

基于星地协同处理的资源管理技术研究^①

曹 欢^{②***} 苏泳涛* 周一青^{③***} 丁雅帅*** 邱大伟*** 龙 隆***

(* 中国科学院计算技术研究所移动计算与新型终端北京市重点实验室 北京 100190)

(** 中国科学院大学 北京 100049)

(*** 北京中科晶上科技股份有限公司 北京 100190)

摘 要 针对卫星通信网络中用户业务传输时延大、资源利用率低的问题,本文提出了基于星地协同处理的资源分配方法。该方法联合考虑了星上计算能力、星上缓存能力及星上无线资源协调能力,并与地面资源管理器协同进行资源分配以提升资源利用效率。在研究过程中,综合考虑波束覆盖下用户业务分布、业务服务质量(QoS)保障、用户信道条件等关键因素,以最小化用户业务的平均传输时延和最大化波束吞吐量为目标,建立了多目标优化问题模型,并基于模拟退火算法设计了星地协同资源分配方法求优化问题解的实施流程。仿真实验表明,与现有技术相比较,提出的星地协同方法可以有效降低网络用户业务平均传输时延 48.03%,提升波束吞吐量 29.26%,同时改善用户业务的 QoS,降低丢包率 50.40%。

关键词 星地协同; 卫星通信; 资源管理; 服务质量(QoS)保障; 多目标优化

0 引 言

近年来,包括地面移动通信、卫星通信在内的无线通信系统迅速发展^[1-4]。2019 年 6 月,我国工信部向运营商正式发放首批第 5 代移动蜂窝网络(the 5th generation of mobile cellular network, 5G)商用牌照,标志着我国 5G 地面移动通信网络正式进入部署运营阶段。但是,地面移动通信系统对偏远地区、山区、灾区、海域、空域等场景存在覆盖成本高昂或覆盖不到的缺陷。因此,仅依靠地面移动通信系统很难满足 5G 通信网络“信息随心至,万物触手及”的随时随地接入的总体愿景。而卫星移动通信系统具有天然的广覆盖、高可靠、大容量等优势,包括航天科工集团、中科院各研究所、第三代合作伙伴计划(3rd generation partnership project, 3GPP)、国际电信联盟(international telecommunication union, ITU)、卫

星 5G(satellite 5G, Sat5G)联盟等在内的国内外各大科研机构 and 标准化组织提出在下一阶段 5G 网络中引入卫星网络^[5],以补充地面通信系统的不足,形成全球无缝覆盖的新一代宽带移动通信网络。基于此背景,近年来国内外研究组织针对 5G 与卫星融合的新一代通信网络的组网架构、应用场景、关键技术等方面开展研究^[6],并产出了一些成果。在 3GPP 关于非地面网络(non-terrestrial networks, NTN)的文献中对 5G + 卫星模式下的 12 种应用场景进行了定义^[7],阐述了卫星在这些场景中的重要作用。

尽管卫星通信系统在覆盖方面相对地面移动通信系统具有优势,但也存在一些天然的缺陷。一方面,由于卫星轨道位置距离地面较远,传输时延大,业务数据的空口传输时延能达到几百毫秒;另一方面,卫星通信是一个功率和频谱资源受限的系统,无

① 中科院弘光专项(KFJ-HGZX-002)和北京市自然科学基金(L172049)资助项目。
② 男,1988 年生,博士生;研究方向:卫星通信系统无线资源管理关键技术;E-mail: caohuan@ict.ac.cn
③ 通信作者,E-mail: zhouyiqing@ict.ac.cn
(收稿日期:2019-12-20)

线资源十分稀缺。传统卫星通常采用透明转发载荷,仅作为用户和地面设备之间的中继节点,由地面段管理设备进行网络的无线资源管理。由于星上的计算载荷处理能力弱,无法进行复杂的信息处理,地面资源管理器通常采用静态或半静态等易于实现的算法,导致无线资源利用率低、提升用户链路波束吞吐量困难。

针对上述问题,国内外研究者提出了一些优化的资源管理技术。文献[8]提出新一代宽带卫星通信系统可采用星上处理载荷技术来提升资源利用率,并对星上处理载荷架构进行了描述。考虑将地面接入网协议栈的部分功能转移到星上进行处理,用户业务的数据面传输直接通过星上处理卫星发送给目标用户,无需地面关口站处理后再进行转发。通过减少业务的转发跳数,来降低业务的端到端平均传输时延。

文献[9]提出了基于信息中心网络(information centric network, ICN)的动态缓存技术。按照多媒体文件的流行度分布概率,将用户访问热度排名前 20% 的文件缓存到距离用户最近的存储节点,节省用户需求的文件在后端传输的时延,并论证了在地面系统中采用文件动态缓存技术可有效降低业务的内容获取平均时延。文献[10]分析了将 ICN 缓存技术引入到卫星网络中的可行性,并对用户访问的

文件流行度概率函数进行建模,文件访问分布服从 Zipf 概率密度函数。文献[11]进一步研究了面向 5G 与卫星融合的缓存技术,通过卫星辅助缓存来降低多媒体文件业务的内容获取平均时延,并分析了不同星上缓存尺寸对降低业务时延性能的影响。

上述研究主要是利用星上处理、星上缓存等技术来降低业务时延,没有进一步探讨这些技术对提升无线资源利用率的作用,比如对改善波束吞吐量、降低丢包率等关键性能指标的作用,并且忽略了星上计算资源、存储资源和馈电、用户链路无线资源联合分配时对降低时延、提升波束吞吐量等方面的影响。

