

一种卫星网络容量智能分析方法

徐双¹⁾ 王兴伟²⁾ 黄敏³⁾ 马连博²⁾

¹⁾(东北大学计算机科学与工程学院 沈阳 110819)

²⁾(东北大学软件学院 沈阳 110819)

³⁾(东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110819)

摘要 卫星网络有效地补充了地面网络,并在空间通信和组网中发挥着重要作用.分析卫星网络的容量可以为提高网络效率、增强业务保障能力以及设计高效通信协议等提供重要依据.然而,现有的地面无线网络容量分析方法和现有的在轨卫星与地面站之间上下行链路容量的分析方法都难以直接应用到位于空间的卫星网络容量分析.文中根据卫星网络的特点,提出了一种卫星网络容量智能分析方法,从网络数据传输能力的角度,分析了卫星网络容量.基于星间物理可见性、接收功率、载噪比、卫星可用资源,建立了星际链路有效性模型和网络容量模型;对分布式遗传算法进行了改进,并应用其求解节点分配带宽和功率到星际链路的优化方案,进而得出卫星网络容量上限.基于STK等进行了仿真实验和性能评价.研究表明,节点失效和邻频干扰会导致卫星网络容量下降,星座结构对卫星网络容量影响较大;文中提出的方法具有较高的搜索精度、较低的复杂度、较快的收敛速度和避免早熟的能力,可以有效地计算卫星网络容量上限,性能优于现有的方法.

关键词 卫星网络;网络容量;容量分析;分布式遗传算法

中图分类号 TP393 DOI号 10.11897/SP.J.1016.2017.01572

An Intelligent Analysis Method of Satellite Network Capacity

XU Shuang¹⁾ WANG Xing-Wei²⁾ HUANG Min³⁾ MA Lian-Bo²⁾

¹⁾(School of Computer Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819)

²⁾(School of Software, Northeastern University, Shenyang 110819)

³⁾(School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819)

Abstract Satellite network is an effective supplement of terrestrial network and plays an important role in space communication and networking. Its capacity analysis provides important basis for improving network efficiency, enhancing service guarantee ability and designing efficient communication protocol. However, existing capacity analysis methods for terrestrial wireless networks and up/down links among in-orbit satellites and ground stations are difficult to be directly applied to capacity analysis of satellite networks in space. With the characteristics of satellite networks considered, an intelligent analysis method of satellite network capacity is proposed in this paper. It analyzes satellite network capacity from the viewpoint of data transmission ability. Based on the visibility between satellites, satellite receiving power, carrier noise ratio and available resources, the availability model of inter-satellite links and the network capacity model are built. The distributed genetic algorithm is improved and applied to get the optimal satellite bandwidth and power allocation scheme and then the upper bound of the network capacity

收稿日期:2015-09-21;在线出版日期:2016-05-23. 本课题得到国家自然科学基金(61572123)、国家杰出青年科学基金(71325002, 61225012)、辽宁省百千万人才工程项目(2013921068)、中国科学院科技创新交叉与合作团队计划面向智能电网安全监控及信息互动的网络与系统技术资助徐双,女,1990年生,博士研究生,主要研究方向为空间网络路由与资源管理等. E-mail: xiaoshuang_0320@163.com. 王兴伟(通信作者),男,1968年生,博士,教授,博士生导师,中国计算机学会(CCF)高级会员,主要研究领域为未来互联网、云计算和网络空间安全等. E-mail: wangxw@mail.neu.edu.cn. 黄敏,女,1968年生,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为物流建模与优化和供应链管理等. 马连博,男,1981年生,博士,副教授,主要研究方向为计算智能与机器学习等.

is obtained. It has been implemented by simulation over the STK. Experimental results have shown that node failure and adjacent channel interference can decrease network capacity while constellation structure has great influence on network capacity; the proposed method can efficiently obtain the upper bound of network capacity with high searching precision, low complexity, fast convergence speed and avoiding premature solution, and its performance outperforms the existing methods.

Keywords satellite network; network capacity; capacity analysis; distributed genetic algorithm

1 引言

卫星网络覆盖范围广,通信距离远,传输容量大^[1],对地面环境依赖低,能够有效补充地面网络,在空间通信和组网中发挥着重要作用.根据轨道高度,可以将卫星分为三类:低地轨道(Low Earth Orbit, LEO)卫星、中地轨道(Medium Earth Orbit, MEO)卫星和地球同步轨道(Geosynchronous Earth Orbit, GEO)卫星^[2].位于中低轨道的卫星相对地球运动速度快,通信信号的自由空间损耗及传播延迟小,对终端设备的天线尺寸和发射功率要求低,适用于延迟敏感型应用.位于地球同步轨道的卫星覆盖范围大,与地面站之间的指向关系固定,适用于广播类通信.由位于不同高度轨道的卫星组建成的网络,即多层卫星网络,能够利用不同卫星的特点,实现优势互补,与单层卫星网络相比,具有组网灵活、抗毁性强、功能多样、资源利用率高等特点.然而,随着网络业务量的激增,卫星网络也面临着巨大挑战.

针对卫星网络的研究目前主要集中在星座结构设计、电磁波能量衰减分析、路由协议、网络安全以及卫星网络与新兴技术融合等方面.星座结构决定卫星间的相邻关系、星际链路数量和网络拓扑的变化方式^[3-4].通过分析电磁波传输能量随降雨衰减情况建立降雨衰减模型,可以估计降雨对卫星通信性能的影响情况^[5-7].卫星网络路由技术对网络性能影响很大,已经开展了很多研究,例如,可以提高资源利用率的流量均衡路由策略和可以提供用户服务质量保障的路由机制等^[8-9].卫星网络所处环境开放,易受攻击,为了保障网络安全,需要提供网络认证等机制^[10-11].卫星网络与软件定义网络、网络功能虚拟化等新兴技术的融合,可以进一步提高卫星网络的高效性和灵活性^[12-13],促进其在未来互联网中发挥更大作用.

分析卫星网络容量,不仅有助于提高网络效率

和业务保障能力,而且有助于优化通信协议和路由机制.然而,卫星网络资源有限,卫星处于运动之中,星际链路切换频繁,网络拓扑动态变化,载噪比随信道条件改变,链路容量动态变化,等等,这些因素都给卫星网络容量分析带来严重挑战.目前,对卫星网络、特别是对多层卫星网络容量分析方面的研究工作还比较少,涉及卫星网络容量分析以及节点失效、邻频干扰和星座结构等对网络容量的影响的研究不多.虽然卫星网络属于无线网络,但其不同于地面无线网络的特点使得现有的地面无线网络容量分析方法^[14-21]难以直接应用于卫星网络容量分析.目前面向卫星网络的容量分析方法^[22-27]多集中于分析在轨卫星与地面站之间上下行链路容量,有些方法采用上下行链路容纳的最大用户数刻画网络容量,难以直接应用到位于空间的卫星网络容量分析.受智能优化方法在诸多领域成功应用的启发^[28-29],本文从网络数据传输能力的角度出发,提出了一种卫星网络容量智能分析方法,根据卫星网络的特点,构建了卫星网络容量模型,采用改进的分布式遗传算法求解该模型,并且分析了节点失效、邻频干扰和星座结构等对卫星网络容量的影响.仿真研究表明,本文提出的容量分析方法是可行和有效的.

