

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211115

面向业务优先级的宽带卫星 ATDM 前向链路资源调度算法*

周聚明 张治中 卞雨靖 冯 姣 王杭先
(南京信息工程大学电子信息工程学院 南京 210044)

摘要:研究了宽带卫星通信系统中异步时分复用(ATDM)前向链路资源受限条件下的资源调度问题。以优先传输实时业务、兼顾用户优先级以及系统吞吐量为优化目标,以调制编码模式、复帧数量和优先级等为约束,建立了资源调度目标函数。提出了以初始解集构造、增强全局搜索为核心的改进蚁群优化算法(ACO),求解该资源调度问题,避免了传统的蚁群优化算法存在初始阶段信息素匮乏导致的搜索速度过慢、局部搜索能力较弱以及易陷入局部最优等缺点,提高了算法在实时性、高效性需求较强的卫星调度过程中的应用。仿真实验表明,所提算法可以准确求得最优解,准确率高达99.8%,其收敛速度较传统算法提高了55.6%,与传统算法相比,所提算法已调度业务的目标函数 f 、综合权重 y 、系统吞吐量分别提高了8.4%、6.6%、12.1%,在资源调度方面具有良好的准确性、收敛性和优化性能,且与同类型优化算法相比具有更高的调度效率,适用于ATDM卫星通信系统资源调度。

关键词: 宽带卫星通信;ATDM;资源调度;业务优先级;蚁群算法

中图分类号: TP929.5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1020

Service priority-oriented forward link resource scheduling algorithm for broadband satellite ATDM

Zhou Juming Zhang Zhizhong Bian Yujing Feng Jiao Wang Hangxian

(School of Electronics & Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: The resource scheduling problem under the condition of limited ATDM forward link resources in broadband satellite communication system is studied. Taking the transmission of real-time services preferentially, taking into account the user priority and system throughput as the optimization goal, and the modulation and coding mode, the number of multiframes and the priority as constraints, the resource scheduling objective function is established. An improved ant colony optimization algorithm with the initial solution set construction and enhanced global search as the core is proposed to solve the resource scheduling problem and avoid the slow search speed and local search ability of the traditional ant colony optimization algorithm caused by the lack of pheromone in the initial stage. It is weak and easy to fall into local optimum, which improves the application of the algorithm in the satellite scheduling process with strong real-time and high-efficiency requirements. Simulation results show that the proposed algorithm can accurately obtain the optimal solution, with the accuracy of 99.8%, and its convergence speed is 55.6% higher than that of the traditional algorithm. Compared with the traditional algorithm, the objective function F , comprehensive weight Y , and system throughput of the scheduled service of the proposed algorithm are increased by 8.4%, 6.6%, and 12.1% respectively. It has good accuracy, convergence and optimization performance in resource scheduling, and it is optimized with the same type.

Keywords: broadband communication satellite; ATDM; resource scheduling; business priority; ant colony algorithm

0 引言

卫星通信在航运、应急通信、全球定位、军事等领域都

处于十分关键的地位,与传统地面网络相比,卫星网络具有组网不受地理因素限制,覆盖范围无盲区等优点^[1-2]。早期,用户终端主要用于语音业务、数据业务等,而随着多媒

收稿日期:2022-08-18

* 基金项目:国家自然科学基金(61501244)、国家自然科学基金(61501245)、江苏省自然科学基金(BK20150932)项目资助

体业务与卫星通信技术的发展,卫星通信能够实时处理各种音频、视频等业务,组网卫星的增多和任务请求的增加,卫星通信资源分配愈加复杂,需要对多个任务进行优化组合,求解空间随任务和卫星数量的增长而急剧扩大^[3-4]。因此,如何设计资源分配方法使业务在短时间内合理完成资源分配成为亟待解决的问题。

文献[5]对最大完成概率算法进行改进,采用任务插入优化和任务序列优化策略,使中继卫星系统中任务需求和波束资源之间的匹配更加合理有效。文献[6]针对低轨卫星上行传输资源有限的问题,提出了一种将模拟退火算法和蒙特卡罗(SA-MC)算法相结合的新型传输调度算法,其收敛速度大大提升,更好满足任务实时性要求。文献[7]中讨论了综合地卫星网络(integrated earth satellite network, ITSN)中混合波束形成、用户调度和资源分配优化的问题,混合波束形成后,优化选择信道相关性较小的用户进入调度簇,进行功率分配。文献[8]于 LEO 卫星的 NB-IoT (narrow band internet of things) 系统,提出了一种新的上行链路资源分配策略,可以作为该领域未来工作的框架。文献[9]和[10]基于多波束卫星系统资源调度问题分别提出了信道容量公平载波分配算法和改进蚁群优化算法(asynchronous time-division multiplexing, ATDM),在载波分配、任务完成数量和优先级、调度完成时间方面性能较佳。

为避免低优先级用户的服务质量(quality of service, QoS)过度恶化,文献[11-12]中提出了 QoS 公平性问题,引入了延迟优先级的概念,从而在实时业务和非实时业务的性能之间取得平衡,避免实时业务无限抢占系统资源。文献[13]在反向链路中提出了一种 MF-TDMA (multi-

frequency time division multiple access)和单信道单载波(single channel per carrier, SCPC)模式的切换机制,该机制能够区别对待 3 种业务,提供差异化的 QoS 服务。

