

低轨卫星通信信道分配策略

刘 军¹, 李国嘉¹, 王 婧¹, 李梓楠²

(1. 东北大学 计算机科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110169; 2. 中国人民解放军 66389 部队, 北京 100095)

摘 要: 针对低轨卫星通信轨道高度低、运动速度快、切换频繁的特点以及业务类型和用户类型逐渐丰富的发展趋势, 提出高业务量下基于差分进化算法的自适应信道预留策略, 动态调整信道预留数目, 保证高优先级用户的及时接入; 低业务量时提出非预留信道分配方案, 满足高优先级用户的理想带宽需求, 充分利用系统的信道资源. 小区信道全部被占用时, 提出增强型排队策略, 令暂时无法接入的用户加入排队序列, 根据综合优先级依次接入, 进一步提升用户体验和系统整体性能. 实验证明, 该方案可有效提高系统资源利用率, 保障各类用户的体验, 使系统整体服务质量更佳.

关 键 词: 低轨卫星通信; 信道预留; 非预留信道分配; 增强型排队

中图分类号: TN 92 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2019)06-0807-06

Channel Assignment Strategy for Low Earth Orbit Satellite Communication

LIU Jun¹, LI Guo-jia¹, WANG Jing¹, LI Zi-nan²

(1. School of Computer Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110169, China; 2. PLA 66389 Troops, Beijing 100095, China. Corresponding author: LIU Jun, E-mail: liujun@ise.neu.edu.cn)

Abstract: For the low earth orbit satellite communication, in view of the characteristics of low altitude, fast speed and frequent switching, single channel allocation strategy cannot improve the experience of more users and the utilization of channel resources under a low traffic scene. The adaptive channel reservation strategy based on differential evolution algorithm for high traffic conditions is proposed, which dynamically adjusts the number of channel reservation to ensure the timely access of high priority users. For low traffic, the non-reserved channel allocation scheme is put forward to meet the ideal bandwidth requirements of high priority users and to make full use of the channel resources of the system. In addition, to further improve the user experience, taking into account the comprehensive priority, the enhanced queuing strategy allows users that are unable to access to join the waiting queue temporarily when all the cell channels are occupied. Experiments show that the scheme can effectively improve the utilization rate of system resources and guarantee the quality of service of high priority and user experience, and make the whole system service quality better.

Key words: LEO satellite communication; channel reservation; non-reserved channel assignment; enhanced queue

卫星通信凭借其覆盖范围广、不受地理条件影响、可靠性高、抗毁能力强等优势, 广泛应用于地面通信系统不易覆盖或建设成本过高的领域及特殊领域^[1-3]. 与中高轨卫星通信系统相比, 低轨(low earth orbit, LEO)卫星通信^[4]系统链路时延小、路径损耗低、便于终端设备小型化, 同时, 点波

束和频率复用技术的发展也为其提供了技术保障, 被认为是最有发展前景的卫星通信系统. 然而, 低轨卫星运动速度快, 用户切换频繁^[5], 不合理的信道分配策略会造成用户间的频率干扰, 降低资源利用率, 影响用户体验. 因此, 合理的信道分配策略对提升系统整体的服务质量至关重要.

低轨卫星通信系统的信道分配分为两种:一种是卫星控制中心为各个波束小区分配信道;另一种是各波束小区为用户分配信道.

随着卫星通信的快速发展,用户密度越来越大,业务类型逐渐丰富,单一的信道分配策略无法最大程度地满足全部用户的需求. 为了提高卫星通信系统信道资源利用率,提升系统的整体性能,需要针对不同用户对通信质量的需求以及多媒体业务的特点进行分析,设计合理有效的信道分配整体方案.

本文基于固定信道分配(fixed channel assignment, FCA)的方式,即系统通过事先的分配,让每个卫星波束小区具有相同的信道数量且信道数量不随系统状态的变化而改变,对分配信

道给用户的信道分配策略展开研究.

目前的信道分配策略主要包含信道借用^[6-7]、保证切换和信道预留策略. 文献[8]的信道预留策略为固定信道预留,易造成较高的新呼叫阻塞率;文献[9-10]为不同形式的动态信道预留,能在保护切换呼叫的同时避免过高的新呼叫阻塞率,但方案较为单一,系统整体服务质量有待提高. 文献[11]的动态预留策略依赖于 GPS 等定位装置,增加了信令交互次数,增大了系统开销.

如图 1 所示,本文针对卫星通信的发展现状,综合考虑业务类型的多样性、资源利用的公平性、用户优先级以及系统资源利用率等,面向具体应用场景,提出低轨卫星通信信道分配的整体方案.

