} \\ 1, lat_i = 0$$

路径  $\sum_{j=1}^{l_i-1} \lambda_{g(j+1)} C_{g(j), g(j+1)}$  越大, 相应路径的适应度就越小。相似地, 包含南半球的卫星的路径适应度越大。

(2) 变异: 变异能够有效地引入新的种群, 避免陷入局部最小化。为了避免拥塞, 动态改变每个卫星变异操作的概率是必要的, 使用下面的公式来改变卫星  $i$  的变异率:

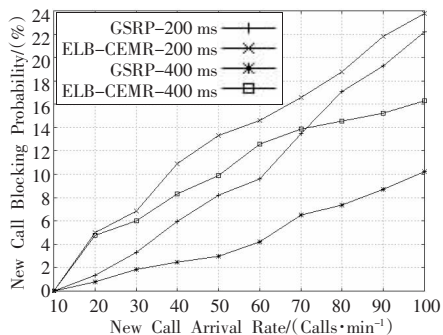


图1 CBP 对比

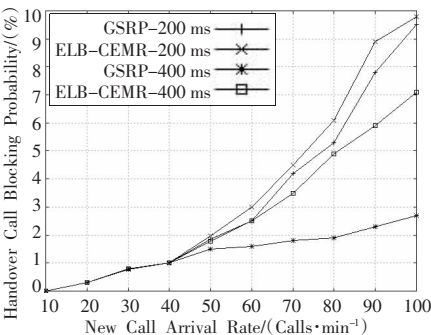


图2 HBP 对比

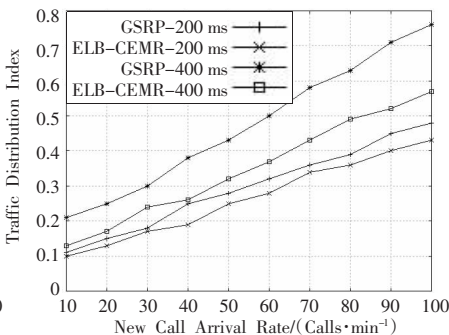


图3 不同呼叫的流量分布指数

$$p_{mu}(t) = \max\left(\frac{\delta_i(t)}{\delta_i(t) + \beta\Delta t}, 0.05\right) \quad (11)$$

其中,  $\Delta t$  是路由表被更新的周期。

(3) 终止函数: 进化过程是一个循环, 直到终止条件满足为止。使用最频繁的收敛条件是指定一个最大代数, 在研究中, 指定一个最大代数并使用了下面的不等式:

$$\sum_{j=1}^{l-1} C_{g(j), g(j+1)} \leq D, \forall \text{band}(g_i(j), g_i(j+1)) \geq B \quad (12)$$

一旦最大代数或不等式(12)得到满足, 算法将终止。

(4) 路由表更新: 当一个到目标  $d$  的请求到达一颗卫星, 如果到  $d$  的路由表项为空, GSRP 就会被调用产生路由。将满足不等式(12)的路径填入路由表。同时, 时延查询消息以一个指定的时间间隔被发送, 以观察路由上的时延, 如果时延不满足点对点时延, 相应的路由表项将被删除。路由权重值的评价是基于路由上点对点时延的, 权重值  $\omega_i$  通过以下的等式计算:

$$\omega_i = \frac{1/\eta_i}{\sum_{j \in s} 1/\eta_j}, \text{ 其中 } \eta_i = \frac{d_i}{\sum_{j \in s} d_j} \quad (13)$$

其中,  $d_i$  是路由  $i$  的时延,  $s$  是相同目的地路由的集合。在上面的等式中, 首先通过将时延  $d_i$  除以时延的总和得到一个平均时延  $\eta_i$ 。接着, 计算交互时延并将其归一化。上面的等式由一个较小的  $d_i$  产生一个较大的  $\omega_i$ , 借助于评价机制, 当新的请求到达时, 较小的点对点时延的路由更容易被选中。

(5) QoS 路由选择: 选择 QoS 路由的伪代码如下:

步骤 1 卫星  $s$  接收要求 QoS 保障的新呼叫或切换呼叫( $s, d$ ), 时延为  $D$ , 带宽为  $R$ 。

步骤 2 if (到目的  $d$  的路由表项为空)