上述研究都基于不同的应用场景建立资源调度模型,从具体约束条件出发,提出了确定性优化算法或智能调度算法求解资源调度问题,但这些算法仅适用于特定网络场景,不能很好地适用于宽带卫星通信系统的资源调度。另外,针对宽带卫星通信系统资源分配问题,一部分研究基于 TDM(time-division multiplexing)机制的前向链路、反向链路以带宽、功率为优化目标进行优化,资源分配优先级匹配度不高;另一部分研究考虑了业务优先级、用户优先级。

对此,本文据系统模型考虑了业务优先级、用户优先级以及系统吞吐量,建立目标函数,确定约束条件,提出了一种改进蚁群算法对模型求解。避免了传统算法初始阶段信息素匮乏导致的搜索速度过慢以及局部搜索能力弱等缺点,更好的应用于实时性、高效性需求较强的工程中。

1 卫星通信系统资源调度问题建模

1.1 系统模型

宽带卫星通信系统的资源调度场景如图 1 所示,由中心站和若干地球站(用户 u)组成,中心站是全网核心,所有业务 x 都在中心站落地,由中心站进行转接。系统反向业务链路采用 FDMA(frequency division multiple addressing)体制,前向链路采用 ATDM(asynchronous time-division multiplexing)体制。每个点波束反向链路最高速率可达 V_{sp} ,整个前向 ATDM 载波信息速率为 V_{as} 。不同类型的用户 u 传输不同优先级的业务,经通信卫星转接落地中心站,ATDM 前向链路资源有限,须在中心站合理调度。

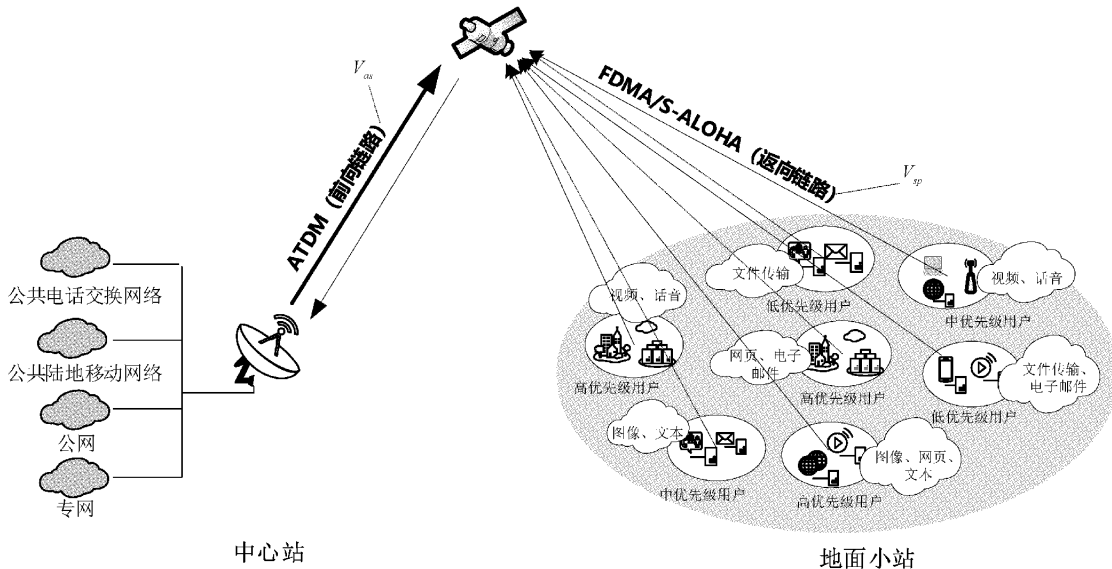


图 1 系统总体构成

在宽带卫星通信系统中,用户类型与终端能力多种多样,如企业级用户及普通个人用户终端,由于用户的性质

与传输业务的差别,网络中的用户具有不同的重要性,即用户具有不同的优先级。同时,用户所请求的业务类型与

所要求的服务质量具有较高的差异性,既有实时性要求较高的语音、视频类业务,也有非实时的网页浏览、图片传输等数据传输类业务,以及电子邮件、后台交互等 QoS 要求极低的业务,业务同样也具有不同优先级。

