

分布式星群网络中基于蚁群算法的通信量分类路由

姜楠^{1,2} 何元智²

(解放军理工大学通信工程学院 南京 210007)¹ (中国电子设备系统工程公司研究所 北京 100141)²

摘要 给出了一种分布式星群网络(Distributed Satellite Cluster Network, DSCN)体系架构,阐明了 DSCN 拓扑变化的特点。在分析网络状态获取方式和路由计算方法的基础上,提出了一种适用于 DSCN 的基于蚁群算法的通信量分类路由(Ant Colony Optimization Based Traffic Classified Routing, ATCR)算法。ATCR 算法将通信量分为时延敏感型通信量 A、带宽敏感型通信量 B 以及提供尽力而为服务的通信量 C,并对蚁群算法(Ant Colony Optimization, ACO)收敛慢的缺点进行了改进。仿真实验表明,ATCR 算法提高了收敛速度,可以有效平衡网络流量。通信量 A 和 C 的端到端时延要小于未采用通信量分类的改进 ACO 算法。由于减少了重负载链路的数量及拥塞引起的丢包,ATCR 算法在分组递交率上的表现优于改进的 ACO 算法。

关键词 分布式星群网络,蚁群算法,通信量分类,端到端时延,分组递交率

中图分类号 TN915.81 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.10.021

ACO Based Traffic Classified Routing Algorithm in Distributed Satellite Cluster Network

JIANG Nan^{1,2} HE Yuan-zhi²

(College of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)¹

(Institute of Chinese Electronic Equipment System Corporation, Beijing 100141, China)²

Abstract The architecture of distributed satellite cluster network (DSCN) was presented and the characteristics of DSCN topology change were illustrated. On the basis of analyzing the acquisition method of network status and route calculation, we proposed an ant colony optimization based traffic classified routing (ATCR) algorithm for DSCN. In ATCR, traffic is divided into three classes, traffic class A takes minimized end to end delay as optimization target, traffic class B takes maximize throughput and traffic class C provides best-effort service. ATCR improves the shortcoming of slow convergence in ant colony optimization (ACO). Simulation results show that ATCR algorithm can improve the convergence speed and balance network traffic effectively. The end-to-end delay of traffic class A and class B is less than MACO algorithm which does not use traffic classification. ATCR has a better performance on packet delivery ratio than MACO, because ATCR reduces the number of heavy load link as well as packet loss caused by congestion.

Keywords DSCN, ACO, Traffic classification, End-to-end delay, Packet delivery ratio

1 引言

随着分布式理论和应用的日渐成熟,分布式概念在航空航天领域再次得到了广泛关注^[1,2]。分布式星群(Distributed Satellite Cluster, DSC)由一组分布在同一或邻近轨道上的卫星组成。DSC 利用组网协同、共轨控制技术,整合空间上邻近且独立分布的卫星资源,实现整体大于部分之和的效果。开展基于分布式星群的空间信息网络研究具有重要的国家战略意义。

分布式星群网络是由若干 DSC 组成的空间骨干网,其组成部分包括位于 GEO 的 DSC、各类中低轨道卫星、具备卫星链路的飞行器以及各类地面终端。DSCN 具有立体的网络拓扑结构,网络呈现节点多元化的特点。

由于服务种类和业务量的持续增加,作为全球通信体系

的一部分,DSCN 与地面网络一样也面临着用户业务不断增长的多样化 QoS 需求带来的挑战。结合 DSCN 拓扑结构以及通信环境特点,设计满足 QoS 需求的路由算法,对整个网络具有重要意义。

现有空间网络路由问题的研究对象主要是卫星星座网络。在星座网络中,由于链路传播时延较大,以端到端时延作为优化目标的 QoS 路由问题得到了广泛研究。

Lu 等人^[3]在 LEO 极轨星座网络中采用改进的二维 mesh 并行处理系统容错路由策略,改善了系统对节点失效的自适应能力,提高了网络吞吐量。Rao^[4]等人提出的基于代理的流量平衡路由算法(Agent-based Load Balancing Routing, ALBR),通过使用静态代理和动态代理分别进行链路代价评估与路径发现,提高了网络高负载情形下的吞吐量。Na 等人^[5]提出了一种基于代理的分布式路由算法,并引入了流

量预测机制,通过改进的卡尔曼滤波器预测将要到来的流量,在计算路由时综合考虑当前以及未来的网络状态信息。

Svigelj^[6]针对 LEO 星座网络,借鉴地面网络 QoS 路由中区分服务的思想,提出了一种通信量分类路由算法(Traffic Class Dependent Routing, TCD)。TCD 将通信量分为 A、B、C 3 类, A 类与 B 类通信量分别以最小化端到端时延和最大化吞吐量为优化目标,并为 C 类通信量提供尽力而为服务。该算法为每类通信量单独设计链路代价函数,并分别采用 Dijkstra 和 Bellman-Ford 算法进行路径计算。TCD 算法虽然可以为不同类型通信量提供差异化 QoS 路由服务,但是每种通信量的优化指标只有一种,本质上仍然是一种单 QoS 优化路由算法。

