

多业务 LEO 卫星网络中最优呼叫允许控制及切换管理策略

丁 丁 马东堂 魏急波 王国玉
(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘 要: 该文针对多业务条件下的 LEO(Low-Earth-Orbit)卫星网络,提出了一种新的基于最优多门限信道预留(OMTCR)的呼叫允许控制(CAC)及切换管理策略,建立了评价 LEO 卫星网络连接级 QoS 性能的理论分析模型框架。借鉴经济学“收益函数”的概念分别建立了无 QoS 约束和有 QoS 约束的系统收益目标优化模型,求解在给定系统参数和输入业务条件下 OMTCR 的最优门限参数矢量。仿真结果表明 OMTCR 能够在不同用户 QoS 要求和系统收益目标的多业务环境下获得比传统 CS(Completely Sharing)策略及 GC(Guard Channel)策略更好的性能。

关键词: LEO 卫星网络; CAC 和切换管理机制; 信道预留; 收益函数; 服务质量

中图分类号: TN927

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)07-1559-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00453

Optimal Call Admission Control and Handover Management Scheme in Multiservice LEO Satellite Networks

Ding Ding Ma Dong-tang Wei Ji-bo Wang Guo-yu

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In the presence of heterogeneous traffic flows generated by services with different QoS requirements in Low-Earth-Orbit (LEO) satellite networks, a framework of Call Admission Control (CAC) and handover management scheme is proposed based on Optimal Multi-Threshold Channel Reservation (OMTCR) policy as well as its corresponding theoretic analysis approaches to evaluate the connection-level QoS metrics. To determine the optimal threshold parameters vector of OMTCR under given system parameters and input traffic conditions, the revenue concept in economics is referenced to formulate unconstrained and QoS-constrained system revenue objective optimization models. Results are presented to demonstrate the better performance of the proposed OMTCR than conventional Completely Sharing (CS) and Guard Channel (GC) policies under heterogeneous traffic conditions with different user QoS requirements and system revenue objectives.

Key words: LEO satellite networks; CAC and handover management scheme; Channel reservation; Revenue function; QoS

1 引言

发展下一代星座系统和提供广泛的业务支持正在成为当前 LEO(Low-Earth-Orbit)卫星网络系统重要的发展方向。考虑到不同类型的业务具有不同的统计特性和 QoS 要求,如何为广泛的业务类型提供满意的支持,不仅是当前无线通信领域的研究热点,更是指导我国进行 LEO 卫星系统建设过程中亟待解决的问题。基于门限的信道预留策略是无线通信网络在多业务条件下保障不同业务各自 QoS 要求的经典方法,例如在电话/电路交换网络中的线路预留策略,以及移动蜂窝系统中的保护信道策略^[1]。我们在先前的研究中提出的多门限信道预留(MTCR)^[2]策略能够通过多门限的设置灵活地调整

网络业务流(包括业务类型和呼叫状态)的优先级,很好地解决了多业务 LEO 卫星网络频繁发生的切换事件对 QoS 的影响。该策略下的系统稳态概率具有易于求解的乘积形式,能够应用卷积算法以较低的复杂度进行快速求解,从而巧妙地避免了“状态空间爆炸”问题。

虽然已有大量的文献对于 LEO 卫星网络的切换管理机制进行了研究^[3-7],但是针对多业务条件(即不同业务类型具有不同的带宽要求和平均服务时间)的研究却并不多。文献[7]针对简单语音业务的网络环境提出了基于时间的信道预留机制(Time-based Channel Reservation Algorithm, TCRA),能够在继承经典 GH(Guaranteed Handover)算法^[4]优势的同时提高信道利用率。文献[5]借鉴 TCRA 算法的思想针对多业务条件下的移动卫星系统提出了

一种自适应的基于时间的信道预留方案(Adaptive Time-based Channel Reservation, ATCR), 并采用 M/M/C/C 队列稳态概率来近似地估计实时业务的预留信道数目。文献[6]针对非高轨卫星系统提出了多业务自适应切换(Multiservice Adaptive Handover, MAH)机制, 从一定程度上解决了多业务用户间的不公平问题。MAH 的估计方法虽然简单, 但是在实际系统中该算法要求实时地监控系统状态并通知地面用户, 代价很大且难以实现。