本文的主要贡献如下:基于星间物理可见性、接收功率、载噪比、卫星可用资源,给出了星际链路有效性约束条件;建立了卫星网络容量模型,对分布式遗传算法^[30-31]进行了改进并应用于卫星网络容量分析问题求解,提高了求解精度,降低了时间开销;分析了节点失效、邻频干扰和星座结构对卫星网络容量的影响,得出了有关结论.

本文第2节介绍相关工作;第3节是问题描述;第4节是方法描述;第5节是仿真与性能分析;第6节是结论.

2 相关工作

关于地面无线网络容量分析已经有很多研究工

作. 文献[14]提出了无线网络的物理模型与协议模型, 在假设节点静止的条件下, 分析了节点数与网络容量的关系. 文献[15]把节点移动性引入到文献[14]提出的模型中, 得出了移动性能够提高网络容量的结论. 文献[16]综合考虑了网络节点的移动性和网络延迟, 推导出移动自组织网络容量的表达式, 建立了延迟和容量的折衷关系曲线. 文献[17]分析了多射频多信道无线网状网的网络容量, 在避免发生信号冲突的约束下, 利用原始对偶优化算法计算了网络容量上限. 文献[18]基于协议模型, 分析信道数量与无线接口数量对网络容量的影响. 文献[19]分析了节点分布、链路数量和链路距离对网络容量的影响. 文献[20]依据认知无线自组织网络的特点, 推导出其容量上限的闭合表达式, 并基于遗传算法提出了一种能够逼近网络容量上限理论值的跨层优化算法. 文献[21]基于香农定理, 把认知无线电网络的频谱分配问题建模为以网络容量最大化为目标的线性规划问题, 提出了一种基于基数树的算法, 用以求解使网络容量最大化的频谱分配方案. 虽然卫星网络属于无线网络, 但其具有明显不同于地面无线网络的特点, 例如, 节点分布稀疏、资源受限、拓扑虽动态变化但具有规律性和可预测性等等, 地面无线网络容量分析方法难以直接应用于卫星网络容量分析.

目前关于卫星网络容量分析的研究工作主要是分析在轨卫星和地面站之间的通信容量, 即卫星网络上下行链路容量. 文献[22]从单位时间内链路容纳最大用户数的角度, 刻画了 WCDMA 同步卫星系统容量; 依据系统干扰模型, 分析了上行链路多址干扰的统计特性; 在考虑小区总数和功率控制影响的前提下, 分析了系统容量. 文献[23]在假设卫星网络地面站和节点资源不受限的前提下, 提出了一种计算在轨卫星与地面站之间链路通信容量的方法. 文献[24]分析了功率受限卫星网络的容量, 并通过使用时间信道来提高网络容量. 文献[25]给出了 Iris 卫星系统的容量评估方法, 根据其覆盖区域内将产生的数据通信量, 评估系统容量. 文献[26]用数学模型描述了在轨卫星与地面站之间通信链路的容量, 分析了卫星部署机制对通信容量的影响. 文献[27]分析了数字波束成形卫星通信系统的链路容量, 提出了求解网络容量上限的多级优化算法. 上述工作面向的是在轨卫星和地面站之间上下行链路的容量分析, 难以直接应用到位于空间的卫星网络容量分析.

已有很多关于智能优化方法的研究工作. 遗传算法^[30]是模拟自然界遗传机制和生物进化理论而形成的一种全局搜索算法, 具有自适应搜索能力, 鲁棒性强, 但也存在运行时间长、易陷入局部最优解等问题^[32]. 文献[30-33]研究了分布式遗传算法, 把单一种群分成多个同时独立进化的子种群, 通过子种群间周期性的个体迁移, 引导搜索向较优方向发展, 不同的分布式遗传算法的子种群组织形式和个体迁移策略有所不同. 文献[34]在遗传算法中引入混合自适应机制, 根据种群进化代数确定是采用固定的还是采用自适应的交叉概率和变异概率, 并且引入黄金分割率计算自适应交叉概率和变异概率, 以解决早熟和运算时间长的的问题. 文献[35]将分布式遗传算法和级联模型结合, 设置中心监控器观察每个子种群的进化程度, 据此对迁移个体的选择以及相应子种群的规模进行调整, 改善了算法的求解速度和质量. 人工蜂群算法^[36]模拟蜜蜂觅食行为, 食物源位置代表问题解, 雇佣蜂和观察蜂开采食物源, 侦查蜂随机寻找新的食物源, 具有较强的搜索和跳出局部最优解的能力. 萤火虫算法^[37]模拟萤火虫的趋光性行为, 通过萤火虫间的彼此吸引和移动寻找问题解, 具有较高的寻优精度和较快的收敛速度. 燕子群优化算法^[38]模拟燕子群飞行、捕食和躲避天敌的行为, 探索燕子搜索问题空间, 领队燕子引导运动方向, 无目标燕子随机搜索被忽略的问题空间, 三种燕子相互协作搜索最优解, 具有收敛速度快且不易陷入局部最优解的优点. 由于分布式遗传算法具有时间效率高和求解质量好等优点, 本文在对其子种群组织结构、迁移策略和进化参数调整策略进行改进后, 应用其求解网络容量上限.

智能优化方法已经在很多领域得到成功应用, 如网络路由、云资源管理、控制器放置等. 文献[39]设计了一种基于生物启发的无线自组织网络服务质量路由算法, 应用群体智能规则来维护路由信息, 借鉴生物学中的协同机制来减少控制流数量. 文献[40]提出了一种基于多机器人导航的自组织网络服务质量路由算法, 以寻找满足用户服务质量需求且实现用户效用和网络提供商效用均衡的路由. 文献[41]提出了一种基于逆向拍卖的云资源分配机制, 并使用改进的免疫进化算法求得优化的云资源分配方案. 文献[42]提出了一种基于智能优化和微观经济学的云服务动态资源分配方法, 使用改进的稻田算法求解胜标确定问题. 文献[43]采用帕累托模拟退火算法求解大规模软件定义网络中的控制器放置

问题. 上述研究面向的领域不同于卫星网络, 没有考虑卫星网络的特点, 因此难以直接应用于卫星网络容量分析.

3 问题描述

3.1 网络模型

本文采用图 1 所示的多层卫星网络结构模型. 它由 GEO、MEO、LEO 三层卫星组成, GEO 卫星覆盖 MEO 卫星和 LEO 卫星, LEO 卫星在 MEO 卫星覆盖范围内, 星间靠星际链路互连. 星际链路分为轨间链路和星间链路. 轨间链路包括 GEO 卫星与 MEO 卫星之间、GEO 卫星与 LEO 卫星之间以及 MEO 卫星与 LEO 卫星之间建立的链路. 星间链路包括 GEO 卫星之间、MEO 卫星之间以及 LEO 卫星之间建立的链路. 由于多层卫星网络中星际链路切换频繁, 网络容量随之变化, 因此本文将时间离散化为多个时隙, 每个时隙内的卫星网络拓扑视为静态拓扑, 以简化网络容量分析过程. 下面的分析均是针对每个时隙内的卫星网络而言.