针对上述研究的不足,本文基于卫星通信实际场景,在考虑卫星通信网络中对时延敏感的典型实时类业务如语音、视频的基础上,以优化网络业务平均传输时延和波束吞吐量为目标,在联合使用星上计算资源、存储资源及无线资源等前提下,进行星地协同资源管理算法设计,以此提升卫星通信网络的资源利用率。

1 星地协同处理系统模型

基于卫星通信系统的星地协同处理架构如图 1 所示,分为用户段、空间段和地面段。

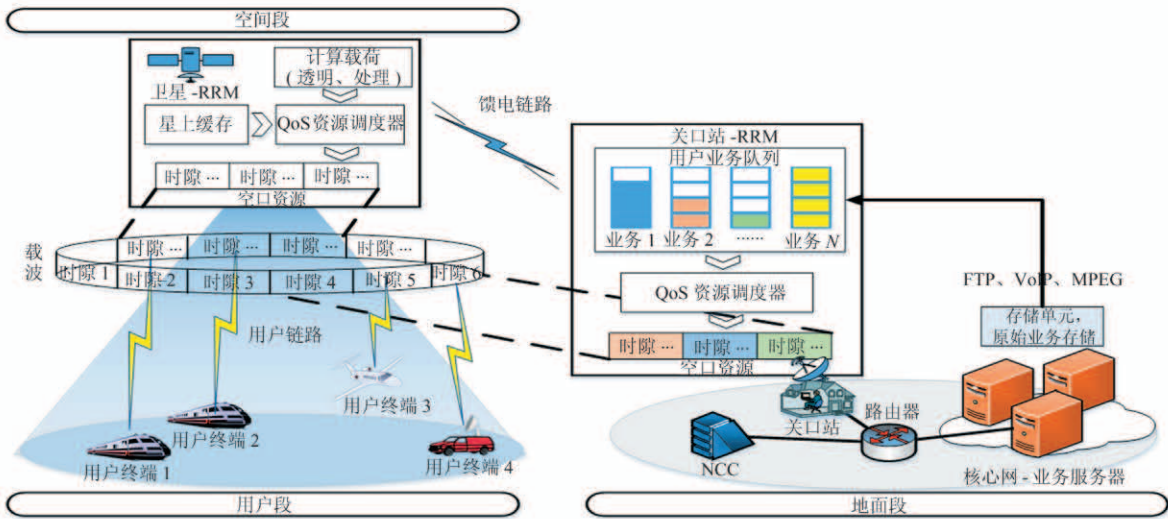


图 1 星地协同处理资源管理架构

用户段主要由各类用户终端构成,如固定终端、车载终端、机载终端、船载终端等。各种终端通过用

户链路覆盖波束中的载波接入到卫星网络中获取业务服务。本文研究的空口传输体制参考了宽带卫星

通信协议(digital video broadcasting satellite-second generation standard, DVB-S2)^[12-13],载波采用时分多址接入(time division multiple access, TDMA)方式,用户按时隙对载波的带宽和功率资源进行复用。

空间段宽带卫星通常由高、低轨道上的卫星构成。本文模型考虑高轨通信卫星,卫星节点可支持星上处理(on board process, OBP)、透明转发及无线资源管理(radio resource management, RRM)等功能。

地面段由关口站(gateway, GW)、网络控制中心(network control center, NCC)和核心网(core network, CN)组成。其中, GW 中的 RRM 负责对空口的无线资源进行管理, NCC 负责对卫星的轨道、卫星波束覆盖及卫星运行状态进行控制, CN 负责用户管理、业务管理等功能。

通过用户段、空间段和地面段的网元节点构成完整的宽带卫星通信网络。

1.1 星地协同资源管理机制描述

如图 1 所示,卫星通信系统的基本通信链路由用户链路、卫星节点、馈电链路构成。本文星地协同资源管理机制实际是通过星上 RRM 和地面 GW 中的 RRM 联合分配来优化用户的平均传输时延、提升波束吞吐量、保障业务服务质量(quality of service, QoS)等卫星通信关键性能指标。该机制可以合理地对星上受限的计算资源、缓存资源及空口无线资源进行优化分配。

1.1.1 星地计算资源协调管理

受限于卫星的承载能力,星上的功率资源要弱于地面设备,导致星上计算载荷处理能力弱。因此星上通常采用透明转发模式,用户的信令、数据均不会在星上进行处理,而是直接在用户和 GW 之间透明转发。无论是语音业务、文件或视频等业务都要落地到 GW 中进行处理。一方面,增大了业务的平均传输时延;另一方面,增大了对馈电链路的吞吐量需求。随着星上载荷计算技术的不断增强,这种情况在不断改善,星上已经可以承担一部分业务处理、资源管理的功能,通过业务星上处理可以减少业务在馈电传输带来的时延和吞吐量的开销。但是,总的来说星上的处理载荷能力还是要远弱于地面处理

器。为了对协同机制的性能进行量化分析,假设地面 GW 的处理能力是 CC ,即 GW 同时可处理 CC 条业务,定义星上计算载荷的处理能力因子为 $c \in (0, 1]$,表示星上处理能力和 GW 处理能力之间的关系,可知星上可同时支持 $c \times CC$ 个业务的处理。对卫星通信系统来说,星上计算资源仍然是稀缺资源,尤其是无法保证星上的能力可以处理覆盖区所有业务时,星地之间的资源管理器需要协调哪些业务走星上处理、哪些业务走地面关口站处理才能保障资源合理化使用。因此,需要设计合理的协同分配算法,详情见后面章节描述。