本文基于多门限的信道预留策略进行 CAC 与切换管理机制一体化设计, 从连接级对系统资源进行高效地配置, 实现用户 QoS 要求和系统整体收益之间的折中平衡。借鉴经济学中的“收益函数”概念对系统整体收益进行了定义, 将最优门限策略矢量参数的求解问题描述为两类目标优化模型: 无 QoS 约束和有 QoS 约束的组合最优化问题。设计目标归结如下: (1)支持多种业务类型, 优先保障高等级业务及切换业务带宽要求; (2)优化门限策略参数矢量, 确保系统收益目标最大化; (3)根据系统收益目标定义, 保障每一类业务的 QoS 要求; (4)计算复杂度低、易于实现。

2 系统模型及 OMTCR 机制工作流程

假设系统采用固定信道分配方式, 每一波束覆盖区分配固定的 C 条信道, 独立地研究每一波束覆盖区。采用连续排列的矩形表示波束覆盖区¹⁾, 用户穿越覆盖区的时间恒等于 t_{cell} 。

假设系统支持 S 种类型的业务, 为了满足时延、吞吐量等其他性能指标的要求, 第 i 类业务带宽要求为 $c^{(i)}$, $i=1,2,\dots,S$, 并将业务按其带宽要求的升序排列, $c^{(1)} \leq c^{(2)} \leq \dots \leq c^{(S)}$ 。根据呼叫连接状态(新呼叫和切换呼叫)和业务类型将网络中的业务连接分为 $2S$ 类。不失一般性, 假设切换呼叫连接优先于新呼叫连接, 第 i 类业务优先于第 $i-1$ 类业务($i=2,3,\dots,S$), 呼叫连接状态优先于业务类型(任意类型的切换呼叫连接都优先于新呼叫连接)。理论上讲, 在一个具有 S 种业务类型和 $2S$ 个 QoS 约束条件(S 个新呼叫连接 QoS 约束, S 个切换呼叫连接 QoS 约束)的多业务移动环境中, 只需要 $2S-1$ 个独立的控制变量就可以分别控制 $2S$ 类业务连接^[8]。从直观上看, 业务连接的优先级与其允许接入的信道数成正比, 换句话说, 新呼叫连接阻塞概率 P_b (切换呼叫连接丢

失概率 P_d ²⁾ 新呼叫连接(切换呼叫连接)被限制使用的信道数的单调升函数。据此采用 $2S-1$ 个独立的门限参数来控制网络业务流:

$$K_1 \leq K_2 \leq \dots \leq K_{2S-1} \quad (1)$$

其中 $K_i (i=1,2,\dots,S)$ 为第 i 类新呼叫连接的允许带宽门限, $K_j (j=S+1,S+2,\dots,2S)$ 为第 $j-S$ 类切换呼叫连接的允许带宽门限。实际上, OMTCR 是一种基于多门限信道预留的 CAC 和切换管理机制, 下文将对其策略参数的选择进行优化。OMTCR 工作流程见图 1。

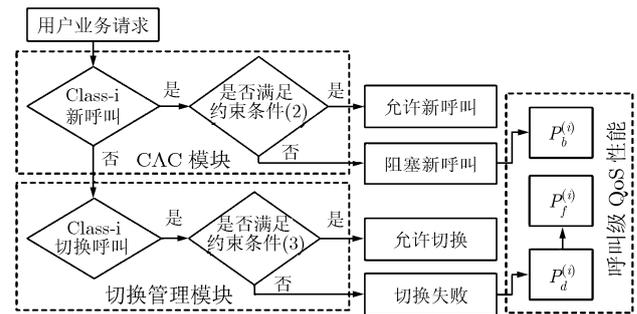


图 1 OMTCR 机制工作流程

定义系统状态矢量 $\mathbf{m} = (x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(S)}, y^{(1)}, y^{(2)}, \dots, y^{(S)})$, 其中 $x^{(i)} \in \mathbb{Z}^+$ 表示第 i 类新呼叫连接个数, $y^{(i)} \in \mathbb{Z}^+$ 表示第 i 类切换呼叫连接个数(方便叙述, 后文将用上标 (i) 来表示第 i 类业务)。系统状态空间可以表示为 $\Omega_{cs} \triangleq \left\{ \mathbf{m} : \mathbf{m} \cdot \mathbf{c}^T \triangleq \sum_{i=1}^S (x^{(i)} + y^{(i)}) \cdot c^{(i)} \leq C \right\}$, $\mathbf{c} = (c^{(1)}, c^{(2)}, \dots, c^{(S)})$, 并满足以下约束条件:

$$x^{(i)} \cdot c^{(i)} \leq K_i, \quad i = 1, 2, \dots, S \quad (2)$$

$$y^{(j)} \cdot c^{(j)} \leq K_{j+S}, \quad j = 1, 2, \dots, S-1 \quad (3)$$

OMTCR 是一种面向波束小区的无线资源管理算法, 在星上以分布式形式实现。针对每个波束实现独立的 CAC 和切换管理控制, 负责管理和监控本波束内业务连接的带宽使用情况, 并在内存中保存相应系统状态信息。从协议栈的角度来说 OMTCR 位于数据链路层, 当有连接请求到达时, 该模块首先从数据分组标识码中提取业务类型信息和连接状态信息, 然后从内存中读取当前系统状态信息, 再依据所设计的策略进行判决。

3 理论模型框架

本文的主要贡献在于, 提出了支持多业务的

¹⁾ 这一假设在波束覆盖区之间的重叠百分比达到一定程度时是可以实现的^[7]。

²⁾ 区别于整个呼叫生命周期内的长时统计量——强制性中断概率 P_f : 一个呼叫通常经历多次切换过程, 每次切换的失败概率为 P_d 。在各态历经假设条件下, 波束覆盖区统计平均量 P_d 与呼叫连接统计平均量之间存在量化关系, 见式(10)。

CAC 及切换管理机制,建立了 LEO 卫星网络呼叫级性能理论分析模型框架,并建立目标优化模型对协议参数进行优化选择。

3.1 呼叫级性能分析模型

系统状态可表示为连续时间 Markov 链,其 $2S$ 维的状态转移图受到约束条件式(2)和式(3)的限制,有效空间内的所有路径均满足 Kolmogorov 准则,因此该过程具有时间可逆性,稳态分布具有乘积形式^[9]。根据局部平衡条件计算得到稳态分布相对概率 $q(\mathbf{m})$, $\rho_{nc}^{(i)}$ ($\rho_{ho}^{(i)}$) 为第 i 类新呼叫(切换呼叫)业务负载强度,基本假设条件及推导过程详见文献[2]。

$$q(\mathbf{m}) = \prod_{i=1}^S \frac{(\rho_{nc}^{(i)})^{x^{(i)}}}{x^{(i)}!} \cdot \frac{(\rho_{ho}^{(i)})^{y^{(i)}}}{y^{(i)}!} \quad (4)$$

归一化后得到稳态分布绝对概率 $p(\mathbf{m}) = q(\mathbf{m})/Q$, 其中归一化常数 $Q = \sum_{\mathbf{m} \in \Omega_{cs}} q(\mathbf{m})$ 。

令 $\Omega_{block}^{(i)} \subset \Omega_{cs}$ 表示新呼叫连接发生阻塞的边缘状态空间, $\Omega_{drop}^{(i)} \subset \Omega_{cs}$ 表示切换呼叫连接切换失败的边缘状态空间:

$$\Omega_{block}^{(i)} \triangleq \{\mathbf{m} \in \Omega_{cs} \mid c^{(i)} + x^{(i)} \cdot c^{(i)} > K_i \vee c^{(i)} + \mathbf{m} \cdot \mathbf{c}^T > C\}, i = 1, \dots, S \quad (5)$$

$$\Omega_{drop}^{(j)} \triangleq \{\mathbf{m} \in \Omega_{cs} \mid c^{(j)} + y^{(j)} \cdot c^{(j)} > K_{j+S} \vee c^{(j)} + \mathbf{m} \cdot \mathbf{c}^T > C\}, j = 1, \dots, S-1 \quad (6)$$

$$\Omega_{drop}^{(2S)} \triangleq \{\mathbf{m} \in \Omega_{cs} \mid c^{(S)} + y^{(S)} \cdot c^{(S)} > C \vee c^{(S)} + \mathbf{m} \cdot \mathbf{c}^T > C\} \quad (7)$$