图2左侧为工程演示框图,收机箱将接收到的业务数

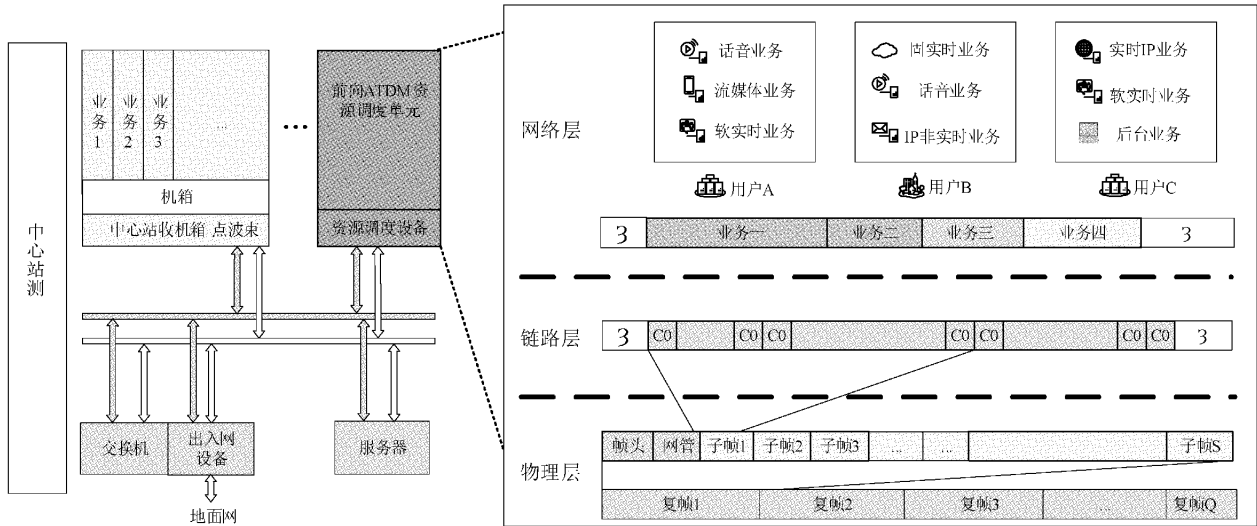


图2 系统演示和前向帧结构

图2右侧为前向帧结构,依据工程要求:1)前向为ATDM广播方式,复接了多类型、多用户、多业务、多调制编码模式的数据;2)Q个复帧为一次调度,每个复帧包含S个子帧;3)物理层对链路层的要求是按照调制编码模式M由低到高的顺序复接到子帧内,每一个子帧内的调制编码模式不变;4)不同调制编码模式,能复接的比特数不同;5)当某一个子帧内有多种调制编码模式时,由于整个子帧的调制编码模式需要保持不变,则高编码模式的业务需要服务降级,向低调制编码模式保持一致。

对于地球站来说,只要调制编码方式合适,就可以接收所有的数据。网管传达给资源调度设备每个小站的最高调制编码模式。资源调度设备在形成前向一组复帧的时候需考虑调制编码模式的影响。对于资源调度设备来说,其输入条件为网络层的各种UDP数据包(包含业务、网管)、每个小站的接收调制编码模式M、用户优先级A、业务优先级G等。

1.2 资源调度模型

基于以上对系统模型的分析,以优先传输实时业务、兼顾用户优先级和系统资源利用率为优化目标,本文建立了如式(1)所示的卫星通信资源调度模型。

$$f(d_{u,x}) = \max_{u=1}^U \sum_{x=1}^X d_{u,x} \left(\frac{A_{u,x}}{A_{\max}} + G_x \right) \quad (1)$$

其中, $d_{u,x}$ 表示 u 用户的 x 业务在该复帧传输的业务量; u 表示用户, U 表示用户总数量; x 表示业务, X 表示业务总数量; $A_{u,x}$ 表示 x 业务所属用户 u 的优先级; A_{\max} 表示用户最高优先级; G_x 表示 x 业务的业务等级。令 $y =$

据、网管数据等打成UDP包发送给交换单元,落地业务直接交给出入网或者本地相关服务器;其他需要发到小站的报文全部发给资源调度设备,本文所提资源调度算法应用于资源调度设备中,根据优化目标,生成前向帧计划。

$\frac{A_{u,x}}{A_{\max}} + G_x$, 作为考虑业务优先级和用户优先级后的权值,业务优先级所占比重较大,用户优先级对 y 影响较小,所占比重最大为 $\frac{1}{1+G_x}$ 。目标函数 f 表示在一个复帧中尽可能传输多个高优先级业务,并且兼顾业务对应的优先级和系统吞吐量。其中约束条件如下:

s. t.

$$d_{u,x} = \sum_{s=1}^S \sum_{m=M_1}^{\overline{M}_U} \beta_m^s \times V(m) \times r_{u,x}^s \times t \leq D_{u,x}^{req} \quad \forall x, u \quad (2)$$

$$\sum_{s=1}^S \sum_{u=1}^U \sum_{x=1}^X r_{u,x}^s = S \quad 0 \leq r_{u,x}^s \leq 1 \quad (3)$$

$$\sum_{m=M_1}^{\overline{M}_U} \beta_m^s = 1 \quad \forall s, \beta_m^s \in \{0, 1\} \quad (4)$$

$$\sum_{m=M_1}^{\overline{M}_U} \beta_m^s \times m \leq \sum_{m=M_1}^{\overline{M}_U} \beta_m^{s+1} \times m, \forall s \quad (5)$$

$$\sum_{m=M_1}^{\overline{M}_U} \beta_m^s \times m = \min\{\varphi_u^s \times \overline{M}_u \mid \varphi_u^s > 0, \forall u\} \quad (6)$$

$$\forall s, \varphi_u^s = \text{sgn}(a_{s,u}) \overline{m}$$

$$\frac{\sum_{s=1}^S \sum_{u=1}^U \sum_{x=1}^X \sum_{m=M_1}^{\overline{M}_U} \beta_m^s V(m) \times r_{u,x}^s}{S} \leq V_{as} \text{ Mb/s} \quad (7)$$

$$y = \left(\frac{A_{u,x}}{A_{\max}} + G_x \right) \quad (8)$$

$$y(x_1) \geq y(x_2) \quad \forall x_1 \in H, x_2 \in L$$

约束条件说明:

式 (2) 表示用户 u 分配到所有子帧的 x 业务比特数不超过本轮调度周期内开始时用户 u 的业务 x 待发总比特数; t 表示一个子帧的总时长; s 表示第 s 个子帧, $s \in [1, 2, \dots, S]$; S 表示一个复帧内的子帧数; $r_{u,x}^s$ 表示用户 u 的 x 业务在 s 子帧中的传输时间占子帧总传输时间的比例; \overline{M}_u 表示 u 用户能够支持的最高调制编码模式; β_m^s 表示子帧中调制编码模式标识, 如果 s 子帧选用的 m 调制编码模式, $\beta_m^s = 1$, 否则, $\beta_m^s = 0$; m 表示第 m 调制编码模式, $m \in [1, 2, \dots, \overline{M}_u]$; $V(m)$ 第 m 种调制编码模式的速率; $D_{u,x}^{req}$ 表示用户 u 的 x 业务在本轮调度周期开始的待发比特数。

式 (3) 表示每个子帧都要被占满, 无空余时隙。

式 (4) 表示每个子帧只用一种调制编码模式。

式 (5) 表示第 s 个子帧的调制编码模式等级要小于等于第 $s+1$ 个子帧的调制编码模式等级; β_m^{s+1} 表示第 $s+1$ 个子帧的调制编码模式。

式 (6) 表示每个子帧的调制编码方式设为该子帧中的用户调制编码方式上限中的最低值。其中, φ_u^s 表示用户 u 占用子帧标识, $\varphi_u^s = 1$ 表示用户 u 占用 s 子帧, 否则不占用, $\alpha_{s,u}$ 表示用户 u 在 s 子帧的占比, $\text{sgn}(\delta)$ 表示符号函数, 有 $\text{sgn}(\delta) = \begin{cases} 1, \delta > 0 \\ 0, \delta = 0 \\ -1, \delta < 0 \end{cases}$ 。

式 (7) 表示系统的前向传输速率要满足速度限制, 所有子帧的业务传输速率不能超过 V_{\max} (单位为 Mbps)。

式 (8) 表示 S 中任意业务兼顾用户后的优先级 y 不小于剩余未传业务的 y , 保证 y 高的业务严格优先传输。其中, H 为 S 中所有业务的集合, B 表示本次调度剩余业务集合。

针对这类问题, 数学上通常通过遍历搜索的方法来求解, 其算法复杂度与解集空间的大小强相关, 模型中业务序列有 $(X!)$ 种情况, 遍历求解方式的计算复杂度很高, 求解过程耗时很长, 不适合实时资源调度。若用拉格朗日对偶理论和 KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 条件来对此求解, 则需引入 7 个对偶因子, 数量较多, 迭代过程中, 不易收敛到资源调度最优解, 且对于约束式 (5), 每个子帧中存在的用户种类与数量具有不确定性, 无法引入相应的对偶因子。该问题为数学上典型的 NP (non-deterministic polynomial) 问题, 近年来, 多数学者通常应用智能调度算法进行求解, 常用的有遗传算法 (genetic algorithm, GA)、蚁群优化算法、粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 以及它们的组合^[14-17]。

对于工程实现来说, 还需要考虑其难易程度。蚁群优

化算法作为一种启发式寻优搜索算法, 常用于求解路由最短路径以及多目标资源优化问题, 具有控制简单、兼容性强、对硬件要求不高以及易于编程实现等特点, 对于解决该工程问题具有一定优势。

2 卫星通信系统资源调度算法设计

基于对蚁群优化算法优缺点的综合考虑, 本文以提高算法初期搜索速度和局部搜索能力为目标, 提出一种改进的蚁群优化算法来解决多约束条件下的卫星通信系统资源调度问题。

2.1 初始解集构造

业务优先级的队列调度策略属于确定性优化方法, 在数学模型的约束下, 对业务做出动态规划, 构造初始解集。如表 1 所示, 资源调度设备接收到机箱传来的 X 个业务, 可获知 $G_x, A_{u,x}$, 依据式 (8) 计算 y 大小排序更新子队列待传业务 (1~ X)。子队列业务依次进入缓冲队列并按照调制编码模式 m 排序, 判断是否可以填满复帧 q , 若是, 该缓冲队列中的业务序列则为复帧 q 的初始解 Ψ'_q , 由于复帧中多个业务会出现拼帧 (子帧) 情况, 导致不同程度的服务降级, 此解不一定为最优解, 为此, 通过蚁群算法进一步搜索该复帧的最优规划; 否则, 子队列的业务继续进入缓冲队列至填满该复帧 q 为止。

表 1 基于业务优先级的队列调度算法

1: $Q = 1$ // 复帧数
2: 初始化: 子帧数 $s = 0$, 业务速率 $V = 0$, 设置业务数 X , 业务优先级 G , 业务量 D , 用户优先级 A , 调制编码模式 m
3: $y = \left(\frac{A_{u,x}}{A_{\max}} + G_x \right)$ // 计算每个业务兼用户优先级后的综合权重 y
4: $\text{sortrows}(1 \sim X)$ // X 个业务 y 权值大小排序
5: for $i = 1 : X$
6: $\phi = \text{sortrows}(1 \sim i)$ // 业务 1~ i 进入缓存队列, 按照调制编码 m 大小排序
7: $(s, r_{u,x}^s, \text{Remaining}) = \text{calculation}(G_i, V_i, m, A_i, D_i)$ // 式 (2)~(6) 拼帧, 降速, 计算出 1~ i 业务所占子帧数
8: if $s > S$ // 判断业务子帧数是否拼够一个复帧
9: $\Omega = i$, Break ;
10: end if
11: end for
12: $\Psi' = (\Phi, \Omega)$, $\Omega = i$, $\Phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n]$ // 得到初始解元素