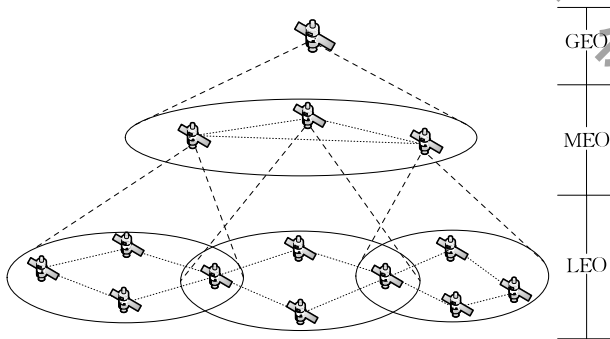


图 1 GEO/MEO/LEO 卫星网络结构

本文采用连通图 $G=(V, E, D)$ 建模卫星网络. 其中, $V=\{v_i | i \in \{1, 2, \dots, n\}\}$ 表示卫星节点集合, n 为卫星节点数; $E=\{e_{ij} | i, j \in \{1, 2, \dots, n\}\}$ 表示星际链路集合, e_{ij} 表示 v_i 与 v_j 之间的星际链路; $D=\{d_{ij} | i, j \in \{1, 2, \dots, n\}\}$ 表示星际链路长度的集合, d_{ij} 表示 e_{ij} 的长度. 假设有 m_i 个卫星节点 $v_{i_1}, \dots, v_{i_{m_i}}$ 与 v_i 相连, 则 v_i 与 v_{i_k} 之间的星际链路记作 e_{ii_k} , e_{ii_k} 的长度记作 d_{ii_k} , $k \in \{1, 2, \dots, m_i\}$, $e_{ii_k} \in E, d_{ii_k} \in D$.

3.2 链路有效性

本文从 4 个方面分析星际链路的有效性.

(1) 星间物理可见性

星间通信只能在视距范围内进行, 因此星间物理可见是星际链路建立的基本条件. 当两颗卫星被天体阻隔时, 二者之间不能建立星际链路. 在多层卫

星网络中, GEO 卫星与地面距离最远, 但该距离远小于其他天体到地球表面的距离, 卫星之间的可见性取决于其间的视线是否被地球遮挡. 如图 2 所示, 通过 v_i 的地心线与地球切线间的夹角记为 δ_i , 称为 v_i 的最小可见角; v_i 和 v_{i_k} 间的连线与通过 v_i 的地心线之间的夹角记为 θ_{ii_k} , 称为 v_i 相对于 v_{i_k} 的观测角; r_i 为 v_i 与地心 o_e 间的距离; e_{ii_k} 的长度 d_{ii_k} 为 v_i 与 v_{i_k} 之间的距离, 则满足图 2 中 (a) 和 (b) 任意一个条件即为星间物理可见, 表示如下:

$$(\theta_{ii_k} > \delta_i) \vee ((\theta_{ii_k} \leq \delta_i) \wedge (d_{ii_k} < r_i)) \quad (1)$$

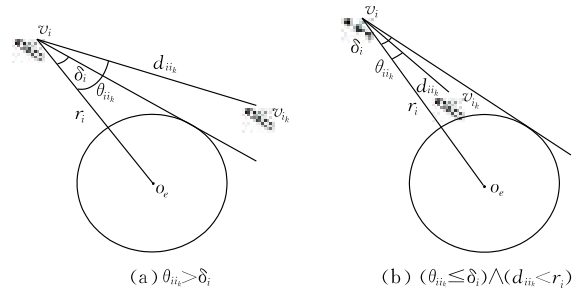


图 2 星间物理可见条件

(2) 接收功率

星间链路通信的主要形式为微波无线通信, 属于自由空间传播, 如图 3 所示. 假设 v_i 和 v_{i_k} 分别为发送卫星和接收卫星, 则双方通信时 v_{i_k} 的接收信号功率 $Power_{i_k}^{receive}$ 由 v_i 所需分配到 e_{ii_k} 上的天线发送功率 $Power_{i_k}^{required}$ 、 v_i 的天线发送增益 $Gain_i^{transmit}$ 和 v_{i_k} 的天线接收增益 $Gain_{i_k}^{receive}$ 确定如下:

$$Power_{i_k}^{receive} = \frac{Gain_i^{transmit} \times Gain_{i_k}^{receive} \times Power_{i_k}^{required}}{Loss_{ii_k}} \quad (2)$$

$$Loss_{ii_k} = \left(\frac{4\pi d_{ii_k}}{\lambda} \right)^2 \quad (3)$$

其中, $Loss_{ii_k}$ 为信号通过 e_{ii_k} 传播时的自由空间传播损耗, λ 为通信信号波长.

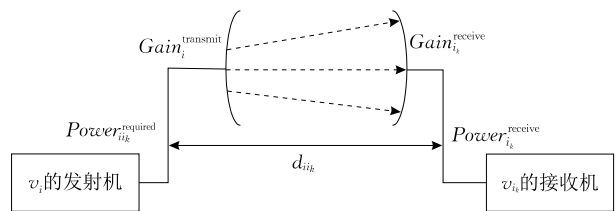


图 3 卫星通信链路

由于卫星接收机物理条件的限制, 因此仅当卫星节点 v_{i_k} 的接收信号功率 $Power_{i_k}^{receive}$ 不低于其阈值 $Power_{i_k}^{threshold}$ 时, 它才能正常接收并解码信号.

(3) 载噪比

载噪比指星际链路接收端的载波功率与加性噪

声功率的比值. 如图 3 所示, e_{i_k} 的载噪比 CNR_{i_k} 计算如下:

$$CNR_{i_k} = \frac{Power_{i_k}^{receive}}{Noise_{i_k}^{total}} \quad (4)$$

其中, $Noise_{i_k}^{total}$ 为 e_{i_k} 上的加性噪声功率. 在加性噪声功率中, 本文主要考虑卫星链路的背景噪声功率和白噪声功率, 对 $Noise_{i_k}^{total}$ 有

$$Noise_{i_k}^{total} = Noise_{i_k}^{background} + Noise_{i_k}^{white} \quad (5)$$

其中, $Noise_{i_k}^{background}$ 表示卫星链路的背景噪声功率, $Noise_{i_k}^{white}$ 为 e_{i_k} 上的白噪声功率.

根据无线信道白噪声功率与信道带宽之间的关系^[44], 可推出卫星链路的白噪声功率的计算公式如下:

$$Noise_{i_k}^{white} = N_0^{white} \times Bandwidth_{i_k}^{required} \quad (6)$$

其中, N_0^{white} 为卫星链路的白噪声功率谱密度, $Bandwidth_{i_k}^{required}$ 为 v_i 建立 e_{i_k} 所需分配的信道带宽. 显然, 卫星链路信道带宽增加会导致白噪声功率增加.