根据 Poisson 到达过程的 PASTA 性质,呼叫拥塞等于时间拥塞:

$$P_b^{(i)} = \sum_{\mathbf{m} \in \Omega_{block}^{(i)}} p(\mathbf{m}) \quad (8)$$

$$P_d^{(i)} = \sum_{\mathbf{m} \in \Omega_{drop}^{(i)}} p(\mathbf{m}) \quad (9)$$

再假设切换发生过程是各态历经的:一个呼叫连接发生切换的次数可以由一个波束覆盖区内发生切换的统计性次数表示,即 $n_h^{(i)} = \lambda_{ho}^{(i)}/\lambda_{nc}^{(i)}$ 。因此,已接入系统的呼叫连接由于切换失败而发生强制性中断的概率 $P_f^{(i)}$ 可以写成:

$$P_f^{(i)} = \frac{n_h^{(i)} \cdot P_d^{(i)}}{1 - P_b^{(i)}} = \frac{P_d^{(i)} \cdot P_{h1}^{(i)}}{1 - (1 - P_d^{(i)}) \cdot P_{h2}^{(i)}} \quad (10)$$

显见以上计算过程需要采用迭代的方式进行。设初值 $P_b^{(i)} = 0$ 及 $P_f^{(i)} = 0$, 迭代终止条件为 $P_b^{(i)}$ 和 $P_f^{(i)}$ 的连续两次迭代结果相对误差均不超过 10^{-5} 。

3.2 系统收益目标优化模型

不失一般性,定义系统收益为系统在稳态下所有呼叫连接所贡献的总收益: $R = \sum_{i=1}^S \alpha^{(i)} \cdot (1 - P_b^{(i)}) \cdot \lambda_{nc}^{(i)} + \beta^{(i)} \cdot (1 - P_d^{(i)}) \cdot \lambda_{ho}^{(i)}$, 其中

$\alpha^{(i)}$ ($\beta^{(i)}$) 表示接受第 i 类业务新呼叫(切换呼叫)连接请求的广义收益系数。考虑如下两个最优化问题:

(1)在没有特定 QoS 约束的条件下使系统收益最大化(OPT1) 当用户对于新呼叫阻塞概率 $P_b^{(i)}$ 和呼叫强制性中断概率 $P_f^{(i)}$ 没有特殊要求时,最优门限策略矢量参数 \mathbf{K}_{opt} 应使系统整体收益最大化,即最大化非线性目标函数为

$$\text{Maximize}_{\mathbf{K}=(K_1, K_2, \dots, K_{2S})} \sum_{i=1}^S \alpha^{(i)} \cdot (1 - P_b^{(i)}) \cdot \lambda_{nc}^{(i)} + \beta^{(i)} \cdot (1 - P_d^{(i)}) \cdot \lambda_{ho}^{(i)} \quad (11)$$

去掉式(11)中的常数项,该问题等价于以下最小化非线性目标函数(OPT1):

$$\text{Minimize}_{\mathbf{K}=(K_1, K_2, \dots, K_{2S})} \sum_{i=1}^S \alpha^{(i)} \cdot P_b^{(i)} \cdot \lambda_{nc}^{(i)} + \beta^{(i)} \cdot P_d^{(i)} \cdot \lambda_{ho}^{(i)} \quad (12)$$

OPT1 可以解释为:使系统拒绝用户连接请求的总惩罚代价(收益损失)最小化。

(2)在特定 QoS 约束条件下使系统收益最大化(OPT2) 如果用户要求呼叫强制性中断概率 $P_f^{(i)}$ 不得超过预定上限,则最优门限策略矢量参数 \mathbf{K}_{opt} 应在此约束条件下使系统整体收益达到最大,即最大化非线性目标函数为

$$\text{Maximize}_{\mathbf{K}=(K_1, K_2, \dots, K_{2S})} \sum_{i=1}^S \alpha^{(i)} \cdot (1 - P_b^{(i)}) \cdot \lambda_{nc}^{(i)} \quad (13)$$