2.2 面向业务优先级的蚁群算法

对于时刻 t , 假设 τ 为复帧中传输业务 i 后, 选择传输

业务时 j 的信息素浓度,则算法状态转移概率公式为:

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{s \in J_k(i)} [\tau_{is}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{is}(t)]^\beta}, & j \in J_k(i) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

$$\eta_{ij} = \frac{A_{u,i} + A_{\max}G_i + A_{u,j} + A_{\max}G_j}{2A_{\max}(1 + G_{\max})} \quad (10)$$

其中, α 为信息素启发值权重,用来描述信息素浓度对于调度任务的影响程度,其值越大,蚂蚁对走过的路径选择的概率越大; η_{ij} 为启发式因子,表示传输业务 i 后选择业务 j 传输的期望程度; β 为期望启发值权重; $J_k(i)$ 表示蚂蚁 k 下一步允许选择的业务集合,每只蚂蚁根据路径上残留的信息素量和启发式信息独立地选择下一个业务; α 和 β 的选取决定了算法的局部搜索能力。

适应度函数:

$$F = f \quad (11)$$

另外,禁忌表 $tabu_k$ 记录了蚂蚁 k 当前传输的业务序列。当所有业务都加入到禁忌表 $tabu_k$ 中时,蚂蚁 k 便完成了一次周游。此时,蚂蚁 k 所传输的业务序列便是 f 的一个可行解,可以看作组合优化问题 (Ψ, F) 上的一个映射:

$$\Psi \leftarrow F \quad (12)$$

Ψ 为解元素, $\Psi = (\Phi, \Omega)$, 其中 Ω 表示该复帧中传输业务的个数; Φ 为解向量 $[\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_1, \phi_\Omega]$, $\phi \in [1, 2, \dots, X]$, 表示 Ω 个业务在该复帧中的传输序列。

算法中,对于每一个解元素 $\Psi^k = (\Phi, \Omega)$, 都有一个信息素浓度 τ_{ij} 与之对应。完成一次周游后,各路径上的信息素浓度更新为:

$$\tau_{ij}(t+n) = (1-\rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij} \quad (13)$$

$$\Delta\tau_{ij} = \sum_{k=1}^K \Delta\tau_{ij}^k \quad (14)$$

式中: ρ ($0 < \rho < 1$) 表示路径上信息素的蒸发系数, $1-\rho$ 表示信息素的持久性系数, ρ 过小时,以前搜索过的路径被再次选择的可能性过大,会影响算法的随机性和全局搜索能力; $\Delta\tau_{ij}$ 表示本次迭代中业务 ij 上信息素的增量, $\Delta\tau_{ij}^k$ 表示蚂蚁 k 在本次迭代中留在边 ij 上的信息素量。随着业务数量的增多,蚁群算法在一定时间难以收敛,且蚂蚁数量需要随着业务数量而增加,计算量增大,导致获取的信息素趋于平均,易陷入局部最优解。Dorigo 提出的 3 种蚁群算法模型优化效果不佳, $\Delta\tau_{ij}$ 更新机制需改进,在 ant-quantity 模型的基础上附加每次迭代的可行解与最优路径的比值,可以利用全局信息更好的更新路径上的信息素量,跳出局部最优。

$\Delta\tau_{ij}$ 表示为:

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{y_{ij}}{C} + \frac{F_k}{F_{NC}}, & \text{蚂蚁 } k \text{ 在本次周游中选中业务 } ij \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

$$\bar{y}_{ij} = \frac{A_{u,i} + A_{\max}G_i + A_{u,j} + A_{\max}G_j}{2A_{\max}} \quad (16)$$

$$F_k = \max \sum_{u=1}^U \sum_{x=1}^X d_{u,x}^k \left(\frac{A_u}{A_{\max}} + G_x \right) \quad (17)$$

其中, C 为正常数, f_k 表示蚂蚁 k 在本次周游中所走过路径的大小,即适应度函数, f_{NC} 表示迭代到 NC 次为止的路径的最大值(适应度函数)。表 2 为算法流程。

表 2 改进蚁群算法

- 1: 资源调度设备收到收机箱发来的报文
- 2: for $s = 1:S$
- 3: 队列调度算法得到初始解 $\Psi' = (\Phi, \Omega)$
- 4: 初始化: $g = 1$, 设置蚂蚁数 K , 信息素启发权重 $\alpha = 1$, 期望启发值权重 $\beta = 5$, 信息素蒸发系数 $\rho = 0.1$, 迭代次数 $G_b = 200, \Omega$ 个业务, 禁忌表 $Tabu = zeros(K, \Omega)$, 信息素浓度 $\tau = ones(\Omega, \Omega)$
- 5: while ($g < G_b$)
- 6: for $i = 1:\Omega$
- 7: for $j = 1:\Omega$
- 8: 式(10)计算启发式因子 η
- 9: end for
- 10: end for
- 11: K 只蚂蚁随机放在 Ω 个业务, 记录于 $Tabu$ 中
- 12: for $i = 1:\Omega$
- 13: for $j = 1:K$
- 14: 式(9)计算 K 只蚂蚁跳转到各个业务的概率
- 15: K 只蚂蚁按照概率 p 选择下一个业务, 完成各自周游, 并记录各条路径于 $Tabu$ 表中
- 16: 计算适应度函数值 F // 每只蚂蚁走过的路径就是一个可行解
- 17: end for
- 18: end for
- 19: $L(g) = F_{\max}, R(g, :) = Tabu(L(g), :)$ // 记录本次迭代最大目标函数值及其路线
- 20: 根据式(13)~(17)更新全局信息浓度
- 21: 更新禁忌表 $Tabu$
- 22: end while
- 23: $Max(L) \rightarrow R$ // 迭代结束后的最大的适应度函数值对应的路线(即最优解)
- 24: $\Phi = R$
- 25: $\Omega = Length(R)$
- 26: $\Psi = (\Phi, \Omega)$ // 复帧 s 的最优解
- 27: end for // 完成 Q 个复帧, 本次调度结束