1.1.2 星地缓存资源管理

与计算资源相同,星上的缓存同样受限,无法将 CN 服务器上所有的业务文件都放到星上存储。因此,本文的星上缓存机制参考了文献[14]星上缓存方法,根据文件访问流行度进行存储。定义地面存储系统的总的文件数为 N_f ,星上缓存大小为 C_s ,单位为文件个数。由现有研究可知,用户文件流行度服从 Zipf 概率密度分布,可表示如下:

$$p(n) = \frac{n^{-z}}{\sum_{n=1}^{N_f} n^{-z}} \quad (1)$$

其中, z 为 $[0.6, 1.2]$ 之间的常数^[14]。则可以将用户流行度排行最高的前 C_s 个文件存到星上。当波束中的用户发起视频文件业务请求时,命中星上缓存区的文件概率服从上述分布。若没有命中,则由 GW 负责进行业务传输;反之,在星上计算资源充足的情况下可进行星上数据传输。当星上负载重、计算资源不充足时,仍需结合当前星上业务的服务情况分析该命中的文件走星上进行传输是否会造成性能指标的下降或上升,综合评价后再做决策,确定业务该如何传输。在后续的星地协调分配算法设计过程中,结合优化目标进行考虑。

1.1.3 空口无线资源协调管理

星上的无线资源主要指带宽、功率等资源,通过载波的形式承载用户链路、馈电链路中的信息传输。在本文中信息的传输方向分为上行方向和下行方向。假设上行和下行采用全双工模式(frequency division duplexing, FDD),上行和下行独立传输,且带宽资源大小相等。其中,上行指的是用户链路的终

端发送到卫星接收方向及馈电链路的卫星发送到关口站接收方向^[15-16]。下行指的是馈电链路的 GW 发送到卫星接收方向及用户链路的卫星发送到终端接收方向^[17]。定义用户链路的总带宽为 B_{tot}^u ，馈电链路的总带宽为 B_{tot}^f ，在组网时用户链路采用频率复用技术且复用因子为 fr ，则每个波束的可用载波带宽为 $B_i^u = B_{tot}^u / fr$ 。定义馈电链路每个载波对应一个用户链路波束的信息传递，则馈电链路载波带宽为 $B_i^f = B_{tot}^f / N_b$ ，其中 N_b 为卫星的波束数量。定义星上发射机的总功率为 P_{tot} ，主要用于下行用户链路第 i 个波束的载波信号发送功率定义为 P_i^u ，馈电链路传递第 i 个波束信号的载波发射功率定义为 P_i^f ，则星上发射总功率可表示为 $P_{tot} = \sum_{i=1}^{N_b} (P_i^u + P_i^f)$ 。在星上处理模式下，部分用户业务直接在星上处理，不经过馈电链路落地处理，可降低业务对馈电链路的信息容量需求，节省的星上带宽和功率可用于用户链路的下行传输，提高资源利用率。考虑到实际系统中，带宽变化会带来载波重分配的影响，本文定义用户链路、馈电链路之间的带宽资源不可调整，仅考虑功率的协调优化分配。

1.2 星地网络中业务的传输时延

定义网络中的一个用户同时只能支持一种类型业务传输。定义发送给第 i 个波束覆盖下用户 m 的第 q 个数据包从起始地开始发送到用户接收到数据包经历的传输时延为 $t_{i,m,q}^{transmit}$ ，则用户业务在网络中的平均传输时延可表示为

$$\bar{t}_{i,m, delay} = \frac{1}{N_{i,m,q}} \sum_{q=1}^{N_{i,m,q}} t_{i,m,q}^{transmit} \quad (2)$$

其中， $N_{i,m,q}$ 表示用户传递的总的包个数。

如图 2 所示，在星地网络中，数据传输主要包含两种传输路径，即单跳传输和双跳传输。由于 GW 和 CN 之间有线连接，传输时延非常小，在本文研究中假设为理想条件，不考虑路由时延，则传输时延 $t_{i,m,q}^{transmit}$ 可进一步表示为

$$t_{i,m,q}^{transmit} = \begin{cases} 2 \times t_{trans1} & \varepsilon_{i,m} = 1 \\ 2 \times (t_{trans1} + t_{trans2}) & \varepsilon_{i,m} = 2 \\ t_{trans1} & \varepsilon_{i,m} = 3 \\ t_{trans1} + t_{trans2} & \varepsilon_{i,m} = 4 \end{cases} \quad (3)$$

其中， t_{trans1} 表示用户链路传输时延， t_{trans2} 表示馈电

链路传输时延。 $\varepsilon_{i,m} \in \{1,2,3,4\}$ 表示用户业务使用的传输模式，其值取 1 时表示单跳语音传输，取 2 时表示双跳语音传输，取 3 时表示单跳视频传输，取 4 时表示双跳视频传输。则用户业务平均传输时延可表示为

$$\bar{t}_{i, delay} = \frac{1}{N_{i,m}} \sum_{m=1}^{N_{i,m}} \bar{t}_{i,m, delay} \quad (4)$$

其中， $N_{i,m}$ 表示波束 i 中用户的总数。对于星地协同资源管理器来说，网络业务平均传输时延是一个重要性能指标，系统的优化目标之一是最小化 $\bar{t}_{i, delay}$ 。