同时满足约束条件:

$$P_f^{(i)} \leq \Gamma_f^{(i)} \quad (14)$$

注意到目标函数式(13)中没有包含切换成功所带来的系统收益,而是引入了新的约束条件式(14),其中 $\Gamma_f^{(i)}$ 为第 i 类业务所能够容忍的最大强制性中断概率。其含义是首先保证系统已经允许接入的用户的 QoS 要求(式(14)),然后使系统收益最大化。同理去掉式(13)中的常数项,该问题等价于以下最小化非线性目标函数(OPT2):

$$\text{Minimize}_{\mathbf{K}=(K_1, K_2, \dots, K_{2S})} \sum_{i=1}^S \alpha^{(i)} \cdot P_b^{(i)} \cdot \lambda_{nc}^{(i)} \quad (15)$$

且满足约束条件式(14)。OPT2 可解释为:在保证系统当前用户 QoS 要求的前提下,使系统拒绝新用户连接请求的收益损失最小。

至此,无 QoS 约束和有 QoS 约束的 OMTCR 算法可以分别描述为组合最优化(combinatorial optimization)问题 OPT1 和 OPT2,并通过穷尽搜索或其他元启发式算法^[10]求解。值得注意的是,OMTCR 的隐含条件式(1)极大地缩减了搜索范围。

4 数值结果

本节将在支持两种实时业务的 LEO 卫星网络环境下对 OMTCR 的性能进行评估,并根据所建立的系统收益目标优化模型对 OMTCR 门限策略参数

矢量 \mathbf{K} 进行优化选择。仿真场景假设波束覆盖区半径约为 668 km, 波束覆盖区穿越时间约为 115.98 s。每波束覆盖区固定分配 20 条信道。参照 3 GPP 多媒体业务编解码规范, 设置基本带宽单元(Basic Bandwidth Unit, BBU)为 32 kb/s。考虑系统向用户提供 Class-1 语音业务和 Class-2 视频业务, 语音连接速率要求为 32 kb/s, 视频连接速率要求为 64 kb/s。Class-2 视频业务的带宽要求较大, 优先级较高, 且收益系数较大。假设业务服从均匀分布, 业务呼叫请求到达为 Poisson 过程, 呼叫持续时间服从负指数分布。主要系统参数和业务参数设置见表 1。

表 1 主要系统参数及业务参数

名称	符号	取值
每波束覆盖区内信道数	C	20 BBU
波束覆盖区穿越时间	t_{cell}	115.98 s
业务带宽要求	$[c^{(1)}, c^{(2)}]$	[1, 2] BBU
平均呼叫持续时间	$[t_{\text{call}}^{(1)}, t_{\text{call}}^{(2)}]$	[180, 180] s
新呼叫连接收益系数	$[\alpha^{(1)}, \alpha^{(2)}]$	[1, 5]
切换呼叫连接收益系数	$[\beta^{(1)}, \beta^{(2)}]$	[10, 100]

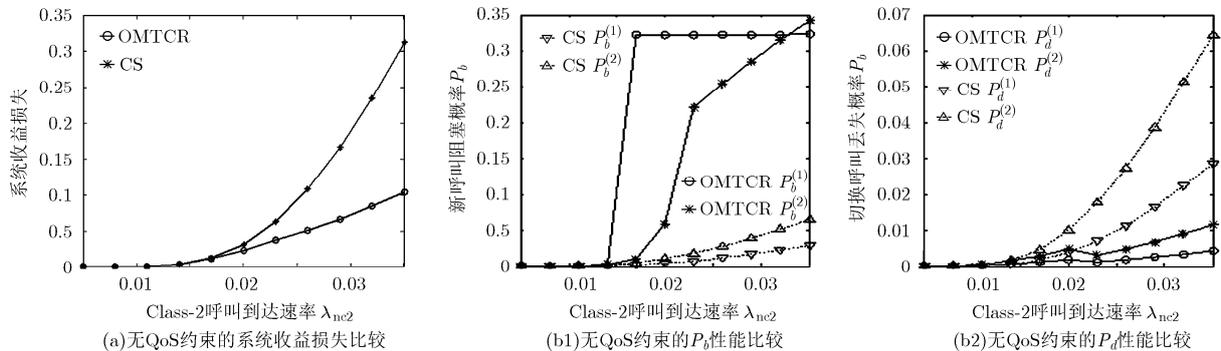


图 2 OMTCR 和 CS 策略在无 QoS 约束条件下系统收益损失函数和连接级性能指标随输入业务强度的变化

4.2 基于满足 QoS 约束的系统收益优化模型 (OPT2)