2.3 算法复杂度分析

使对于蚂蚁种群规模为 K , 迭代次数为 G 的资源调度问题, 每个蚂蚁个体是由变量集合 (G, X, K, Ω) 所决定

的。假设 t 时刻资源调度设备的业务总数为 X , Q 个复帧为一次业务调度, 每个复帧内有 S 个子帧, Ω_q 为第 q 个复帧中所容纳的业务个数, $\sum_{q=1}^Q \Omega_q$ 表示 Q 个复帧传递的业务数, 满足 $\sum_{q=1}^Q \Omega_q < X$, 由平方和不等式关系可得 $\sum_{q=1}^Q \Omega_q^2 < X^2$, 如下为算法复杂度:

$$O(G_b, X, K, \Omega) = O(X^2) + \sum_{q=1}^Q [O(X^2)S\Omega_q + \Omega_q^2 + \Omega_q + G_b(\frac{3K\Omega_q^2}{2} - \frac{K\Omega_q}{2} + K S \Omega_q - K)] \approx O(X^3) \cdot S + O(X^2) \cdot (2 + \frac{3KG_b}{2}) + O(X) \cdot [1 + KG_b(S - \frac{1}{2})] + O(KG_bQ) \quad (18)$$

由此可知, 算法的时间复杂度与种群规模、迭代次数以及地面业务数有关, 其中地面业务数所占比重较大。仿真实验中, 将验证改进蚁群算法在该调度模型的优化效果。

3 仿真及结果分析

3.1 仿真过程实现

仿真分析基于 40 个地面站和 1 个中心站、一颗静止轨道卫星。资源调度过程仿真实现基于 MATLAB R2018, 在某个时间窗口内, 40 个小站(用户)发送 80 个业务由卫星中转至中心站进行处理调度, 通过 ATDM 机制的前向链路, 将业务进行返回传输。

在仿真场景中, 综合考虑宽带多媒体卫星场景的用户服务需求, 每个业务大小为 0~7 Mbit, 包含实时恒速率业务、非实时业务、后台类业务等, 将用户和业务分别划分为 4 个优先级和 5 个优先级。在改进蚁群算法中, 蚂蚁数量为 60, 根据 ACO 算法参数设置, 信息素启发因子 $\alpha = 1$, 期望启发因子 $\beta = 5$, 信息素蒸发系数 $\rho = 0.1$, 信息素强度 $C = 3$ 。具体仿真参数如表 3 所示。

3.2 仿真结果分析

为了分析所提算法的性能, 本文选取调度完成的业务的目标函数值 f 以及调度完成的业务优先级兼用户优先级权重 y 作为评价指标, 将所提算法与传统蚁群优化算法进行比较, 分析算法的敛散性能, 又与遗传算法进行对比, 分析了所提算法在资源调度效率的优化性能。

1) 算法准确性分析

出于工程负载考虑, 选取了 10 个业务的情况, 通过遍历得到最优解, 分别与 4 种算法的优化结果对比, 验证本算法应用于工程中的准确性, 表 4 为仿真 1 000 次后, 四种算法仿真结果与最优解的数据对比。

2) 算法敛散性分析

算法的敛散性是衡量蚁群优化算法的重要指标, 通过构造初始解集、增强全局信息素极大地提高算法的收敛速度, 与传统的蚁群优化算法进行比较, 所提算法能更快地

表 3 仿真参数

数据	变量	数值	单位
复帧	Q	16	个
子帧	S	60	个
业务	X	80	个
子帧时长	T	10	ms
业务优先级	G_x	1, 2, 3, 4	
用户	U	50	个
用户优先级	A_u	1, 2, 3, 4, 5	
调制编码模式	M	1, 2, ..., 8	
调制编码模式对应速率	V	10~80	Mbps
业务量	R	0~7	Mbit
返向链路最高速率	V_{sp}	90	Mbps
前向 ATDM 载波信息速率	V_{as}	120	Mbps
蚂蚁数量	K	60	只
信息素启发因子	α	1	
期望启发因子	β	5	
信息素蒸发系数	ρ	0.1	
信息素强度	C	3	
最大进化代数	G_a	200	

表 4 各算法与枚举法仿真结果对比

算法	仿真次数	最优解次数	最优解概率/%
本算法	1 000	998	99.8
队列调度	1 000	938	93.8
蚁群算法	1 000	956	95.6
遗传算法	1 000	932	93.2

收敛到目标值。如图 3 所示, 所提算法在经过 83 次迭代后完成收敛, 而传统的蚁群优化算法需要 187 次迭代, 收敛速度提高了 55.6%。当迭代次数一定时, 所提算法经过迭代后的适应度函数值一直高于传统蚁群优化算法。