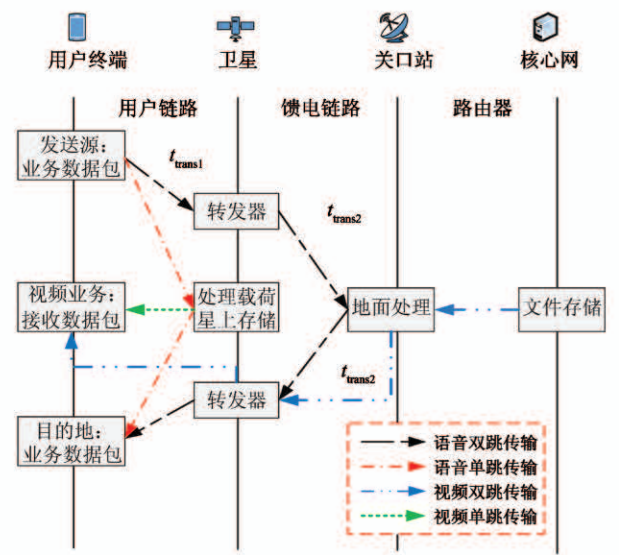


图 2 语音与视频业务传输途径

1.3 星地网络中的业务 QoS 保障调度机制

为了保障不同类型的业务在本文星地协同网络中能够正常传输，需要对业务的服务质量进行参数化定义。本文主要考虑语音、视频等时延敏感类型实时业务，业务服务质量保障 (quality of service, QoS) 要求如表 1 所示^[18]。在资源分配时，只要能够满足业务 QoS 保障的最低需求，那么业务的质量就能得到保障。

表 1 实时类业务的 QoS 参数

参数	值 (语音)	值 (视频)
数据包尺寸	200 bytes	128 bytes (均值)
调度时延间隔	< 20 ms	< 150 ms
丢包率	< 1%	< 3%

常见的 QoS 调度机制可以分为三种^[19]: (1) 紧急调度机制; (2) 平均水平保障调度机制; (3) 按优先级调度机制。

QoS 调度机制可用数学模型来表示, 定义在每个时隙 t 进行业务调度时, 对应的 QoS 保障需求的最小传输比特数为

$$R_{i,m}^{guarantee}(t) = \sum_{q=1}^{Q_{i,m}(t)} \frac{s_{i,m,q}}{e_{i,m,q}^{\beta}} \quad (5)$$

其中, $Q_{i,m}(t)$ 表示时隙 t 时, 波束 i 中给用户 m 分配的队列中排队的总的包个数; $s_{i,m,q}$ 表示用户 m 的业务队列中第 q 个数据包的尺寸; $e_{i,m,q}^{\beta}$ 表示用户第 q 个数据包的到期时间 (单位为时隙, slot), 该值的初始值是进入队列时的业务 QoS 调度时延间隔要求, 每间隔一个调度时间更新一次。如果没有被调度则减掉已排队的时间, 如果降低到 0 还没被调度, 则说明该包的 QoS 无法保障, 该包丢弃。另外, 参数 $\beta \in \{0, 1, \infty\}$ 用于指示 QoS 调度器的保障策略。当 $\beta = 0$ 时, 表示采用机制 1; 当 $\beta = 1$ 时, 表示采用机制 2; 当 $\beta = \infty$ 时, 表示采用机制 3。

用户的信道条件可以用接收信号的信号干扰噪声比 (signal-to-interference plus noise ratio, SINR) 来表示, 当时隙 t 分配给不同的用户时, 受限干终端接收机的 SINR 值, 时隙能够承载的传输比特数不同。定义时隙 t 分配给用户 m 时, 可获得的容量值为 $T_{i,m}^{actual}(t)$, 表示为

$$T_{i,m}^{actual}(t) = \frac{B_i^u}{(1 + \alpha)} \times \eta_{i,m}^{mcs} \quad (6)$$

其中, B_i^u 表示波束 i 的载波带宽; $\eta_{i,m}^{mcs}$ 为用户 m 在采用第 mcs 种调制编码方案时的频谱效率, 可由当前用户终端的 SINR 值根据最接近的调制编码方案门限 Γ_{mcs} 查询, 门限值见 DVB S2 协议描述文献^[12,13], $\eta_{i,m}^{mcs}$ 的查询方法^[20]用公式可表示为

$$\eta_{i,m}^{mcs} = \arg \max_{mcs} \{ \eta_{i,m}^{mcs} \mid \Gamma_{mcs} \leq SINR_{i,m} \} \quad (7)$$

定义在时隙 t 时刻, 完成业务队列中所有数据包传输的最大速率为 $R_{i,m}^{max}(t) = \sum_{q=1}^{Q_{i,m}(t)} s_{i,m,q}$ 。为满足对应 QoS 调度策略配置下的业务保障, 分配给用户的信息容量应满足如下约束:

$$T_{i,m}^{actual}(t) \geq \min \{ R_{i,m}^{guarantee}(t), R_{i,m}^{max}(t) \} \quad (8)$$

如无法满足上述条件, 说明用户队列数据包堆

积严重, 传输过程中无法满足 QoS 保障的调度时延要求, 系统会产生丢包。

由上述分析可知, 波束的吞吐量可表示为

$$T_i(t) = \frac{1}{N_T \times N_{i,m}} \sum_{m=1}^{N_{i,m}} \sum_{t=1}^{N_T} \delta_{i,m}(t) T_{i,m}^{actual}(t) \quad (9)$$

其中, N_T 表示系统运行的时间长度, 单位是时隙个数; $\delta_{i,m}(t)$ 表示当前时隙是否分配给用户 m , 0 表示不分配, 1 表示分配, 并且 1 个时隙最多只能分配给 1 个用户。