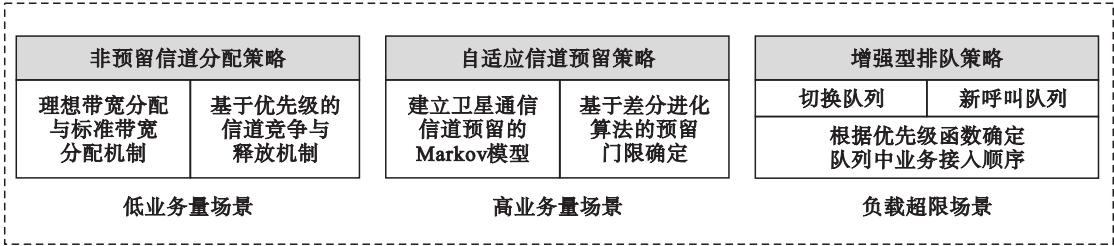


图 1 低轨卫星通信信道分配整体方案

Fig. 1 Entire design schemes of channel assignment for LEO satellite communication

1 信道分配策略

1.1 自适应信道预留

根据业务特征,将业务分为两种类型. 一类是网页浏览、文件传输等对实时性要求不高,但增加带宽会明显提升用户体验的业务;另一类是语音业务、流类业务等对时延和基本带宽要求严格,但持续增加带宽影响微乎其微的业务.

图 2 为将小区中的信道分为普通信道和预留信道. 预留信道部分有一类业务新呼叫截止门限 k_1 ,二类业务新呼叫截止门限 k_2 ,一类业务切换截止门限 k'_1 和二类业务切换截止门限 k'_2 . 即, k_1 与 k_2 间的信道允许二类新呼叫和切换呼叫接入; k_2 与 k'_1 间的信道只允许切换呼叫接入;而 k'_1 与 k'_2 间的信道只允许二类业务的切换呼叫接入. 门限 k_1 以内的信道为普通信道,允许任何业务接入, C_{thresh1} 和 C_{thresh2} 是普通信道占用数量的阈值.

假设新呼叫和切换呼叫的到达服从独立的 Poisson 分布,平均到达率分别用 λ_n 和 λ_h 表示, λ_n^i 表示 i 类业务的新呼叫到达率, $\lambda_h^i = l_i \lambda_n$, 且 $\sum_{i=1}^2 l_i = 1$.

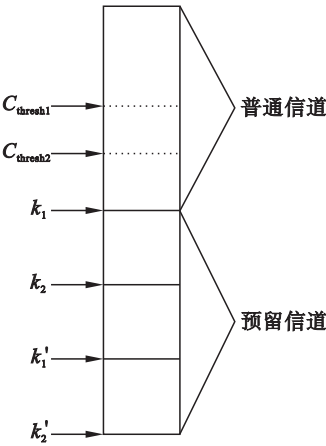


图 2 信道预留模型

Fig. 2 Channel reservation model

所有呼叫的持续时间均服从参数为 ω 的指数分布, $\mu = 1/(P_n \cdot E(T_n) + P_h \cdot E(T_h))$, 表示平均呼叫离开率, 式中 P_n 和 P_h 为新呼叫和切换呼叫的概率, $P_n = \lambda_n/(\lambda_n + \lambda_h)$, $P_h = \lambda_h/(\lambda_n + \lambda_h)$, $E(T_n)$ 和 $E(T_h)$ 分别为波束中新呼叫和切换呼叫占用时间的期望值, $E(T_n) = T_{\text{max}}/2$, T_{max} 是用户可在小区中停留的最大时间, $E(T_h) = 1/\omega$.

根据信道预留模型和以上假设,建立信道分配的 Markov 过程,占用信道的状态转移图如图 3 所示.