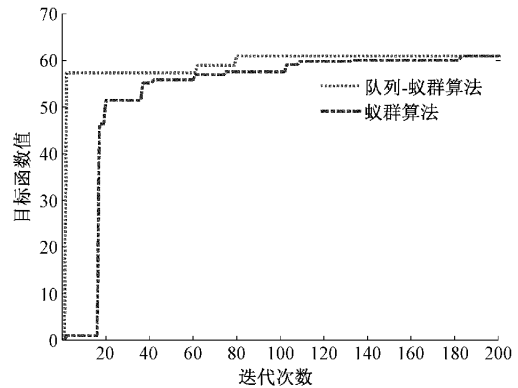


图 3 适应度函数随迭代次数变化

3) 算法优化性能分析

图 4 为 3 种算法的已调度业务的目标函数 f 、已调度业务综合权重 y 、已调度业务量以及剩余业务量随复帧数

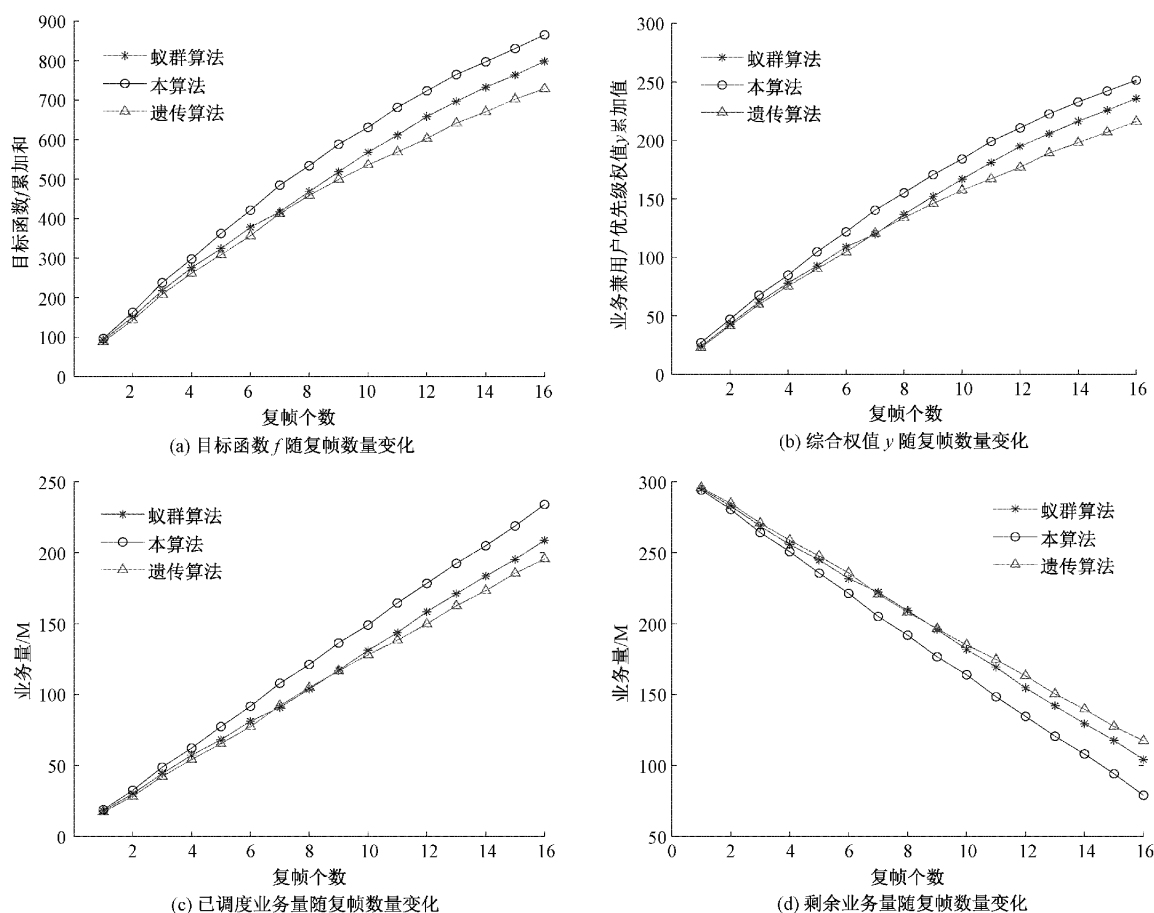


图 4 调度业务各项指标随复帧数量变化

量变化关系。可以看出,同等数量的复帧所调度的业务中,本算法调度业务的各项指标均高于其他 3 种算法。

图 4(a) 为 16 个复帧所调度的业务的目标函数累加值,本算法较蚁群算法和遗传算法分别提升了 8.4% 和 18.7%, 优于其他算法,所调度业务更符合工程的约束要求。图 4(b) 为业务的 y 值,本算法较蚁群算法和遗传算法分别提升了 6.6% 和 16.2%, 整体呈递增趋势,调度初期,其值上升迅速,随着复帧数量增加,慢慢趋于平缓,这是由于本次调度的业务集固定,调度序列按照业务优先级高低进行调度,高优先级业务全部调度完成后才继续下一等级业务调度,后面复帧中业务优先级依次降低,因此,累加值会随着复帧数量增多而增势变缓。

宽带卫星系统资源有限,任务负载较重,优先传输高优先级业务的同时,兼顾系统吞吐量。从图 4(c)、(d) 中可以看出,在相同数量复帧的条件下,本算法调度的业务量比蚁群算法、遗传算法提高了 12.1%、19.7%。系统吞吐量最大。总体来说,在相同复帧数量下,无论是调度业务优先级还是吞吐量,本算法均优于其他两种算法,这主要是由于所提算法进行了初始解集构造、基于全局的信息素更新机制,能够在迭代的过程中快速找出优秀个体,并且将其保留,使算法快速收敛到最优解,更能满足工程要求。