2 星地协同多目标优化问题模型

基于星地协同资源管理器的优化目标主要是在保障业务传输 QoS 的前提下, 降低网络业务的传输时延, 并最大化波束吞吐量。因此, 资源管理器的优化问题是一个多目标优化问题, 综合前述分析, 可以描述如下。

$$\min f = (f_1(t), \dots, f_x(t)) \quad (10)$$

$$\text{s. t. } T_i(t) \geq \frac{B_{tot}^f}{N_b(1 + \alpha)} \times \eta_{i,f}^{mcs} \geq T_{i,m}^{q,l}(t), \quad \forall \varepsilon_{i,m} \in \{2, 4\} \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^{N_b} (P_i^u + P_i^f) \leq P_{tot} \quad (12)$$

$$\sum_{m=1}^{N_{i,m}} \delta_{i,m}(t) \leq 1 \quad (13)$$

$$\sum_{m=1}^{N_{i,m}} (\varepsilon_{i,m} \% 2) \leq c \times CC \quad (14)$$

$$T_{i,m}^{actual}(t) \geq \min \{ R_{i,m}^{guarantee}(t), R_{i,m}^{max}(t) \} \quad (15)$$

式(10)表示协同资源管理器的多个优化目标, 其中, $f_1(t) = \bar{t}_{i,delay}$ 表示所有用户业务的平均时延。由于网络中存在多种类型的业务, 按业务类型将波束吞吐量优化目标分成多个子目标。本文考虑语音、视频两类业务, 语音类业务的平均吞吐量优化子目标为 $f_2(t) = -T_i(t)$ 且 $\forall \varepsilon_{i,m} \in \{1, 2\}$, 表示计算吞吐量时仅统计语音用户; 视频类业务的平均吞吐量子目标为 $f_3(t) = -T_i(t)$ 且 $\forall \varepsilon_{i,m} \in \{3, 4\}$, 表示计算吞吐量时仅统计视频用户。约束式(11)表示馈电链路的信息容量应该小于或等于用户链路的吞吐量, 因为一部分用户业务在星上处理不通过馈电链路传输。另外, 馈电链路的容量应该大于或等于用户链路中需要经过馈电链路传输到关口站的

用户业务的吞吐量(用 $T_i^{d,m}(t)$ 表示,即 $T_i(t)$ 中采用双跳通信模式的用户业务的吞吐量)。约束式(12)表示馈电链路和用户链路的总功率不能超过星上载荷的总功率。约束式(13)表示当前时隙 t 最多只能同时分配给 1 个用户。约束式(14)表示单跳通信的业务不能超过星上的处理能力,其中 $\forall \varepsilon_{i,m} \in \{1,2,3,4\}$, % 符号表示取余数, $\varepsilon_{i,m} \% 2$ 的值为 0 或 1,其值为 1 时表示用户业务单跳通信,为 0 时表示用户业务双跳通信。约束式(15)表示调度数据包时要考虑业务 QoS 保障。完成优化问题式(10)建模后,需要设计资源管理算法对优化问题进行求解,详细设计见下一节。

3 星地协同资源管理算法设计

模拟退火算法是基于迭代求解策略的一种随机寻优算法,具有通用性强、对优化问题依赖信息少的特点^[21],适用于多目标优化问题求解。本文的星地协同资源管理算法基于模拟退火算法原理进行设计,定义本文的星地协同算法为 SGCA (satellite ground collaborative allocation)。

在多目标优化问题中,通常无法满足所有子目标的最优化需求,一个子目标的性能提升,必然会导致另一子目标的性能下降。因此需要结合工程实际进行权重设计,定义优化目标对应的 K 个权重为 ω_k ,且满足 $\sum_{k=1}^K \omega_k = 1$,对应本文的优化目标 $f_x(t)$, $K = 3$,定义综合优化目标 F ,优化问题可转化为

$$\min F = \omega_1 f_1(t) + \omega_2 f_2(t) + \omega_3 f_3(t) \quad (16)$$

基于综合优化目标,本文算法的执行流程如下。

步骤 1 初始化算法。读取网络中计算资源能力、缓存资源能力、用户链路和馈电链路无线资源等基本配置信息。读取波束覆盖下用户的信息如用户数量、各用户需求的业务类型、用户 SINR 分布(本文用户随机分布,按照 ITU-R S. 672-4 天线模型设计覆盖场景,波束中心用户与边缘用户的 SINR 相差最大,可达到 3 dB)等信息。

步骤 2 判断波束下业务量。如有视频类业务需求,根据式(1)计算命中星上缓存中文件的个数,

并计算波束覆盖下所有业务的需求是否超过星上的处理能力,若是,则表明需要进行星地协同分配,继续下一步;否则,则表明星上资源足够处理所有业务,命中的视频和所有语音业务走星上,没有命中的业务走地面,跳转到步骤 11。

步骤 3 星地协同优化资源分配方案计算。产生随机初始分配方案 $X_{i,0} = ([\varepsilon_{i,0}, \varepsilon_{i,1}, \dots, \varepsilon_{i,m}])$,然后根据当前无线资源信息、用户接收信号的 SINR 分布,结合式(3)~式(9)计算当前配置下的业务平均传输时延、预计的用户链路业务的平均吞吐,并计算当前综合优化目标 F 的值。

步骤 4 确定模拟退火算法的初始温度 t_s 。

步骤 5 随机产生新的分配方案 X_{new} 。

步骤 6 根据表 1 业务的 QoS 业务速率保障需求,基于 X_{new} 方案,计算需要经过馈电链路传输的所有业务对馈电载波信息容量的需求,表示为 $capacity_{feed}^{need}$ 。然后根据馈电链路中载波的带宽、功率(参考约束式(11))计算馈电载波实际提供的信息容量 $capacity_{feed}^{request}$,并判断 $capacity_{feed}^{request} \geq capacity_{feed}^{need}$ 是否成立。如果成立则表明馈电资源有富余,在符合约束式(12)的前提下协调馈电链路的功率到用户链路,每次调整步长取 0.5 dB。每进行一步调整后,需重复步骤 6,直到馈电链路的载波提供的容量刚好满足用户业务的需求,保存新的星上功率分配方案。