步骤 3 GSRP 运行产生到  $d$  的路由

步骤 4 if (到目的  $d$  的路由表项仍为空)

步骤 5 拒绝请求, return

步骤 6 else goto 步骤 8

步骤 7 else

步骤 8 接受请求, 通过等式(13)选择路由。

### 3 性能测试

#### 3.1 仿真参数

使用 NS2.29 进行仿真, 提出的路由协议使用 Courier-like 模型进行仿真<sup>[3]</sup>。共有 8 个轨道平面, 每个平面有 9 颗卫星, 假设每颗卫星有 4 个 ISLs, 2 个轨道内 ISLs 和 2 个轨道间 ISLs, 没有邻近轨道朝着相反的方向, 因此, 所有的 ISLs 是固定的。卫星轨道在海拔 1 000 km, 轨道倾角 84.7°, 地面站最小仰角是 20°。种群数量为 30, 最大代数为 200。

网络流量参照文献[6], 新呼叫从 100 个地面终端以相同概率产生, 连接时间呈指数分布, 平均 5 min, 模拟不同的新呼叫到达率来研究不同流量的影响。仿真中考了 3 个性能指标: CBP、HBP 和流量分布。使用不同的时延约束来测试算法性能, 分别在  $D$  是 200 ms 和 400 ms 下进行测试。为了对比起见, 仿真实现了修改后的 ELB-CEMR<sup>[7]</sup>, ELB-CEMR 与 GSRP 具有相同的入口和出口卫星, 不同的是 ISL 路由程序。

#### 3.2 仿真结果

图 1 显示 ELB-CEMR 与 GSRP 算法产生的 CBP 比较。目标时延约束分别设置为 200 ms 与 400 ms。显然, 在相同的新呼叫到达率下, GSRP 比 ELB-CEMR 能够得到更低的 CBP 和 HBP。如图 1 所示, GSRP 比 ELB-CEMR 具有更好的表现, 特别是当目标时延约束为 400 ms 时, GSRP 比 ELB-CEMR 产生更好的 CBP, 这是因为目标时延约束越大, GSRP 越容易发现路径。

在图 2 中, 可以看到, 除了 GSRP 在目标时延约束是 400 ms 的情况下, HBP 呈指数级增长。显然, 目标时延约束是 400 ms 的情况下 GSRP 的 HBP 呈线性增长。这是因为当目标时延约束 400 ms 时, GSRP 比 ELB-CEMR 更容易找到路径。因此, 对于切换呼叫, GSRP 比 ELB-CEMR 能够提供更多的路径选择。

另外, GSRP 考虑到了卫星拥塞情况, 避免以高占用率来选择 ISL, 增加了切换呼叫的成功率, 实现了负载平衡。为了考察整个网络流量分布状况, 使用了文献[7]中的流量分布指数。仿真结果显示 GSRP 在整个网络中具有更好的流量负载平衡, 如图 3 所示。实验中将每分钟的流量分布指数划分成不同的呼叫, 结果表明 GSRP 性能明显优于 ELB-CEMR。原因在于, ELB-CEMR 算法的路由策略是只查找两个最短时延路径<sup>[9]</sup>, 在整个传输过程中, 数据要经过两条路径传播。而 GSRP 可以提供更多的路径并避开拥塞的卫星, 数据通过多条不拥塞路径传播, 这种操作导致更有效的网络链路流量分布。当时延约束 400 ms 时, GSRP 展现出最好的流量分布。

### 4 结论

提出了基于遗传算法的 LEO 卫星网络路由协议(GSRP), 在 GSRP 中, 当一个请求到达接入卫星时, GSRP 就产生相应的路由。仿真验证了 GSRP 具有更好的负载平衡, 在确保端到端时延的条件下有更好的 CBP 和 HBP。在未来的工作中, 将致力于多个卫星的相互合作研究。

#### 参考文献:

- [1] Chen Chao. A QoS-based routing algorithm in multimedia satellite networks[C]//Proceedings of IEEE 58th Vehicular Technology Conference, Orlando, Florida, USA, 2003, 4: 2703-2707.