随着业务的多样化发展,只针对某一项 QoS 参数进行优化已经不能满足需要。为了满足业务的需求,必须根据业务要求对多个 QoS 目标参数联合优化。多目标优化问题已被证明是一个 NPC(Non-deterministic Polynomial Complete)问题,许多研究引入启发式(Heuristic)算法解决卫星网络中的多 QoS 目标优化路由问题。Rao 等人^[7]针对 LEO 星座网络提出了一种基于遗传算法的源 QoS 路由算法 MPQR(Multi-path QoS routing),其能计算同时满足时延与带宽限制的最优路径。Long 等^[8]针对 LEO/MEO 双层模型,设计了一种基于快照的 QoS 路由算法,在每个快照的起始阶段,由地面站运行 QoS 路由算法为用户业务提供服务。算法根据不同用户的要求对多个 QoS 参数进行联合优化,并引入了优序数算法和蜂群算法进行求解。但是该算法没有对业务进行区分,认为在每一个快照时间内业务的 QoS 需求是不变的,这会导致在单一快照时间内网络流量的集中,从而增加链路的拥塞概率。

本文结合 DSCN 网络的特点,提出了一种基于蚁群算法的通信量分类路由算法。ATCR 算法将业务按照 QoS 需求的不同分成不同的通信量类型,并为每一类通信量利用 ACO 算法求解多 QoS 约束下的路由计算问题。

本文第 2 节给出了 DSCN 网络体系架构,同时对 DSCN 网络拓扑进行了分析;第 3 节从网络状态获取方式和路由计算两方面对 DSCN 的 QoS 路由策略进行了分析,给出了 ACO 算法在求解多 QoS 约束路由计算问题时的思路;第 4 节详细介绍了 ATCR 算法,给出了一种 ACO 算法的改进;第 5 节对改进的 ACO 算法以及 ATCR 算法的性能进行了仿真分析;最后对全文工作进行了总结。

2 DSCN 网络架构

2.1 DSCN 体系结构

DSCN 可分为空间段、临近空间段和地面段 3 个部分,通过群间、星间、星地等链路形成一体化的空间信息网络,为天基、空基和地面用户提供多样化的服务。3 个空间分别承载了不同功能的节点。其中,网络的骨干节点是位于 GEO 轨道的分布式星群,空间段中其它空间飞行器,包括中低轨道应用卫星以及空间站等,均可认为是用户节点。临近空间段包括各类具备卫星链路的飞行器,主要有无人机群、平流层飞艇、干线民航客机和大型运输机等,以上节点均可认为是用户节

点。地面段包括各类终端、接入站点和各类与航天活动相关的地面设施,主要有车载、机载、船载、手持等卫星通信或数据采集分发终端,各类卫星固定接收站、卫星测控系统、运控系统以及其他与航天活动相关的网络或设施。

从网络体系的角度分析,DSCN 可分为骨干网、接入网与运维网 3 部分。其网络体系结构如图 1 所示。骨干网由位于 GEO 轨道的若干分布式星群组成。位于 GEO 轨道的同一星群内部采用共轨控制技术,卫星之间相对运动缓慢,距离近(10~100km)。星群内部、星群之间通过群间链路通信(Inter Cluster Link, ICL),实现分布在 GEO 轨道的环状骨干网。

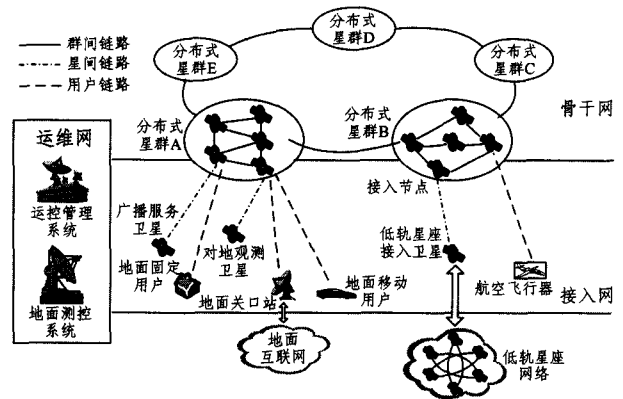


图 1 DSCN 体系结构

接入网由各类用户终端以及接入节点组成。用户终端的概念如前所述,接入节点分为承担用户终端接入骨干网的卫星节点以及某一特定信息系统接入骨干网的节点,如承担骨干网与地面互联网连接的地面关口站。接入网中空间用户节点通过一条或多条星间链路(Inter Satellite Link, ISL)与接入节点连接,其它用户节点通过用户数据链路(User Data Link, UDL)与接入节点连接。