步骤 7 更新用户 SINR 分布参数。结合式(3)~式(9)计算当前配置下的业务平均传输时延、预计的用户链路业务的平均吞吐量,并计算当前综合优化目标 F_{new} 的值。

步骤 8 比较综合优化目标 F 与 F_{new} 的值。若 $F_{new} < F$,则接受新的方案为优化解,保存该方案下所有的资源分配信息;若 $F_{new} \geq F$,当满足条件 $\exp\left[\frac{(F - F_{new})}{t_s}\right] > \text{random}(0,1)$ 时,仍接受 F_{new} 为最优解,否则保留 F 为最优解,不接受 F_{new} 。

步骤 9 进行退温操作,即 $t_{s+1} = \lambda t_s, s = s + 1$ 。

步骤 10 判断是否满足终止条件。终止条件为 $t_{s+1} \leq t_{stop}$,若否,跳转到步骤 5。反之,继续下一步。

步骤 11 根据最新的优化资源分配方案 F_{new} , 配置用户链路、馈电路径以及用户所有业务的星地传输分配方案等,并基于约束式(11)~式(15),开始在新方案下进行业务传输过程。根据仿真的时长设置,统计运行过程中用户的业务传输时延、用户吞吐量 and 丢包率,并统计波束吞吐量和丢包率等指标,直到运行结束。

4 仿真分析

本节采用仿真实验对设计的星地协同资源分配方法进行验证。实验中采用的仿真参数见表 2,参考 3GPP 38.821 的 NTN 仿真参数,星地链路的单向传输时延取平均值,即 $t_{trans1} = t_{trans2} \approx 135\text{ ms}$ 。另外,

表 2 星地网络仿真实验参数

参数	值	参数	值	参数	值
卫星经纬度	<0,100>	馈电路径总带宽	200 MHz	QoS 调度机制	1
卫星高度	35 786 km	用户链路总带宽	125 MHz	星上缓存大小	500
卫星波束数	120	用户链路载波带宽	31.25 MHz	权重	[0.2,0.5,0.3]
波尔茨曼常数	-228.6 dB	卫星馈电发送功率	30 W	业务到达率	1
频率复用因子 f_f	4	卫星波束发送功率	20 W	Zipf 分布常数 z	0.8
仿真时间	2 000 slot	GW 处理能力 CC	100 文件/波束	总文件数	5 000

4.1 业务平均传输时延分析

不同机制的业务平均时延仿真结果为图 3,坐标横轴业务的增长顺序按照先增加语音业务,达到 50 路语音后,再继续增加视频业务。

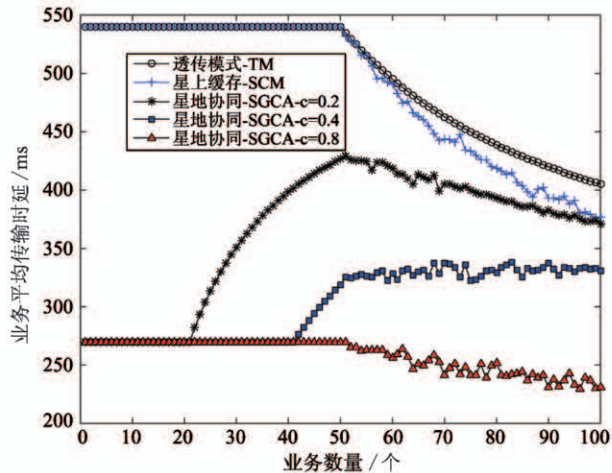


图 3 业务平均传输时延

语音和视频业务的业务模型服从泊松分布,业务到达率为 1,见文献[18]。公平考虑起见,假设波束覆盖下的语音和视频业务的需求比例为 50:50^[18-19]。

为了对设计的协同机制的性能进行评估,采用现有文献中的机制在相同场景中,使用相同的初始化参数进行对比实验。评估指标包括业务平均传输时延、波束丢包率及波束吞吐量等,主要对比算法如下。

- 传统透明转发机制 (transparent mechanism, TM)。透明转发卫星, QoS 公平调度机制。
- 星上缓存机制 (satellite cache mechanism, SCM)。星上处理卫星,缓存机制, QoS 公平调度机制。

由图中曲线可知, TM 机制下的用户平均时延最大, SCM 机制下星上缓存技术对语音类业务的平均时延没有改善的效果。但是,对视频类可缓存播放的业务, SCM 可降低业务平均传输时延。由于星上文件的命中率服从概率分布,当视频业务增加时存在很大的不确定性,运行结果存在波动。性能最好的是本文提出的 SGCA 算法,对改善语音和视频业务的平均传输时延有较大的提升。在处理能力因子 $c = 0.2$ 时,即协同机制效果最弱时,整体性能仍要好于 TM 和 SCM 机制。当 $c = 0.8$ 时,性能较其他机制大幅提升,与 TM 比较,降低平均时延 48.03%;与 SCM 相比较,降低平均时延 47.11%。

为降低业务传输时延, SGCA 算法会优先进行星上单跳业务处理,避免业务双跳传输增加时延。但星上计算载荷的处理能力有限,当波束中业务数超过星上计算能力时, SGCA 算法会以最小化业务

平均传输时延和最大化波束吞吐量为前提,选择将部分超出能力的业务通过馈电链路转移到 GW 进行处理。每转移一路语音类业务传输时延增加约 270 ms,每转移一路视频类业务传输时延增加约 135 ms。因此,转移到地面 GW 处理的语音或视频业务会提升整体业务的平均传输时延,导致曲线突增。从图 3 的业务平均时延曲线上来看,计算载荷的处理能力因子 c 值越大,平均时延指标的改善越明显。当 c 趋于 GW 处理能力时,语音类业务(通过馈电传输的时延代价远大于视频类业务)可以保障全部在星上处理,不会像 c 值不足时那样出现突增的现象。