4 结 论

卫星通信系统是未来空天地大规模移动网络的重要组成部分,在宽带卫星通信系统前向链路中,需要在满足优先传输高优先级业务,同时兼顾用户优先级和系统吞吐量前提下对卫星转接到中心站的业务进行调度。本文首先分析了 ATDM 卫星场景下卫星通信系统资源调度模型及约束条件,建立了卫星资源调度数学模型,然后提出了一种初始解集构造、增强全局信息素为核心的改进蚁群优化算法用于求解卫星资源调度问题。仿真结果表明,所提算法可以准确的求得最优解,准确率高达 99.8%,其收敛速度较传统算法提高了 55.6%,在资源调度方面具有良好的敛散性能和优化性能,与传统算法相比,本算法已调度业务的目标函数 f 、综合权重 y 、系统吞吐量分别提高了 8.4%、6.6%、12.1%, 能够有效地解决 ATDM 卫星通信系统的资源调度问题。当然,卫星通信系统的资源调度还会受到其他约束条件的影响,包括传播环境、信道干扰等,此类问题有待进一步研究。

参考文献

- [1] KYLE D, SANDIP R, KHANH D, et al. Dynamic resource allocation for military communications

- satellites with cognitive users [C]. Aerospace Conference, 2016; 1-10.
- [2] PAUL K, MARTIN. Space communications and navigation: NASA's management of the space network [M]. Washington: Science Press, 2014.
- [3] LI D R, SHEN X, GONG J Y, et al. On construction of China's space information network[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(6): 711-715, 766.
- [4] YU S B, WU L D, ZHANG X. DaaC: Modeling method of spatial information network architecture[J]. Journal on Communications, 2017, 38(S1): 165-170.
- [5] DENG B, JIANG C, WANG J, et al. Beam scheduling with various mission demands in data relay satellite systems [J]. Journal of Communications and Information Networks, 2021, 4(6): 396-410.
- [6] WANG L, LIU S, WANG W, et al. Dynamic uplink transmission scheduling for satellite Internet of Things applications[J]. China Communications, 2020, 10(17): 241-248.
- [7] PENG D, BANI A, LI Y, et al. Hybrid beamforming, user scheduling, and resource allocation for integrated terrestrial-satellite communication[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 9(70): 8868-8882.
- [8] KODHELI O, MATURO N, CHATZINOTAS S, et al. NB-IoT via LEO satellites: An efficient resource allocation strategy for uplink data transmission[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 7(9): 5094-5107.
- [9] LIU X, XU K, WU F, et al. A beam-dominating frequency resource allocation and scheduling scheme for multi-beam satellite system [C]. 2021 IEEE International Conference on Power Electronics, Computer Applications (ICPECA), 2021.
- [10] 何元智, 彭聪, 于季弘, 等. 面向密集多波束组网的卫星通信系统资源调度算法[J]. 通信学报, 2021, 42(4): 109-118.
- [11] ZHONG X, HE Y, HAO Y, et al. Joint power and timeslot allocation based on delay priority for multi-beam satellite downlinks [C]. Proceedings of 2017 International Conference on Progress in Informatics and Computing (PIC), New York: IEEE, 2017; 1-6.
- [12] HAN H, YUAN L, DONG F, et al. QoS fairness-based slot allocation using backlog info in satellite-based sensor systems[J]. Electronics Letters, 2015, 51(20): 1615-1617.
- [13] TROPEA M, FAZIO P, RANGO F D, et al. Novel MF-TDMA/SCPC switching algorithm for DVB-RCS/RCS2 return link in railway scenario [J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2016, 52(1): 275-287.
- [14] 王瑞, 孙晓伟, 毛忠阳, 等. 基于遗传禁忌搜索的时隙分配算法[J]. 电子测量技术, 2022, 45(10): 82-86, DOI: 10.19651/j.cnki.emt.2208801.
- [15] SELVAKUMAR A, GUNASEKARAN G. A novel approach of load balancing and task scheduling using ant colony optimization algorithm [J]. International Journal of Software Innovation, 2019, 7(2): 9-20.
- [16] LI X D, ZHANG D, CHU D K. Cloud resource scheduling method based on hybrid particle swarm optimization [C]. 2019 6th International Conference on Systems and Informatics. Piscataway: IEEE Press, 2019: 688-693.
- [17] DENG B Y, JIANG C X, KUANG L L, et al. Two-phase task scheduling in data relay satellite systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(2): 1782-1793.

作者简介

周聚明, 硕士研究生, 主要研究方向为信道模型、卫星资源调度。

E-mail: 630583667@qq.com

张治中, 工学博士, 教授, 主要研究方向为移动通信与信息处理、通信网测试及物联网。

E-mail: zhangzz@nuist.edu.cn

卞雨靖, 硕士研究生, 主要研究方向为信道模型、卫星资源调度。

E-mail: 2089611951@qq.com

冯姣, 工学博士, 副教授, 主要研究方向为网络协议、资源分配、信号检测、无线通信信道、自然语言处理等。

E-mail: jiao.feng@nuist.edu.cn

王杭先, 工学博士, 教授, 主要研究方向为卫星通信网络技术。

E-mail: wanghangxian@126.com