运维网包含运控管理系统和地面测控系统等,承担 DSCN 中天基节点正常运行维护、网络资源管理调度等功能。

2.2 DSCN 拓扑分析

将 DSCN 系统模型化为一个图 $G=(N, L, f)$ 。 $L=\{L_1, L_2, \dots, L_m\}$ 分别为所有链路的集合; f 为 N 与 L 的映射函数, $f: L \rightarrow N \times N$, 它将链路映射为节点对; $N=\{N_b \cup N_a\}$, 其中 N_b 与 N_a 分别表示骨干网与接入网节点的集合。

网络拓扑的高度动态性是星座路由面临的主要挑战之一。星座网络拓扑在具有高动态性的同时,还具有拓扑变化周期性重复可预知的特点。利用这些特性,许多算法^[9,10]试图从不同的角度来屏蔽星座网络的拓扑结构变化,利用先验知识计算当前网络拓扑。例如文献^[8]将连续动态变化的网络拓扑离散化为一系列固定的拓扑快照。

DSCN 拓扑同样具有动态变化的特点,但与一般意义上的单层或多层星座网络不同,DSCN 的拓扑有以下特点。

1) 拓扑核心稳定,边缘变化剧烈。由于分布式星群之间相对静止,星群内部采用共轨控制等技术,节点之间相对运动缓慢,因此 DSCN 中位于 GEO 轨道的骨干网络拓扑较为固定。但是接入网中的卫星节点种类复杂、轨道类型较多,临近空间中的飞行器与地面移动节点动态接入,从而使整个网络

的拓扑动态变化。

2) 拓扑变化不呈现周期性。虽然 DSCN 中骨干网络拓扑稳定,但是接入网中许多节点动态接入骨干网,导致对网络边缘的拓扑变化无法预测。

可见,DSCN 无法利用先验知识计算网络拓扑变化,只能采取动态更新的方式获取拓扑变化信息。

3 QoS 路由策略

在所有的通信网络中,路由要实现 3 个过程:①获取网络状态信息;②根据网络状态信息计算路由;③根据②中的计算结果,将信息递交给下一跳^[11]。本节分别从①、②两步对 DSCN 中 QoS 路由策略进行分析。

3.1 网络状态的获取

获取网络状态的目的是使负责路由计算的节点获得全网的网络状态视图,从而进行路由计算。将网络状态的获取分为两个步骤:每个节点收集本节点以及周围链路的状态信息;节点间互相传递网络状态信息,从而使负责计算的节点获得全网的网络状态视图。

3.1.1 状态信息的收集

时延、带宽和丢包率是业务多样化 QoS 需求中最主要的 3 个组成部分,本文针对这 3 个要素研究多 QoS 目标优化路由算法。

在卫星网络中,设 $i, j \in N$, (i, j) 表示节点 i 至节点 j 的链路, s 和 d 分别表示路径的源节点和目的节点, $path(s, d)$ 表示从源节点到目的节点的一条路径。

时延指业务流从源节点到目的节点的经过时间。链路 (i, j) 的时延 $d(i, j)$ 指业务流从进入节点 i 到抵达节点 j 所用的时间,则路径 $path(s, d)$ 上的总时延 $d_{path(s, d)}$ 可表示为:

$$d_{path(s, d)} = \sum_{(i, j) \in path(s, d)} d(i, j) \quad (1)$$

$d(i, j)$ 包括节点处理时延 d_{pro} 、节点排队时延 d_q 和传播时延 d_p , 节点处理时延与硬件处理性能有关,与排队时延以及传播时延相比可以忽略不计,所以得到式(2)。

$$d(i, j) = d_p + d_q \quad (2)$$

传播时延和节点间距离成正比,排队时延随链路载荷连续随机变化。由于排队时延的不确定性, d_q 需要周期性地使用固定大小窗口的指数遗忘函数(Fixed-size Window Exponential Forgetting Function) $EFF(n, x, d_q)$ 来估算。在 $EFF(n, x, d_q)$ 中,函数的深度 n 表示存储单元的数量, $x \in (0, 1)$ 表示遗忘因子,在给定的周期 T 内收集到的排队时延 d_q 的数量用 l 表示。

$$d_q[l+1] = EFF(n, x, d_q) = \begin{cases} (1-x) \cdot \sum_{r=0}^{l-1} x^r \cdot d_q[l-r] \\ (1-x) \cdot \sum_{r=0}^{n-1} x^r \cdot d_q[n-r] \end{cases} \quad (3)$$