4.2 波束的丢包率分析

SGCA 算法可以通过协调星上馈电链路空闲功率来增强用户链路的形式提升用户的 SINR 分布,从而提升用户在各时隙中传输的比特容量、降低波束的平均丢包率。

仿真结果见图 4,当波束下的业务低于 28 路语音业务时,用户链路的容量足够承载所有业务的传输,无需协调空闲无线资源,所以 TM、SCM、SGCA 3 种机制无明显差别。当语言业务数大于 28 时,波束负载量超过当前用户链路承载能力,TM 和 SCM 机制因不具备无线资源协调能力在改善丢包率方面没有起到作用;而 SGCA 算法对改善丢包率有较明显的郊果,整体来看,相对于其他技术,当 $c = 0.8$ 时,可以降低波束平均丢包率约 50.40%。

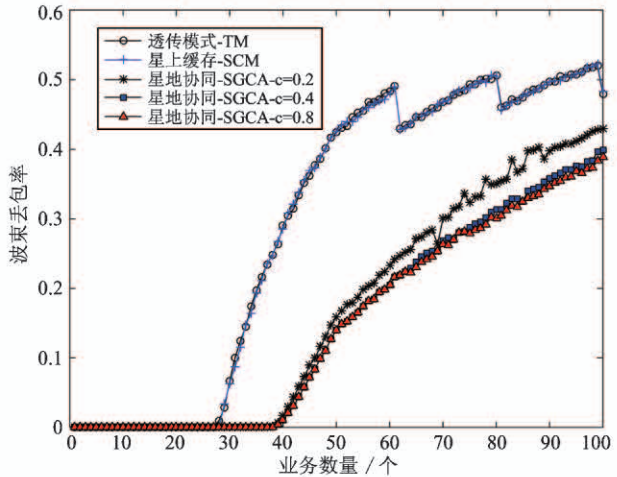


图 4 波束丢包率曲线

从图 4 可观察到,SGCA 算法在执行过程中,随着业务数量的持续增长,当增强计算载荷能力因子

时(c 由 0.2 逐步增强到 0.8),丢包率性能指标的改善呈现减缓的趋势。原因在于馈电链路无线资源有限,星上计算资源的倍增无法等效换取馈电无线资源以增强用户链路容量,并且视频业务的增长会与语音业务竞争星上计算资源,使得部分语音业务在馈电链路传输中增加馈电开销,导致 SGCA 算法在 c 增长到一定程度时对丢包率降低趋势减缓。

4.3 波束吞吐量分析

在仿真过程中,不同机制均采用相同的 QoS 业务保障机制,波束的吞吐指标统计以仿真时间内实际传输给用户的数据包为准。不同数量的多种业务在不同机制下的仿真曲线如图 5 所示。

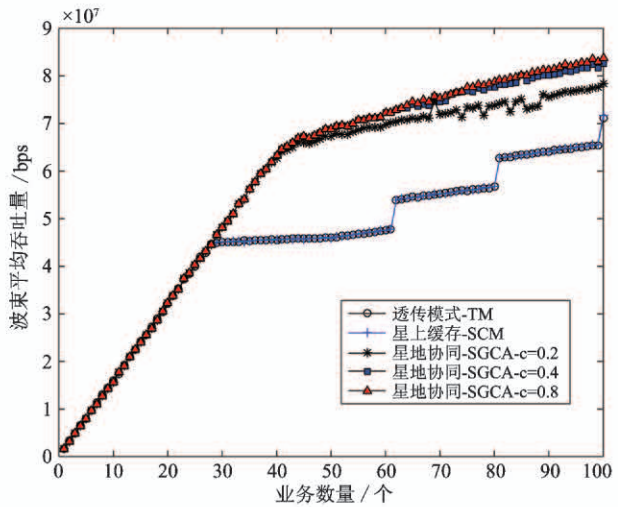


图 5 波束业务吞吐曲线

星上缓存技术对语音类业务没有效果。对于视频类业务,星上缓存技术节省了馈电链路下行方向的传输开销,降低关口站发射机的带宽和功率开销,但未节省星上的功率和带宽资源,所以对改善用户链路吞吐没有帮助。因此,SCM 技术不能改善波束吞吐量,和 TM 模式的曲线重合。当采用 SGCA 技术后,通过协调馈电链路、用户链路的无线资源,将馈电节省的功率用到用户链路可有效提升用户 SINR 分布,从而提升波束平均吞吐量,且 c 越大,提升越大。当 $c = 0.8$ 时,与 TM 和 SCM 技术相比,SGCA 技术可以提升吞吐量大约 29.26%。

由图 5 可观察到,在 SGCA 算法下,随着 c 的增加,吞吐量改善的幅度呈现减缓的趋势。具体原因是馈电无线资源受限及视频类业务加剧计算资源与

馈电资源的消耗,导致星上计算载荷能力虽然倍增,但吞吐量的改善没有大幅提升。

5 结 论

本文针对卫星网络中用户业务传输时延大、资源利用率低的问题,结合当前星上处理载荷、缓存技术的发展背景,并综合考虑实际卫星环境约束如用户分布、业务分布和 QoS 保障等,建立了系统多目标资源分配优化问题模型,并提出一种星地协同资源优化分配方法。通过仿真实验证明了星地协同方法在改善用户业务的平均时延、波束吞吐量及波束丢包率等方面要优于 TM 模式和 SCM 模式。此外,本文还分析了星上计算载荷处理能力与改善系统性能的关系,包括分析计算处理载荷能力对改善业务平均传输时延、波束丢包率及吞吐量等性能指标的影响。本文的分析和研究基于当前宽带卫星通信网络高速发展背景,可为星上处理技术研究、星地协同技术研究提供参考,具有重要意义。