OPT2 问题满足约束条件式(14), 仿真中假设用户所能够容忍的 P_f 上限为 $[\Gamma_f^{(1)}, \Gamma_f^{(2)}] = [1 \times 10^{-3}, 1.5 \times 10^{-3}]$ 。图 3 给出了在此约束条件下 OMTCR 和 GC 策略的收益损失函数(OPT2)和连接级性能指标随输入业务强度变化的曲线。仿真采用 GC(18)策略³⁾(此处即 $\mathbf{K}=[2, 2, 20]$, 表示固定预留 18 条信

³⁾ 采用 GC(18)策略进行比较的原因是, 此时在仿真区间范围以内系统采用 CS 策略已经不能满足用户的 QoS 要求, 而且在所有可能的 GC 策略中, 只有 GC(17), GC(18)和 GC(19)策略能够满足 QoS 约束条件。

下面将分别讨论采用两种系统收益目标优化模型时 OMTCR 策略的性能, 并与经典的 CS 策略和 GC 策略进行比较。为了观察系统性能随输入业务强度变化的情况并方便表述, 仿真中固定 Class-1 业务的呼叫到达速率为 0.01 calls/s/cell, 以固定步长不断提高 Class-2 业务的呼叫到达速率(0.005~0.035 calls/s/cell)。

4.1 基于无 QoS 约束的系统收益优化模型(OPT1)

给定以上系统及业务参数, 图 2 分别对 OMTCR 和 CS 策略在无 QoS 约束条件下的收益损失函数(OPT1)和连接级性能指标随输入业务强度变化的情况进行了比较。图 2(a)表明 OMTCR 的系统收益损失函数(OPT1)在仿真区间范围内总是明显低于 CS 策略。事实上, OMTCR 对应于门限参数矢量可行域内使系统收益损失最小的策略($\mathbf{K}=\mathbf{K}_{\text{opt}}$)。图 2(b1)和图 2(b2)说明与 CS 策略相比, OMTCR 虽然不能获得最低的 P_b 或 P_d , 但却能使系统收益损失达到最小。这说明 OMTCR 能够适当地权衡新呼叫阻塞和切换呼叫丢失对系统性能所造成的影响, 使系统整体收益达到最优。

道为切换连接请求专用)与 OMTCR 进行比较。图 3(a)表明 OMTCR 相比于 GC(18)能够在仿真区间内总是达到较低的系统收益损失, 同时图 3(b)说明在仿真区间内这两种策略总是能够满足用户的 QoS 要求。事实上, OMTCR 对应于门限参数矢量可行域内使系统收益损失最小的策略($\mathbf{K}=\mathbf{K}_{\text{opt}}$)。这说明 OMTCR 能够权衡用户的 QoS 要求和系统设计的收益目标, 在保证已接入系统的用户 QoS 要求的前提下, 使系统拒绝新用户接入请求所造成的收益损失达到最小, 从而使系统整体收益达到最优。