x 的引入使得 d_q 越新鲜,权重越大。

定义链路利用率 LU 如式(4),其中 L_i 为周期 T 内第 i 个发送数据包的大小, C 为链路 (i, j) 的容量。

$$LU = \frac{\sum L_i}{T \cdot C} \quad (4)$$

所以得到表征链路 (i, j) 剩余带宽的参数 R_B :

$$R_B(i, j) = 1 - LU \quad (5)$$

设链路 (i, j) 的丢包率为 $l(i, j)$, 这里认为 $l(i, j)$ 由链路决定。这样就得到上述待收集状态信息,如图 2 所示。节点 N_2 收集本节点每条链路的排队时延 d_q 以及剩余带宽 R_B , 同时结合由链路决定的状态信息传播时延 d_p 和丢包率 $l(N_2, N_3)$, 组成链路 (N_2, N_3) 的状态信息集合 $S(N_2, N_3) = \{d(N_2, N_3), R_B, l(N_2, N_3)\}$ 。

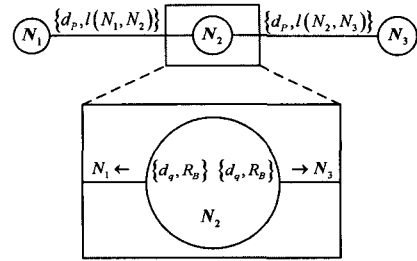


图 2 待收集状态信息

3.1.2 状态信息的传递

单层星座网络通常需要将网络状态信息在整个网络中散布(Distributing),从而使每个节点单独计算本节点到全网其它节点的路由。首先,信息散布会导致大量的通信开销用于洪泛网络状态信息,同时每个节点都会产生用于路由计算的计算开销;其次,路由算法的性能对信息散布的频率以及触发机制十分敏感,最后,需要在路由算法中设计额外的机制以防止回路的产生。

借鉴多层星座网络中 MEO/GEO 卫星为 LEO 卫星充当群组管理者的思想,结合 DSCN 中单个星群拓扑稳定、耦合紧密的特点,在每一个星群中设置一个管理节点收集其管理区域内的状态信息,管理区域包括管理节点所在星群以及与所在星群有直接链接关系的接入网。不同星群中的管理节点通过交换状态信息来获得全网的状态视图。管理节点利用收集到的网络状态信息为管理区域内的其它节点进行路由计算,并更新路由表。

这样,计算开销集中于管理节点,整个系统的通信开销也得到了有效控制。采用两种方式触发状态信息收集。首先,当有链路建立或者断开时,涉及到的节点生成相关报告上传给其管理节点。管理节点首先将报告信息与其它管理节点共享,然后根据报告更新网络状态视图。除此之外,所有管理节点统一以周期 T 收集本区域状态信息,并与其它管理节点进行交换以更新全网的网络状态视图,以保障全网路由的一致性。网络状态视图一旦被更新,管理节点会为其管理区域内的节点重新计算路由表。

3.2 路由计算

管理节点获得全网状态信息后,利用 ACO 算法求解多约束条件下的路由选择。约束条件如下:

$$\begin{cases} \text{时延约束: } d_{path(s, d)} \leq D_r \\ \text{带宽约束: } \min_{(i, j) \in path(s, d)} (R_B(i, j)) \geq B_r \\ \text{丢包约束: } \max_{(i, j) \in path(s, d)} (l(i, j)) \leq L_r \end{cases}$$

D_r 、 B_r 、 L_r 均为根据业务要求预先定义的常数,其中 D_r 的单位为秒。

ACO 算法^[13]是模拟自然界中蚂蚁的寻径行为的一种仿

生算法。蚂蚁会在经过的路径留下被称为“信息素(pheromone)”的挥发性物质。信息素会影响蚂蚁的寻路行动,蚂蚁有更高的可能性选择信息素浓度高的路径。

ACO 算法的实现思路如下:

设源节点为 s , 目的节点为 d , 蚂蚁的初始节点为 i , 所有与 i 相邻的节点集合记为 $N(i)$ 。设蚂蚁选中链路 (i, j) 的概率为 $P(i, j)$, 链路 (i, j) 上信息素浓度为 $\tau(i, j)$, 则有

$$P(i, j) = \frac{\tau(i, j)}{\sum_{j \in N(i)} \sigma(i, j)} \quad (6)$$

其中

$$\tau(i, j) = \prod_{q(i, j) \in Q(i, j), e \in E} q(i, j)^e \quad (7)$$

$Q(i, j) = \{1/d(i, j), R_B, 1/l(i, j)\}$ 为链路 (i, j) 的 QoS 指标的集合; $E = \{e_1, e_2, e_3\}$ 为 $Q(i, j)$ 内元素对 $\tau(i, j)$ 重要性权值的集合; e_1, e_2, e_3 顺序对应 $1/d(i, j), R_B, 1/l(i, j)$ 。