对于卫星网络而言, 由于载噪比影响星际链路的数据传输速率和误码率, 决定卫星通信链路的传播质量, 因此为满足应用的服务质量需求, e_{i_k} 的载噪比 CNR_{i_k} 不得低于其阈值 $CNR_{i_k}^{threshold}$.

(4) 可用资源

信道带宽和功率是建立星际链路的必要资源, 影响链路通信质量. 然而, 卫星节点资源受限, 每颗卫星的信道带宽总量和功率总量均为定值, 建立星际链路所需分配的信道带宽和发送功率需不高于节点的可用信道带宽和功率.

假设 v_i 的信道带宽总量和功率总量分别为 $Bandwidth_i^{total}$ 和 $Power_i^{total}$, 则 v_i 建立星际链路 e_{i_k} 所需分配的信道带宽 $Bandwidth_{i_k}^{required}$ 和发送功率 $Power_{i_k}^{required}$ 需不高于 v_i 的可用带宽 $Bandwidth_i^{available}$ 和可用功率 $Power_i^{available}$.

本文称能够建立且满足应用服务质量要求的星际链路为有效星际链路. 星际链路 e_{i_k} 有效性约束条件如下:

$$\begin{aligned} & (\theta_{i_k} > \delta_i) \vee ((\theta_{i_k} \leq \delta_i) \wedge (d_{i_k} < r_i)), \\ & Bandwidth_{i_k}^{required} \leq Bandwidth_i^{available}, \\ & Power_{i_k}^{required} \leq Power_i^{available}, \\ & Power_{i_k}^{receive} \geq Power_{i_k}^{threshold}, \\ & CNR_{i_k} \geq CNR_{i_k}^{threshold} \end{aligned} \quad (7)$$

定义星际链路 e_{i_k} 有效性度量 $Valid_{i_k}^{link}$ 如下:

$$Valid_{i_k}^{link} = \begin{cases} 1, & \text{满足式(7)} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (8)$$

3.3 网络容量模型

满足链路有效性约束条件的星际链路 e_{i_k} 单位时间内传输的数据量记作 C_{i_k} , 其最大值定义为星际链路容量, C_{i_k} 计算如下:

$$C_{i_k} = Bandwidth_{i_k}^{required} \log_2 \left(1 + \frac{Power_{i_k}^{required} \times Gain_i^{transmit}}{Noise_{i_k}^{total}} \right) \quad (9)$$

卫星节点 v_i 单位时间内传输的数据量记作 λ_i , 其最大值定义为卫星节点吞吐量, λ_i 计算如下:

$$\lambda_i = \sum_{k=1}^{m_i} C_{i_k} \quad (10)$$

卫星网络单位时间内传输的数据量记作 NC , 其最大值定义为卫星网络容量, NC 计算如下:

$$NC = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (11)$$

根据式(9)~(11), 可以进一步得出 NC 的详细计算公式如下:

$$NC = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{m_i} \left(Bandwidth_{i_k}^{required} \times \log_2 \left(1 + \frac{Power_{i_k}^{required} \times Gain_i^{transmit}}{Noise_{i_k}^{total}} \right) \right) \quad (12)$$

根据式(12), 不同的网络资源分配方案得到的网络容量不同. 把节点优化分配信道带宽和功率到星际链路所得的网络容量的最大值作为网络容量上限, 数学描述如下:

$$\begin{aligned} & \text{maximize } NC \\ & \text{s. t. } \begin{cases} \sum_{k=1}^{m_i} Bandwidth_{i_k}^{required} \leq Bandwidth_i^{total} \\ \sum_{k=1}^{m_i} Power_{i_k}^{required} \leq Power_i^{total} \\ Valid_{i_k}^{link} = 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (13)$$

4 方法描述

本文对分布式遗传算法^[30-31]进行了改进并使用它寻找信道带宽和功率优化分配方案, 进而得出网络容量上限. 在改进的分布式遗传算法中, 把单一种群分解成多个独立进化的子种群, 保证了种群的多样性; 定义了新的迁移算子, 引入了高效的个体迁移策略, 增强了个体进化的差异性; 重新定义了交叉、变异和选择算子, 引入了进化参数自适应调整策略, 增强了算子的全局搜索能力, 进而提高了算法收

敛速度和求解精度,缓解了早熟收敛问题。

4.1 解的编码与初始化

本文将节点对其链路的信道带宽和功率分配比例作为问题的解,对应于分布式遗传算法中的个体。个体采用浮点数编码方式,表示如下:

$$I = \{(Rb_{11}, \dots, Rb_{1m_1}), (Rp_{11}, \dots, Rp_{1m_1}), \dots, (Rb_{n1}, \dots, Rb_{nm_n}), (Rp_{n1}, \dots, Rp_{nm_n})\} \quad (14)$$

其中, I 是解, Rb_{ik} 和 Rp_{ik} 分别表示 v_i 分配给 e_{ik} 的信道带宽和功率占 v_i 信道带宽总量和功率总量的比例。 $Rb_i = (Rb_{i1}, \dots, Rb_{im_i})$ 和 $Rp_i = (Rp_{i1}, \dots, Rp_{im_i})$ 组成个体的基因 $R_i = (Rb_{i1}, \dots, Rb_{im_i}, Rp_{i1}, \dots, Rp_{im_i})$, 对基因中的 Rb_{ik} 和 Rp_{ik} 随机赋 0 到 1 之间的值,且

$$\sum_{k=1}^{m_i} Rb_{ik} = 1 \text{ 和 } \sum_{k=1}^{m_i} Rp_{ik} = 1.$$

4.2 适值函数

本文在个体的适值函数定义中引入罚值处理个体违反约束条件的情况,即通过惩罚来降低个体的适值。适值函数 $F(I)$ 如下:

$$F(I) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{m_i} (Valid_{ik}^{link} \times C_{ii_k}) - \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{m_i} \left((1 - Valid_{ik}^{link}) \times \mu \times \left(1 - \frac{CNR_{ii_k}}{CNR_{ii_k}^{threshold}} \right) \times C_{ii_k} \right) \quad (15)$$

其中, μ 为惩罚因子; $Power_{ii_k}^{required}$ 和 $Bandwidth_{ii_k}^{required}$ 分别计算如下:

$$Power_{ii_k}^{required} = Rp_{ik} \times Power_i^{total} \quad (16)$$

$$Bandwidth_{ii_k}^{required} = Rb_{ik} \times Bandwidth_i^{total} \quad (17)$$

式(15)前半部分是有效星际链路容量之和,后半部分是罚值。显然,个体适值越大,对应解的质量越高。

4.3 迁移算子

设种群规模为 S , 划分为 l^2 个规模为 s 的子种群, $S = s \times l^2$ 。本文采用如图 4 所示的结构^[45]排列这些子种群,其中,每个节点表示一个子种群,黑色节点为当前子种群,灰色节点为东西南北 4 个相邻子种群,每个子种群仅与其相邻子种群进行个体迁移。当前子种群与其相邻子种群构成子种群邻域。