5 结论

本文针对具有高度动态特性的 LEO 卫星网络

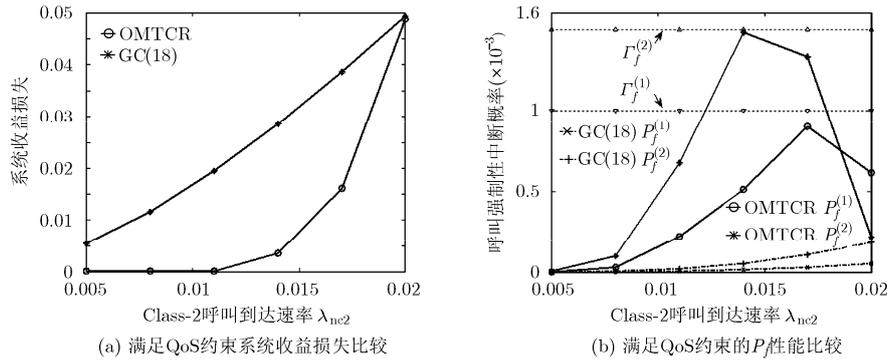


图3 OMTCR 和 GC 策略在满足 QoS 约束条件下系统收益损失函数和连接级性能指标随输入业务强度的变化

设计了合理而高效的 CAC 和切换管理机制 OMTCR, 能够在保持最优系统收益的同时适应于不同的业务条件和满足不同的 QoS 要求, 达到系统级目标和用户级目标的折中平衡。提出了多业务 LEO 卫星网络连接级 QoS 性能理论分析框架, 证明了在 OMTCR 策略下系统状态呈乘积形式的稳态分布, 并能够通过卷积算法进行快速求解。建立了无 QoS 约束和有 QoS 约束条件下的系统收益目标优化模型, 由此确定在不同的系统级目标和用户级目标要求下的最优门限参数矢量。仿真结果表明在无 QoS 约束和有 QoS 约束条件下 OMTCR 均能达到比传统 CS 和 GC 策略更好的性能。

参考文献

- [1] Hong D and Rappaport S S. Traffic model and performance analysis for cellular mobile radio telephone systems with prioritized and nonprioritized handoff procedures. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1986, 35(3): 77-92.
- [2] Ding Ding, Ma Dong-tang, Li Min, and Wei Ji-bo. Analytical approach of QoS-guaranteed call admission control and handover management scheme in multiservice LEO satellite networks. Accepted by the 60th International Astronautical Congress, Daejeon, Republic of Korea, 2009.
- [3] Chowdhury P K, Atiquzzaman M, and Ivancic W. Handover schemes in satellite networks: State-of-the-art and future research directions. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2006, 8(4): 2-14.
- [4] G' erard Maral, Joaquin Restrepo, and Enrico Del Re, *et al.* Performance analysis for a guaranteed handover service in an LEO constellation with satellite-fixed cell. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1998, 47(4): 1200-1214.
- [5] Riadh Dhaou, Andr' e-Luc Beylot, and Monique Becker. ATCR: An Adaptive Time-based Channel Reservation

mechanism for LEO satellite fixed cell systems [C]. IEEE 58th Vehicular Technology Conference, Orlando, Florida, USA, Oct. 6-9, 2003, Vol. 4: 2688-2692.

- [6] Papapetrou E, Todorova P, Karapantazis S, and Pavlidou N. Adaptive handover management for multiservice NGSO satellite systems [C]. IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Athens, Greece, Sep. 3-7, 2007: 1-5.
- [7] Boukhatem L, Beylot A L, Gaïti D, and Pujolle G. TCRA: A time-based channel reservation scheme for handover requests in LEO satellite systems. *International Journal on Satellite Communication Networks*, 2003, 21(2): 227-240.
- [8] Heraclio Heredia-Ureta, Felipe A, Cruz-Pérez, and Lauro Ortigoza-Guerrero. Capacity optimization in multi-service mobile wireless networks with multiple fractional channel reservation. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2003, 52(6): 1519-1539.
- [9] Ross K. Multiservice Loss Model For Broadband Telecommunication Networks [M]. Berlin, Springer, 1995, Ch.5.
- [10] Blum C and Roli A. Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM Computer Survey*, 2003, 35(3): 268-308.

丁 丁: 女, 1982 年生, 博士生, 研究方向为无线及移动网络、切换及无线资源管理、LEO 卫星网络、无线网络建模与性能分析等。

马东堂: 男, 1969 年生, 副教授, 研究方向为大气激光通信和宽带接入网络技术。

魏急波: 男, 1967 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为宽带无线通信中的数字信号处理。

王国玉: 男, 1962 年生, 研究员, 博士生导师, 从事电子信息对抗系统及其评估、综合信息感知与处理等方面工作。