当蚂蚁选中一条链路后, 在其上释放信息素。设 ρ 为衰减因子, $\rho \in (0, 1)$, α 为影响因子, 则有

$$\tau(i, j) = (1 - \rho) \cdot \tau(i, j) + \alpha \cdot \prod_{q(i, j) \in Q(i, j)} q(i, j) \quad (8)$$

蚂蚁到达目的地 d 时, 便沿原路返回, 并在所经过的链路上释放信息素, 设 β 为路径影响因子, $path(s, d)$ 为从源节点 s 到目的节点 d 的链路集合, 对所有经过的链路 (i, j) 有

$$\tau(i, j) = (1 - \rho) \cdot \tau(i, j) + \beta \cdot \sum_{i, j \in path(s, d)} \left(\prod_{q(i, j) \in Q(i, j)} q(i, j) \right) \quad (9)$$

当蚂蚁返回源节点时, 对于那些在此次寻路过程中没有被选中的链路有

$$\tau(i, j) = (1 - \rho) \tau(i, j) \quad (10)$$

可以看到, 链路被选中的概率与服务质量的高低成正比, 同时被选中的链路会得到额外的奖励, 如式(8)所示。到达目的节点的路径会根据其路径的综合服务质量给予相应奖励, 如式(9)所示。这样经过若干次正反馈, 满足 QoS 需求的路径就会凸显出来。

4 ATCR 算法

在上一节的基础上, 提出一种适用于 DSCN 的 QoS 路由算法 ATCR。ATCR 算法将通信量分为 3 类, 分别是时延敏感型通信量 A、带宽敏感型通信量 B 以及提供尽力而为服务的通信量 C。管理节点收集其管理区域内每个节点上所有出口链路的时延、带宽以及丢包率信息, 然后利用 ACO 算法进行 QoS 路由计算, 为每类通信量单独计算一个路由表。

4.1 ACO 算法的实现

在利用 ACO 算法计算路由时, 通过以下两个步骤对通信量进行区分。步骤 1: 为每类通信量设置不同的时延、带宽和丢包约束条件。步骤 2: 对于同一条链路 (i, j) , 不同的通信量类型的信息素浓度 $\tau(i, j)$ 是不同的。通过为每一类通信量设置独特的权值集合 E 来实现对 $\tau(i, j)$ 的区分, E 与 $\tau(i, j)$ 的关系已由式(7)给出。

采用 ACO 算法进行路由计算还需要定义以下变量: $pass$ 为存放蚂蚁所经过节点的数组; $needless$ 为属于节点 i 、存放与 i 相邻但不符合 QoS 约束条件的节点; m 为算法循环次数, M 为最大循环次数。ACO 算法的具体实现步骤如表 1 所列。

表 1 ACO 算法的实现步骤

每次运行前根据更新的网络状态初始化各链路信息素浓度, 设定好初始参数, 设源节点与目的节点分别为 s 与 d
步骤 1. 在源节点创建一只人工蚂蚁
步骤 2. 蚂蚁到达节点 i
if($i=d$)
{ 根据 $pass$ 中的节点可以得一条 $path(s, d)$, 根据式(9)刷新 $path(s, d)$ 中每条链路的信息素浓度, 同时用式(10)刷新不在 $pass$ 中的链路信息素浓度, $m=m+1$;
if($m \geq M$)
{ 算法结束; }
else
{ 清空 $pass$, 转步骤 1; }
else
{ 由式(6)所确定的概率选择下一跳 j , 然后转步骤 3; }
步骤 3. if($j \in pass$)
{ 用式(10)刷新链路 (i, j) 的信息素浓度, 转步骤 2; }
else
{ if($j \in needless$)
{ 用式(10)刷新链路 (i, j) 的信息素浓度, 转步骤 2; }
转步骤 4; }
步骤 4. if($path(s, j)$ 满足 QoS 约束)
{ 将 j 添加到 $pass$ 中, $i=j$, 转步骤 2; }
else { 用式(10)刷新链路 (i, j) 的信息素浓度, 将节点 j 添加到节点 i 的 $needless$ 中, 转步骤 2; }

4.2 ACO 算法的改进

收敛时间较长是 ACO 算法的缺点之一。DSCN 边缘拓扑变化很快, 这就要求 ACO 算法缩短收敛时间。通过修改参数或者单纯提高信息素值来缩短收敛时间会导致算法陷入局部最优, 得不到满意的结果。