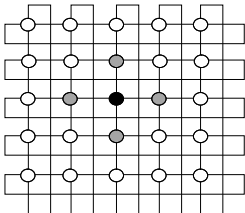


图 4 子种群排列结构

每个子种群独立执行交叉、变异和选择操作,每执行 T_{th} 次(T_{th} 是迁移周期),选出最优个体作为新一代迁移个体,比较该个体与其相邻子种群中的最差个体的适应值,若其较优,则执行迁移操作,即用其代替最差个体,否则不进行迁移。所有迁移到相邻子种群的个体不能作为该相邻子种群的新一代迁移个体回迁至原子种群。

采用这样的迁移策略,不仅保证了子种群间遗传信息的交流,有利于充分搜索解空间,从而找到全局最优个体,而且防止降低子种群多样性,有利于避免因搜索陷入局部最优解而进入早熟状态。

以子种群中的最优个体代表其进化水平,将每个子种群的迁移个体与其相邻子种群的迁移个体进行比较,据此确定子种群邻域中 5 个子种群的进化水平排序,根据子种群的排名,确定其交叉、变异和选择操作的参数。

4.4 交叉算子

交叉过程模拟了生物繁殖的基因重组过程,通过部分父代个体基因的替换重组,实现父代优良基因的遗传,获得较优的子代个体。设交叉概率 $P_{crossover}$ 和交叉因子 α ($0 \leq \alpha \leq 1$),则由父代基因 R_i^1 和 R_i^2 交叉产生子代基因 $R_i^{1'}$ 和 $R_i^{2'}$ 的实现方法如下:

$$\begin{cases} R_i^{1'} = (1 - \alpha) \times R_i^1 + \alpha \times R_i^2 \\ R_i^{2'} = \alpha \times R_i^1 + (1 - \alpha) \times R_i^2 \end{cases} \quad (18)$$

$P_{crossover}$ 和 α 的取值根据当前子种群在其子种群邻域中的进化水平即其排名进行自适应调整。若其排名领先,则减小 $P_{crossover}$ 和 α ,以提高搜索精度,增加稳定性;否则,提高 $P_{crossover}$ 和 α ,以扩大进化范围,降低稳定性。

用 z 表示当前子种群在其子种群邻域中的排名, $z \in \{1, 2, \dots, 5\}$,则 $P_{crossover}$ 和 α 的调整公式如下:

$$P_{crossover} = P_{crossover}^{min} + (P_{crossover}^{max} - P_{crossover}^{min}) \times \frac{z - z_{min}}{z_{max} - z_{min}} \quad (19)$$

$$\alpha = \alpha_{min} + (\alpha_{max} - \alpha_{min}) \times \frac{z - z_{min}}{z_{max} - z_{min}} \quad (20)$$

其中, $P_{crossover} \in [P_{crossover}^{min}, P_{crossover}^{max}]$, $\alpha \in [\alpha_{min}, \alpha_{max}]$, $P_{crossover}^{min}$ 和 $P_{crossover}^{max}$ 分别是预设的交叉概率最小值和最大值, α_{min} 和 α_{max} 分别是预设的交叉因子最小值和最大值, $z_{min} = 1$, $z_{max} = 5$ 。

4.5 变异算子

变异过程模拟了生物进化过程中的基因突变现象,即改变个体部分基因产生新个体,以保证个体的多样性和对解空间的随机搜索能力。按变异概率

P_{mutate} 随机选择个体 I 的基因进行变异,发生变异的基因的取值方式同 4.1 节.个体 I 变异后,得到新个体 I' .若 I' 的适值优于 I ,则用 I' 替换 I ,否则不替换.

P_{mutate} 的取值根据当前子种群的排名进行自适应调整.若其排名领先,则减小 P_{mutate} ,以提高搜索能力;否则,增大 P_{mutate} ,以提高个体多样性. P_{mutate} 的调整公式如下:

$$P_{mutate} = P_{mutate}^{\min} + (P_{mutate}^{\max} - P_{mutate}^{\min}) \times \frac{z - z_{\min}}{z_{\max} - z_{\min}} \quad (21)$$

其中, $P_{mutate} \in [P_{mutate}^{\min}, P_{mutate}^{\max}]$, P_{mutate}^{\min} 和 P_{mutate}^{\max} 分别是预设的变异概率的最小值和最大值.

4.6 选择算子

选择过程模拟自然界的适者生存.设当前子种群中有 s 个个体,执行交叉操作后产生了 s' 个新个体.根据个体适值,从这 $s+s'$ 个个体中先选出 p 个最优个体,再从剩余个体中随机选出 $s-p$ 个个体,组成规模为 s 的下一代子种群.选择操作可以发挥优秀个体的导向作用,有利于加快收敛速度.

4.7 方法流程

算法 1. 卫星网络容量上限计算方法.

输入: $G=(V, E, D)$; 卫星节点参数; 子种群规模 s , 子种群数量 l^2 , 交叉概率、交叉因子、变异概率的取值范围 $[P_{crossover}^{\min}, P_{crossover}^{\max}]$ 、 $[\alpha_{\min}, \alpha_{\max}]$ 、 $[P_{mutate}^{\min}, P_{mutate}^{\max}]$, 交叉操作生成新个体数 s' , 选择操作保留最优个体数 p , 迁移周期 T_{th} 和最大迭代次数阈值 T_{end}

输出: 卫星网络容量上限值 NC_{max}

1. BEGIN
2. 初始化子种群 $P_t, IS_{tbest}^{\text{upper}} = \emptyset, t=1, \dots, l^2$;
3. 根据式(15)选出所有 P_t 的最优个体 I_{tbest}^{upper} (可能多个), 放入精英集合 $IS_{tbest}^{\text{upper}}$; $P_{crossover}^t = P_{crossover}^{\max}, \alpha_t = \alpha_{\max}, P_{mutate}^t = P_{mutate}^{\max}$, 迭代次数 $it=1$;
4. WHILE $it \leq T_{end}$ DO
5. FOR $t=1$ TO l^2 DO
6. 根据 4.4 节对 P_t 执行交叉操作;
7. 使用堆排序方法对 P_t 中的个体按照适值由大到小排序;
8. 根据 4.6 节对 P_t 执行选择操作, 组成下一代子种群 P'_t ;
9. 根据 4.5 节对 P'_t 执行变异操作;
10. END FOR
11. FOR $t=1$ TO l^2 DO
12. 从 P'_t 中选出最优个体 I_{tbest}^{upper} (可能多个);
13. IF I_{tbest}^{upper} 的适值优于 I_{tbest}^{upper} 的适值 THEN
14. 用 I_{tbest}^{upper} 替换 $IS_{tbest}^{\text{upper}}$ 中的原有元素;

15. END IF
16. IF I_{tbest}^{upper} 的适值等于 I_{tbest}^{upper} 的适值 THEN
17. 把 I_{tbest}^{upper} 放入 $IS_{tbest}^{\text{upper}}$;
18. END IF
19. 根据 4.3 节执行迁移操作;
20. 根据 4.4 节和 4.5 节自适应调整 $P_{crossover}^t, \alpha_t$ 和 P_{mutate}^t ;
21. END FOR
22. $it++$;
23. END WHILE
24. IF $IS_{tbest}^{\text{upper}}$ 中只有一个元素 I_{tbest}^{upper} THEN
25. 使用 I_{tbest}^{upper} 作为最优解;
26. ELSE
27. 任选其中的一个元素 I_{tbest}^{upper} 作为最优解;
28. END IF
29. 计算网络容量上限值 NC_{max} ;
30. RETURN NC_{max} ;
31. END

5 仿真与性能分析

本文基于 STK^[46] 和 Visual C++ 6.0 仿真实现了上述方法,分析了节点失效、邻频干扰和星座结构对网络容量的影响,进行了性能评价.仿真时,设置时间间隔为 10 min,仿真时间为 24 h,取所有时隙的网络容量上限均值作为网络容量上限值.