参考文献

- [1] Zhou Y Q, Tian L, Liu L, et al. Fog computing enabled future mobile communication networks: a convergence of communication and computing[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2019, 57(5): 20-27
- [2] Su Y T, Liu Y Q, Zhou Y Q, et al. Broadband LEO satellite communications: architectures and key technologies [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2019, 26(2): 55-61
- [3] Liu L, Zhou Y Q, Yuan J H, et al. Economically optimal MS association for multimedia content delivery in cache-enabled heterogeneous cloud radio access networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, 37 (7):1584-1593
- [4] Liu L, Zhou Y Q, Garcia V, et al. Load aware joint CoMP clustering and inter-cell resource scheduling in heterogeneous ultra dense cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67 (3): 2741-2755
- [5] 汪春霆,李宁,翟立君,等. 卫星通信与地面 5G 的融合初探(一)[J]. *卫星与网络*, 2018(9):14-21
- [6] 何昇舟. 国际天地融合的卫星通信标准进展与分析 [J]. *信息通信技术与政策*, 2018(8):1-6
- [7] 3GPP. TR 22. 822 Study on using satellite access in 5G [EB/OL]. <http://www.3gpp.org/specifications/specification-numbering>: 3GPP, 2018
- [8] ETSI. EN 301 545-2 Digital video broadcasting (DVB); Second generation DVB; Interactive satellite system (DVB-RCS2); Part 2: lower layers for satellite standard [EB/OL]. <https://www.etsi.org/standards>; ETSI, 2014
- [9] Vasilakos A V, Li Z, Simon G, et al. Information centric network: research challenges and opportunities[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2015, 52: 1-10
- [10] Galluccio L, Morabito G, Palazzo S. Caching in information-centric satellite networks [C] // *Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Ottawa, USA, 2012:3306-3310
- [11] Kalantari A, Fittipaldi M, Chatzinotas S, et al. Cache-assisted hybrid satellite-terrestrial backhauling for 5G cellular networks[C] // *Proceedings of the 2017 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Singapore, 2017:1-6
- [12] ETSI. EN 302 307-1 Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for broadcasting, interactive services, news gathering and other broadband satellite applications, document[EB/OL]. <https://www.etsi.org/standards>; ETSI, 2014
- [13] ETSI. EN 302 307-2 Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for broadcasting, interactive services, news gathering and other broadband satellite applications[EB/OL]. <https://www.etsi.org/standards>; ETSI, 2014
- [14] Wu H, Li J, Lu H, et al. A two-layer caching model for content delivery services in satellite-terrestrial networks [C] // *Proceedings of the 2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Washington, USA, 2016:1-6
- [15] Lutz E. Co-channel interference in high-throughput multibeam satellite systems[C] // *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, London, UK, 2015: 885-891
- [16] Fonseca N J G, Sombrin J. Multi-beam reflector antenna system combining beam hopping and size reduction of ef-

- fectively used spots[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2012, 54(2): 88-99
- [17] Ahmad I, Nguyen K, Letzepis N. Performance analysis of high throughput satellite systems with optical feeder links [C]//Proceedings of the 2017 IEEE Global Communications Conference(GLOBECOM), Singapore, 2017:1-7
- [18] Cao H, Su Y T, Zhou Y Q, et al. QoS guaranteed load balancing in broadband multi-beam satellite networks[C]//Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Communications (ICC), Shanghai, China, 2019:1-6
- [19] Kim Y, Son K, Chong S. QoS scheduling for heterogeneous traffic in OFDMA-based wireless systems[C]//Proceedings of the 2009 IEEE Global Communications Conference(GLOBECOM), Honolulu, USA, 2009: 1-6
- [20] Couble Y, Rosenberg C, Chaput E, et al. Two-color scheme for a multi-beam satellite return link: impact of interference coordination[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018, 36(5):993-1003
- [21] Cocco G, Cola T, Angelone M, et al. Radio resource management optimization of flexible satellite payloads for DVB-S2 systems[J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2018, 64(2): 266-280

Research on resource management technology based on satellite-ground collaborative processing

Cao Huan^{* **}, Su Yongtao^{*}, Zhou Yiqing^{* **}, Ding Yashuai^{***}, Qiu Dawei^{* **}, Long Long^{* **}

(^{*} Beijing Key Laboratory of Mobile Computing and Pervasive Device, Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

(^{**} University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

(^{***} Company of Sylincom, Beijing 100190)

Abstract

To solve the problems of large transmission delay and low resource utilization in satellite communication networks(SCN), a resource allocation method based on satellite-ground cooperative processing is proposed. The method takes the on-board computing capability, on-board cache capability and on-board wireless resource coordination capability into account, and cooperates with the ground resource manager to improve resource utilization efficiency. Aiming at minimizing the average transmission delay and maximizing the throughput of each beam in SCN, a multi-objective optimization problem model is established and the key factors such as user distribution, quality of service (QoS) guarantee and user channel conditions are considered in the model. Moreover, a simulated annealing based satellite-ground cooperative resource allocation method is designed to solve the optimization problem. The simulation results show that, compared with the existing technologies, the proposed method can effectively reduce the average transmission delay of users by 48.03%, improve the throughput of each beam in SCN by 29.26%, and reduce the packet loss rate by 50.40%.

Key words: satellite-ground coordination, satellite communication, resource management, quality of service (QoS) guarantee, multi-objective optimization