引入一种改进的 ACO 算法(MACO), 其思想是对当前最优路径赋予额外的信息素奖励, 加快算法收敛。

对表 1 中的步骤 2 进行修改: 当第一次得到 $path(s, d)$ 时, 将其记录为历史最优路径, 之后每得到一条 $path(s, d)$, 将其与历史最优路径进行比较, 若相同, 则用式(9)刷新此路径; 若当前路径与历史最优路径不同, 比较其与历史最优路径的路径总信息素浓度 $\tau(i, j)$ 的大小, 若当前路径的 $\tau(i, j)$ 较大, 则用当前路径更新历史最优路径, 同时用式(9)刷新 $\tau(i, j)$ 较小者, 而以

$$\tau(i, j) = \lambda_1 \cdot \tau(i, j) + \lambda_2 (1 - \rho) \cdot \tau(i, j) + \beta \{ (1 - \rho) \cdot \tau(i, j) + \sum_{i, j \in path(s, d)} \left(\prod_{q(i, j) \in Q(i, j)} q(i, j) \right) \} \quad (11)$$

刷新总信息素浓度较大者, 其中 $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ 。

5 仿真分析

利用 OPNET 14.5 进行网络仿真, 使用 STK 8 构建轨道模型, 使用 MATLAB 进行路由计算, 将计算结果导入 OPNET。本节首先比较了原始 ACO 算法与 MACO 算法的性能, 然后对本文提出的 ATCR 算法与不采用通信量分类的 MACO 算法进行了仿真对比。

5.1 仿真模型与参数设定

DSCN 网络模型参数如表 2 所列。

每个分布式星群包含 6 颗卫星, 采用环状拓扑, 相邻星群之间有两条 ICL。为了简化仿真计算, 认为链路丢包率为固定值, ICL 与 ISL 的链路丢包率为 0.08%, UDL 的链路丢包率为 0.1%。管理节点与所在星群内其它节点采用独立的信令链路传递网络状态信息与路由表。

表 2 DSCN 网络模型参数

名称	符号	轨道或位置
分布式星群 1	DSC_1	GEO 轨道 E 110°
分布式星群 2	DSC_2	GEO 轨道 E 20°
分布式星群 3	DSC_3	GEO 轨道 W 70°
分布式星群 4	DSC_4	GEO 轨道 W 160°
空间站	ISS	远地点 403km 近地点 379km 轨道倾角 52°
侦查卫星	RS	太阳同步轨道 高度 400km
低轨接入卫星	LEO	轨道倾角 90° 高度 500km 起始位置(E 113° N 23°)
无人机	UAV	高度 5km 以 500km/h 向正南飞行 60min
科考船	SHIP	起始位置(W 147° S 14.5°) 以 58km/h 向正东航行
地面站 A	A	E 116° N 42°
地面站 B	B	W 73.9° N 42°

所有用户节点均包含一个业务源,各类业务在业务源之间随机产生。业务的平均包长为 1000bit,最大包长为 3000bit。所有发信机包含一个大小为 1MB 的缓存。ATCR 算法中 A、B、C 类通信量在网络总通信量所占比例分别为 20%,50%,30%。仿真参数如表 3 所列。

表 3 仿真参数

名称	数据	名称	数据
ICL	54Mb/s	$\{\alpha, \beta, \rho\}$	$\{0.3, 0.03, 0.03\}$
ISL	28Mb/s	EFF(n, x)	EFF(10, 0.025)
UDL	2Mb/s	$\{\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3\}$ for class A	$\{0.5, 0.25, 0.25\}$
$\{D_r, B_r, L_r\}$ for class A	$\{0.5, 0.3, 0.003\}$	$\{\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3\}$ for class B	$\{0.25, 0.5, 0.25\}$
$\{D_r, B_r, L_r\}$ for class B	$\{1.5, 0.5, 0.003\}$	$\{\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3\}$ for class C	$\{0.4, 0.3, 0.3\}$
$\{D_r, B_r, L_r\}$ for class C	$\{0.7, 0.3, 0.003\}$	$\{\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3\}$ for MACO	$\{0.4, 0.3, 0.3\}$
$\{D_r, B_r, L_r\}$ for MACO	$\{0.7, 0.3, 0.003\}$	T	5s

5.2 MACO 算法的性能分析

选取位于 DSC_1 的管理节点负责进行的一次路由计算进程,分别用原始 ACO 算法与 MACO 算法进行实验。首先为待计算路由设置一个满意解,然后将表 1 里步骤 2 中判断“算法是否到达最大循环次数 M ”修改为判断“当前 $path(s, d)$ 是否为满意解”。取 $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.5$,得到如图 3 所示的结果。