5.1 影响因素分析

本文采用星座结构 I(表 1)、卫星参数(表 2)、仿真参数(表 3),通过仿真实验结果,分析节点失效和邻频干扰对卫星网络容量上限的影响.在本文的多层卫星网络中, GEO 卫星和 MEO 卫星作为主干节点, LEO 卫星作为接入节点,前两者出现失效或者受到邻频干扰时对网络容量的影响比后者更大,因此仿真时仅选取 GEO 卫星和 MEO 卫星作为失效节点和邻频干扰目标.

表 1 星座结构 I

参数	GEO 卫星	MEO 卫星	LEO 卫星
长半轴/km	42166	27878	8378
偏心率	0	0	0
轨道倾角/(°)	0	55	55
升交点赤经/(°)	0	0;120;240	0;120;240
近地点幅角/(°)	0	0	0
真近点角/(°)	16,136,256	0;120;240	80,200,320; 80,200,320; 80,200,320
卫星数	3	3	9
平面数	1	3	3

表 2 卫星节点参数

参数	GEO 卫星	MEO 卫星	LEO 卫星
最大功率/kw	20	10	5
最大信道带宽/MHz	60	50	30
发送增益/dB	52.5	52.5	52.5
接收增益/dB	37.5	37.5	37.5

表 3 容量分析方法仿真参数

参数	取值	参数	取值
载噪比阈值/dB	30	接收功率阈值/dB	-100
邻频干扰/dB	-120	子种群规模	40
最小交叉概率	0.5	最大交叉概率	0.9
最小交叉因子	0.1	最大交叉因子	0.5
最小变异概率	0.1	最大变异概率	0.5
最大迭代次数	300	子种群数量	81
交叉个体数	20	迁移周期	10
惩罚因子	1000	保留最优个体数	10
背景噪声/dB	-130	白噪声功率谱密度/dBW/Hz	-220

分别计算卫星网络所有节点都正常工作、一颗 GEO 卫星失效、一颗 MEO 卫星失效时的网络容量上限值,对比结果如表 4 所示.可以看出,节点失效对网络容量影响显著,导致网络容量明显下降.由于 GEO 卫星的信道带宽和功率资源多于 MEO 卫星,因此其失效对网络容量的影响比 MEO 卫星失效更严重,网络容量下降幅度更大.

表 4 节点失效对网络容量的影响

指标	结果	
	正常	GEO 失效:MEO 失效
网络容量上限值	1:0.88:0.91	

分别计算卫星网络所有节点都未受干扰、一颗 GEO 卫星受到邻频干扰、一颗 MEO 卫星受到邻频干扰时的网络容量上限值,对比结果如表 5 所示.可以看出,邻频干扰影响网络容量,导致网络容量下降,且 GEO 卫星受到干扰与 MEO 卫星受到干扰对网络容量的影响程度差别不大.同节点失效相比,邻频干扰的影响小,这主要是因为当卫星节点受到邻频干扰时,其被选为目的节点的概率减小,从而缓解了邻频干扰对网络容量的影响.

表 5 邻频干扰对网络容量的影响

指标	结果	
	正常	GEO 干扰:MEO 干扰
网络容量上限值	1:0.94:0.95	

为了分析星座结构对网络容量的影响,本文在卫星层数、每层卫星数、卫星参数、仿真时间和时隙间隔均相同的情况下,对比表 1 和表 6 两种不同星座结构下卫星网络容量上限值,对比结果如表 7 所示.可以看出,两种星座结构下的网络容量上限差异

较大而且星座结构 I 下的上限明显高于星座结构 II.主要原因是星座结构 I 的星际链路平均距离较小,而星座结构 II 的星际链路平均距离较大,卫星网络采用星座结构 I 时信号的自由空间传播损耗较小.

表 6 星座结构 II

参数	GEO 卫星	MEO 卫星	LEO 卫星
长半轴/km	42166	20000	7078
偏心率	0	0	0
轨道倾角/(°)	0	55	55
升交点赤经/(°)	0	60;180;300	0;120;240
近地点幅角/(°)	0	0	0
真近点角/(°)	16,136,256	60;180;300	80,200,320; 80,200,320; 80,200,320
卫星数	3	3	9
平面数	1	3	3

表 7 星座结构对网络容量的影响

指标	结果	
	星座结构 I	星座结构 II
网络容量上限值	1:0.88	

5.2 性能对比

为了评价本文提出的方法的性能,在星座结构 I 中所有节点都正常工作的情况下,选用文献[34]中基于黄金分割率的混合自适应遗传算法、文献[35]中的分布式遗传算法和文献[36]中的人工蜂群算法作为对比方法,分别求解卫星网络容量上限值.上述 4 种方法分别记为方法 1、方法 2、方法 3、方法 4,对比结果如图 5 所示.

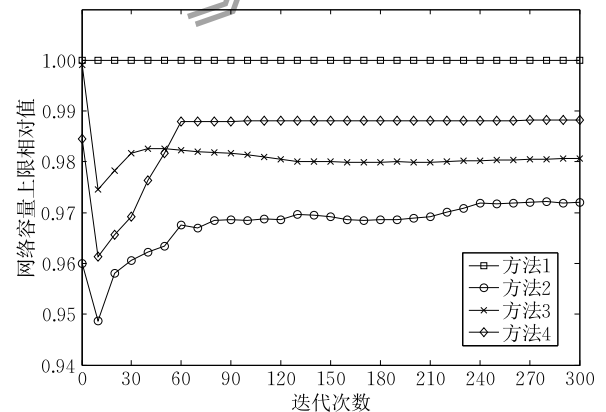


图 5 网络容量上限相对值对比

可以看出,方法 1 求得的上限值最优,其后依次为方法 4、方法 3、方法 2.主要原因如下:虽然方法 2 采用了遗传参数的自适应调整策略,加快了收敛速度,但也增加了陷入局部最优解的可能性;方法 3 采用分布式遗传算法,结合级联模型,改善了求解质

量;方法 4 中的侦查蜂能够随机搜索新食物源,降低了陷入局部最优的可能性,但进化后期收敛速度慢;方法 1 采用了有效的个体迁移策略,全局搜索和跳出局部最优解的能力强,不仅搜索精度高,而且有效避免了早熟。

以方法 2 收敛到的最优解作为参考值,分别统计 4 种方法收敛到对应最优解所需的迭代次数,对比结果如表 8 所示。可以看出,方法 1 收敛速度最快,其后依次为方法 4、方法 3、方法 2。主要原因如下:同方法 2 采用单一个体进化相比,方法 3 将单一个体划分为多个并行进化的子种群,收敛更快;方法 4 的个体间能够相互协作,且观察蜂能够选择性地跟随较优的雇佣蜂,加快了收敛速度,优于方法 2 和方法 3;方法 1 不仅继承了多个子种群并行进化的优点,而且其遗传参数能够自适应调整,兼具方法 2 和方法 3 的优点,优于其他方法。

表 8 迭代次数对比

指标	结果
	方法 1:方法 2:方法 3:方法 4
迭代次数	0.17:1:0.43:0.27

使用上述 4 种方法运行 100 次,分别计量求得网络容量上限的运行时间,得出平均运行时间,对比结果如表 9 所示。可以看出,方法 1 求解网络容量上限所需的平均运行时间低于方法 2、方法 3 和方法 4 所需的时间,说明方法 1 的求解速度快,时间复杂度低,计算开销小。主要原因如下:方法 2 易陷入局部最优,方法 3 进化停止早,因此两者搜索到最优解所需时间长;方法 4 的全局收敛能力和局部收敛能力不均衡,在接近最优解时,经常出现重复搜索;方法 1 全局搜索和局部搜索能力均衡,可以快速搜索到最优解。

表 9 平均运行时间

指标	结果
	方法 1:方法 2:方法 3:方法 4
平均运行时间	1:1.49:1.61:1.26

综上,方法 1 不仅求解质量高,而且运行开销低,可以更好地满足卫星网络容量分析的需要。

6 结 论

卫星网络容量分析有助于提高网络效率和业务保障能力。本文根据卫星网络的特点,提出了一种卫星网络容量智能分析方法,使用改进的分布式遗传算法,求解网络容量上限。通过仿真实验,分析了节

点失效、邻频干扰和星座结构对卫星网络容量的影响,评价了本文方法的性能。研究表明,本文方法是可行和有效的,具有求解质量高和运行开销低等优点。在实际应用背景下验证并改进本文方法的实用性是今后研究工作的重点。

参 考 文 献

- [1] Liu Guo-Liang, Rong Kun-Bi. Satellite Communication. Xi'an: Xidian University Press, 2001(in Chinese)
(刘国梁, 荣昆璧. 卫星通信. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001)
- [2] Mukherjee J, Ramamurthy B. Communication technologies and architectures for space network and interplanetary Internet. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(2): 881-897
- [3] Lo M W. Satellite-constellation design. Computing in Science and Engineering, 1999, 1(1): 58-67
- [4] James R W, Wiley J L. Space Mission Analysis and Design. 3rd Edition. Boston, USA: Kluwer Academic Publishers, 1999
- [5] Al-Mosawi M, Khusainov R, Gremont B. Rain granularity effects on bandwidth demand for faded DVB-RCS systems. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2015, 33(3): 241-257
- [6] Abdulrahman Y, Rahman T A, Islam R M, et al. Comparison of measured rain attenuation in the 10.982-GHz band with predictions and sensitivity analysis. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2015, 33(3): 185-195
- [7] Badron K, Ismail A F, Islam M R, et al. A modified rain attenuation prediction model for tropical V-band satellite earth link. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2015, 33(1): 57-67
- [8] Lu Yong, Sun Fu-Chun, Zhao You-Jian. Virtual topology for LEO satellite networks based on earth-fixed footprint mode. IEEE Communications Letters, 2013, 17(2): 357-360
- [9] Lu Yong, Zhao You-Jian, Sun Fu-Chun, et al. Routing techniques on satellite networks. Journal of Software, 2014, 25(5): 1085-1100(in Chinese)
(卢勇, 赵有健, 孙富春等. 卫星网络路由技术. 软件学报, 2014, 25(5): 1085-1100)
- [10] Zhang Yuan-Yuan, Chen Jian-Hua, Huang Bao-Jun. An improved authentication scheme for mobile satellite communication systems. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2015, 33(2): 135-146
- [11] Tsai Jia-Lun, Lo Nai-Wei, Wu Tzong-Chen. Secure anonymous authentication scheme without verification table for mobile satellite communication systems. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2014, 32(5): 443-452
- [12] Bao Jin-Zhen, Zhao Bao-Kang, Yu Wan-Rong, et al. OpenSAN: A software-defined satellite network architecture