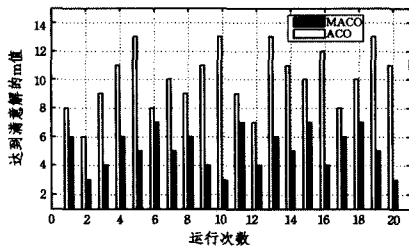


图 3 原始 ACO 算法与 MACO 算法的性能比较

MACO 算法较原始 ACO 算法提高了收敛速度,达到满意解的循环次数小于 8,因此设置 ATCR 算法中的最大循环次数 $M=8$ 。

5.3 ATCR 算法的性能分析

5.3.1 端到端时延

网络总通信量为 8000 packet/s 时,ATCR 与未采用通信量分类的 MACO 算法随时间变化的端到端时延如图 4 所示。

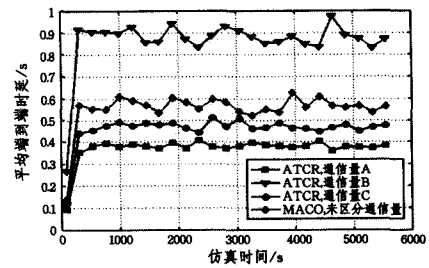


图 4 ATCR 与 MACO 端到端时延变化

ATCR 中的通信量 A 和 C 的端到端时延要小于未采用通信量分类的 MACO 算法,这是由于单一通信量会导致业务的集中,加剧网络的拥塞,而采用通信量分类同样可以使网络流量分布更加均衡。由于时延约束条件较为宽松,ATCR 协议中的通信量 B 端到端时延大于 MACO 算法。

5.3.2 分组递交率

图 5 示出了两种算法分组递交率与网络总通信量之间的关系。

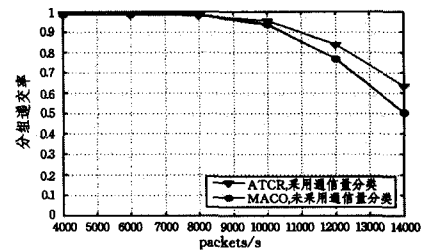


图 5 分组递交率变化

随着网络总通信量的增加,两种算法的分组递交率均有所下降,当通信量超过 10000packet/s 时,递交率下降尤其严重。ATCR 算法的分组递交率全程优于 MACO 算法,这是由于 ATCR 算法有效地平衡了网络中的负载,减少了重负载链路的数量,进而减少了因拥塞引起的丢包。

结束语 本文在分析 DSCN 网络架构特点以及路由策略的基础上,提出了一种适用于 DSCN 的 QoS 路由算法 ATCR。ATCR 算法使用改进的 ACO 算法进行路由计算。仿真实验表明,改进的 ACO 算法较原始的加快了收敛速度,ATCR 算法通信量 A 和 C 的端到端时延要小于未采用通信量分类的 ACO 算法,ATCR 算法在分组递交率上的表现优于 ACO 算法。

参考文献

- [1] Brown O, Eremenko B. The Value Proposition for Fractionated Space Architectures[J]. AAIA Reinventing Space Conference, 2006(7506):1-22
- [2] Orndorff G A, Zink B F, Cosby J D. Clustered Architecture for Responsive Space[J]. AAIA Reinventing Space Conference, 2007(1002):1-14
- [3] Lu Y, Zhao Y, Sun F, et al. Dynamic Fault-tolerant Routing based on FSA for LEO satellite networks[J]. IEEE Transactions on Computers, 2013, 62(10):1945-1958
- [4] Rao Y, Wang R. Agent-based load balancing routing for LEO satellite networks[J]. Computer Networks, 2010, 54(17):3187-3195
- [5] Na Z, Gao Z, Cui Y, et al. Agent-Based Distributed Routing

Algorithm with Traffic Prediction for LEO Satellite Network[J]. International Journal of Future Generation Communication and Networking, 2013, 6(3): 67-84

- [6] Mohorcic M, Svigelj A, Kandus G. Traffic class dependent routing in ISL networks[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2004, 40(4): 1160-1172
- [7] Rao Y, Wang R. Performance of QoS routing using genetic algorithm for Polar-orbit LEO satellite networks[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2011, 65(6): 530-538
- [8] Long F, Sun F, Yang Z. A Novel Routing Algorithm Based on Multi-Objective Optimization for Satellite Networks[J]. Journal of Networks, 2011, 6(2): 238-246

- [9] Werner M, Delucchi C, Vogel H J. ATM-based routing in LEO/MEO satellite networks with inter-satellite links[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1997, 15(1): 69-82
- [10] Ekici E, Akyildiz I F, Bender M D. A distributed routing algorithm for datagram traffic in LEO Satellite networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2001, 9(2): 137-147
- [11] Mohorcic M, Svigelj A, Kandus G. Demographically weighted traffic flow models for adaptive routing in packet-switched non-geostationary satellite meshed networks[J]. Computer Networks, 2003(43): 113-131
- [12] Liao T, Stützle T, Montes de Oca M A, et al. A unified ant colony optimization algorithm for continuous optimization[J]. European Journal of Operational Research, 2014, 234(3): 597-609

(上接第 94 页)

参 考 文 献

- [1] Li S, Murch R D. Realizing Cooperative Multiuser OFDMA Systems with Subcarrier Resource Allocation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(4): 1923-1935
- [2] Ng D W K, Lo E S, Schober R. Energy-efficient resource allocation in OFDMA systems with hybrid energy harvesting base station[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(7): 3412-3427
- [3] Xu Z, Yang C, Li G Y, et al. Energy-efficient configuration of spatial and frequency resources in MIMO-OFDMA systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(2): 564-575
- [4] Navarro-Ortiz J, Ameigeiras P, Lopez-Soler J M, et al. A QoE-Aware Scheduler for HTTP Progressive Video in OFDMA Systems[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(4): 677-680
- [5] 黄高飞, 罗丽平, 张广驰, 等. 具有时延 QoS 保证的 OFDM 中继系统子载波配对与功率分配算法[J]. 电子学报, 2013, 41(2): 335-339
Huang Gao-fei, Luo Li-ping, Zhang Guang-chi, et al. Subcarrier pairing and power allocation algorithm for the OFDM relay system with delay QoS guarantees[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(2): 335-339
- [6] 陈煜, 方旭明, 赵越. 基于能效的解码转发中继 OFDM 链路自适应功率分配方案研究[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(2): 285-290
Chen Yu, Fang Xu-ming, Zhao Yue. Adaptive power allocation scheme for a decode-and-forward OFDM relay link based on energy efficiency[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(2): 285-290
- [7] 赵晓晖, 杨伟伟, 金晓光. 多中继 OFDM 系统选择性子载波中继和功率分配算法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2014, 44(2): 478-484
Zhao Xiao-hui, Yang Wei-wei, Jin Xiao-guang. Selective subcarrier relaying and power allocation algorithm for multirelay-assisted OFDM systems[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2014, 44(2): 478-484
- [8] Huang G, Zhang G, Zheng H, et al. QoS-driven resource allocation scheme for the OFDM amplify-and-forward relay system[C]//2011 7th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM). IEEE, 2011: 1-4
- [9] Wan Q, Ma G. Resource allocation algorithm for heterogeneous services in decode-and-forward OFDM relay system[C]//General Assembly and Scientific Symposium, 2011. URSI, IEEE, 2011: 1-4
- [10] Koshimizu Y, Okamoto E. An efficient channel estimation scheme using Walsh pilots in bi-directional wireless OFDM relay systems with analog network coding[J]. IEICE Transactions on Communications, 2013, 96(8): 2119-2130
- [11] Sanguinetti L, D'Amico A A, Rong Y. On the design of amplify-and-forward MIMO-OFDM relay systems with QoS requirements specified as Schur-convex functions of the MSEs[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(4): 1871-1877
- [12] Simmons D, Halls D, Coon J P. OFDM-based nonlinear fixed-gain amplify-and-forward relay systems: SER optimization and experimental testing[C]//2014 European Conference on Networks and Communications (EuCNC). IEEE, 2014: 1-5
- [13] Shah R A, Rajatheva N, Ji Y. Analysis of BER and capacity for dual-hop OFDM relay system with subcarrier mapping in Nakagami-m fading[C]//2014 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2014: 5089-5094
- [14] Yang W, Cai Y, Yang W, et al. OFDM-based selective decode-and-forward relay systems with ordered subcarrier pairing[C]//2013 International Conference on Information Science and Technology (ICIST). IEEE, 2013: 1268-1271
- [15] Jia N, Feng W, Gafai N B, et al. Adaptive Modulation Based Relay Selection and Power Allocation in Cooperative OFDM Wireless Networks[C]//Proceedings of the Second International Conference on Communications, Signal Processing, and Systems. Springer International Publishing, 2014: 763-771
- [16] Hasan Z, Bhargava V K. Relay Selection for OFDM Wireless Systems under Asymmetric Information: A Contract-Theory Based Approach[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(8): 3824-3837
- [17] 刘圣恩, 肖霖, 杨鼎成. MIMO-OFDM 双向多中继选择的网络资源优化[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2015, 27(1): 20-25
Liu Sheng-en, Xiao Lin, Yang Ding-cheng. Resource optimizing for MIMO-OFDM two-way multi-relay selecting[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition), 2015, 27(1): 20-25