- //Proceedings of the ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM 2014). Chicago, USA, 2014; 17-22
- [13] Bertaux L, Medjah S, Berthou P, et al. Software defined networking and virtualization for broadband satellite networks. *IEEE Communication Magazine*, 2015, 53(3): 54-60
- [14] Gupta P, Kumar P R. The capacity of wireless networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2000, 46(2): 388-404
- [15] Grossglauser M, Tse D. Mobility increases the capacity of Ad-hoc wireless networks//Proceedings of the 20th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. New York, USA, 2001, 3: 1360-1369
- [16] Neely M J, Modiano E. Capacity and delay tradeoffs for Ad hoc mobile networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2005, 51(6): 1917-1937
- [17] Kodialam M, Nandagopal T. Characterizing the capacity region in Multi-Radio Multi-Channel wireless mesh networks//Proceedings of the 11th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking Eleventh Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Cologne, Germany, 2005; 73-87
- [18] Kyasanur P, Vaidya N H. Capacity of multichannel wireless networks under the protocol model. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2009, 17(2): 515-527
- [19] Mao G Q, Anderson B D. Capacity of large wireless networks with generally distributed nodes. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(3): 1678-1691
- [20] Yang Shuang-Mao, Guo Wei, Tang Wei. A cross-layer throughput-maximization algorithm for cognitive wireless Ad Hoc networks. *Chinese Journal of Computers*, 2012, 25(3): 491-503(in Chinese)
(杨双懋, 郭伟, 唐伟. 一种最大化网络吞吐量的认知无线 Ad Hoc 网络跨层优化算法. *计算机学报*, 2012, 25(3): 491-503)
- [21] Yousefvand M, Khorsandi S, et al. Radix-tree based spectrum allocation model for cognitive radio networks maximizing network capacity//Proceedings of the IEEE 14th International Conference on Communication Technology. Chengdu, China, 2012; 16-21
- [22] Wu Sheng, Kuang Lin-Ling, Ni Zu-Yao, Lu Jian-Hua. Uplink multiple access interference and capacity of WCDMA GEO satellite communication system. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2010, 50(10): 1660-1663(in Chinese)
(吴胜, 匡麟玲, 倪祖耀, 陆建华. WCDMA 同步卫星通信系统的上行多址干扰与容量. *清华大学学报(自然科学版)*, 2010, 50(10): 1660-1663)
- [23] Spangelo S C, Cutler J W, Klesh A T, et al. Models and tools to evaluate space communication network capacity. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, 48(3): 2387-2404
- [24] Morabito G. Increasing capacity through the use of the timing channel in power-constrained satellite networks//Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications. Anchorage, USA, 2007; 580-588
- [25] Rokitansky C, Ehammer M, Graupl T. Communication capacity assessment for the Iris satellite system//Proceedings of the Digital Avionics Systems Conference. Paul, USA, 2008; 2. B. 3-1-2. B. 3-13
- [26] Spangelo S C, Boone D, Cutler J. Assessing the capacity of a federated ground station//Proceedings of the Aerospace Conference. Big Sky MT, USA, 2010; 1-9
- [27] Liu Chun-Li, Yan Jian, Chen Xiang, et al. Capacity and loading analysis of digital channelized SATCOM system//Proceedings of the 7th International ICST Conference on Communications and Networking in China. Kunming, China, 2012; 155-160
- [28] Wang Xing-Wei, Cheng Hui, Li Ke-Qin, et al. A cross-layer optimization based integrated routing and grooming algorithm for green multi-granularity transport networks. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2013, 73(6): 807-822
- [29] Wang Xing-Wei, Cheng Hui, Huang Min. QoS multicast routing protocol oriented to cognitive network using competitive coevolutionary algorithm. *Expert Systems with Applications*, 2014, 41(10): 4513-4528
- [30] An R J, Ji Y S. DGA: Distributed genetic algorithm based relay assignment in cooperative communication//Proceedings of the 9th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference. Sardinia, Italy, 2013; 861-866
- [31] Osorio K, Alba E, Luque G. Using theory to self-tune migration periods in distributed genetic algorithms//Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation. Cancun, Mexico, 2013; 2595-2601
- [32] Rodriguez M, Escalante D M, Peregrin A. Efficient distributed genetic algorithm for rule extraction. *Applied Soft Computing*, 2011, 11(1): 733-743
- [33] Sharma P. Discovery of classification rules using distributed genetic algorithm. *Procedia Computer Science*, 2015, 46: 276-284
- [34] Yang Tie-Jun, Lin Pei-Pei. Spectrum allocation based on improved genetic algorithm in cognitive radio system. *Computer Simulation*, 2014, 31(2): 250-254(in Chinese)
(杨铁军, 林培培. 改进遗传算法的认知无线电频谱分配. *计算机仿真*, 2014, 31(2): 250-254)
- [35] Zhu Cui-Tao, Yang Zong-Kai, Cheng Wen-Qing, et al. Migration strategy for mobile Agent based on distributed genetic algorithm. *Computer Science*, 2007, 34(7): 178-180 (in Chinese)
(朱翠涛, 杨宗凯, 程文青等. 基于分布式遗传算法的移动 Agent 迁移策略. *计算机科学*, 2007, 34(7): 178-180)
- [36] Dervis K, Bahriye A. A modified Artificial Bee Colony (ABC) algorithm for constrained optimization problems. *Applied Soft Computing*, 2011, 11(3): 3021-3031
- [37] Tilahun S L, Ong H C. Modified firefly algorithm. *Journal of Applied Mathematics*, 2012, 467631(12): 2428-2439

- [38] Neshat M, Sepidnam G, Sargolzaei M. Swallow swarm optimization algorithm: A new method to optimization. *Neural Computing and Applications*, 2013, 23(2): 429-454
- [39] Liu Z, Kwiatkowska M Z, Constantinou C C. A biologically inspired QoS routing algorithm for mobile ad hoc networks. *International Journal of Wireless and Mobile Computing*, 2005, 4(2): 64-75
- [40] Wang Xing-Wei, Cheng Hui, Huang Min. Multi-robot navigation based QoS routing in self-organizing networks. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2013, 26(1): 262-272
- [41] Wang Xing-Wei, Sun Jia-Jia, Li Hong-Xing, et al. A reverse auction based allocation mechanism in the cloud computing environment. *Applied Mathematics & Information Sciences*, 2013, 7(1L): 75-84
- [42] Wang Xing-Wei, Wang Xue-Yi, Che Hao, et al. An intelligent economic approach for dynamic resource allocation in cloud services. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 2015, 3(3): 275-289
- [43] Lange S, Gebert S, Zinner T, et al. Heuristic approaches to the controller placement problem in large scale SDN networks. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2015, 12(1): 4-17
- [44] Yamamoto K, Yoshida S. Game-theoretic approach to capacity stability evaluations of decentralized adaptive route selections in wireless Ad Hoc networks. *IEICE Transactions on Communications*, 2005, E88-B(3): 1009-1015
- [45] Zhang Chun-Mei, Chen Jie, Xin Bin. Distributed memetic differential evolution with the synergy of lamarekian and baldwinian learning. *Applied Soft Computing*, 2013, 13(5): 2947-2959
- [46] McCamish S B, Romano M. Simulation of relative multiple spacecraft dynamics and control with ATLAB-SIMULINK and satellite tool kit//Proceedings of the 2007 AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference. Hilton Head, South Carolina, 2007, 2: 1038-1062



XU Shuang, born in 1990, Ph. D. candidate. Her current research interests include routing and resource management in space networking.

WANG Xing-Wei, born in 1968, Ph. D., professor, Ph. D. supervisor. His research interests include future Internet, cloud computing and cyberspace security, etc.

HUANG Min, born in 1968, Ph. D., professor, Ph. D. supervisor. Her research interests include modeling and optimization for logistics and supply chain management, etc.

MA Lian-Bo, born in 1981, Ph. D., associate professor. His research interests include intelligence computing and machine learning, etc.

Background

Satellite networks with global coverage capability and high transmission capacity play an important role in future Internet. At present, there are a lot of researches on satellite networks, such as constellation design, routing algorithm and protocol, and security and protection, etc. However, there are few works on satellite network capacity analysis to determine capacity bound. In fact, there are many influential factors on network capacity. With these factors and their influence considered, the derived satellite network capacity bound can be used to improve network efficiency, enhance network service, and optimize network protocol design. Nevertheless, the existing capacity analysis methods on territorial wireless networks and up/down links among in-orbit satellites and ground stations can hardly be applied to capacity analysis of satellite networks in space directly. This motivates our study on network capacity analysis for satellite networks.

In this paper, at first we build networking model for satellite networks and availability model for inter-satellite

links, then we devise the corresponding network capacity analysis model. Based on these models, we propose an intelligent analysis method for satellite network capacity and we use the improved distributed genetic algorithm to obtain network capacity upper bound. We have implemented the proposed method by simulations and have done its performance evaluations. Experimental results have demonstrated that it can effectively and efficiently derive network capacity upper bound with high searching precision, low complexity, fast convergence speed and avoiding premature convergence.

This research is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 61572123), the National Science Foundation for Distinguished Young Scholars of China (No. 71325002 and No. 61225012), and the Liaoning Bai Qian Wan Talents Program (No. 2013921068), the Cross-disciplinary Collaborative Teams Program for Science, Technology and Innovation of Chinese Academy of Sciences on Network and System Technologies for Security Monitoring and Information Interaction in Smart Grid.