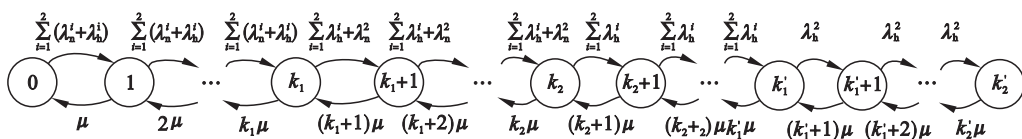


图3 Markov 状态转移图
Fig. 3 Markov state transition graph

设 j 为系统状态值, 在 0 到总信道数 C 之间, 平衡状态方程如下:
 π_j 为平稳转移概率, 根据以上状态转移图可得平

$$\left. \begin{aligned} & \left(\sum_{i=1}^2 (\lambda_n^i + \lambda_h^i) \right) \pi_0 = \mu \pi_1, \quad j = 0; \\ & \left(\sum_{i=1}^2 (\lambda_n^i + \lambda_h^i) + j\mu \right) \pi_j = \left(\sum_{i=1}^2 (\lambda_n^i + \lambda_h^i) \right) \pi_{j-1} + (j+1)\mu \pi_{j+1}, \quad 1 \leq j < k_1; \\ & \left(\sum_{i=1}^2 \lambda_h^i + \lambda_n^2 + k_1\mu \right) \pi_{k_1} = \left(\sum_{i=1}^2 (\lambda_n^i + \lambda_h^i) \right) \pi_{k_1-1} + (k_1+1)\mu \pi_{k_1+1}, \quad j = k_1; \\ & \left(\sum_{i=1}^2 \lambda_h^i + \lambda_n^2 + j\mu \right) \pi_j = \left(\sum_{i=1}^2 \lambda_h^i + \lambda_n^2 \right) \pi_{j-1} + (j+1)\mu \pi_{j+1}, \quad k_1 < j < k_2; \\ & \left(\sum_{i=1}^2 \lambda_h^i + k_2\mu \right) \pi_{k_2} = \left(\sum_{i=1}^2 \lambda_h^i + \lambda_n^2 \right) \pi_{k_2-1} + (k_2+1)\mu \pi_{k_2+1}, \quad j = k_2; \\ & \left(\sum_{i=1}^2 \lambda_h^i + j\mu \right) \pi_j = \left(\sum_{i=1}^2 \lambda_h^i \right) \pi_{j-1} + (j+1)\mu \pi_{j+1}, \quad k_2 < j < k_3; \\ & (\lambda_h^2 + k_3\mu) \pi_{k_3} = \left(\sum_{i=1}^2 \lambda_h^i \right) \pi_{j-1} + (k_3+1)\mu \pi_{k_3+1}, \quad j = k_3; \\ & (\lambda_h^2 + j\mu) \pi_j = \lambda_h^2 \pi_{j-1} + (j+1)\mu \pi_{j+1}, \quad k_3 < j < k_4; \\ & k_4 \mu \pi_{k_4} = \lambda_h^2 \pi_{k_4-1}, \quad j = k_4. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

经过以上分析,第 i 类业务的新呼叫阻塞率为系统状态不小于 k_i 的概率之和,即

$$P_n^i = \sum_{j=k_i}^C \pi_j, i = 1, 2. \tag{4}$$

第 i 类业务的切换呼叫阻塞率为系统状态不小于 k'_i 的概率之和,即

$$P_h^i = \sum_{j=k'_i}^C \pi_j, i = 1, 2. \tag{5}$$

为衡量系统服务质量的好坏,考虑到第二类业务和切换业务的高优先级,本文定义服务等级 (grade of service, GoS) 为

$$\text{GoS} = \sum_{i=1}^2 \alpha^i (\beta P_n^i + \gamma P_h^i). \tag{6}$$

其中: α^i 表示第 i 类业务的影响因子; β 表示新呼叫的影响因子; γ 表示切换呼叫的影响因子. GoS 是信道预留门限 k_i 的函数,其值越小,服务质量越高.

由于卫星上处理能力有限,无法负担计算量过大的方法实时计算信道预留阈值,本文基于收敛速度更快、结果更精确的差分进化 (differential evolution, DE) 算法求解动态信道预留的阈值 k ,使服务质量尽可能高. 算法流程见图 4.

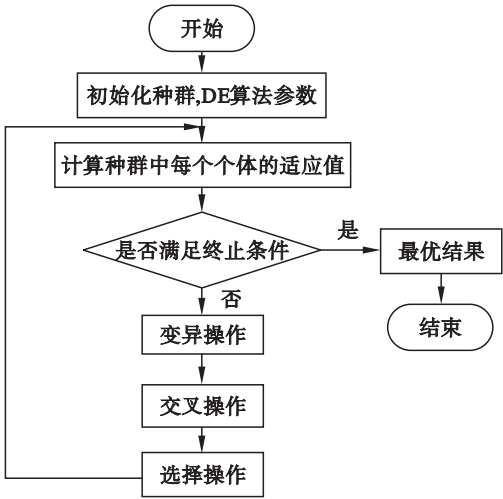


图 4 差分进化算法流程图

Fig. 4 Flowchart of differential evolution algorithm

1.2 非预留信道分配

在业务不多的波束小区中,大部分信道处于空闲状态,资源利用率较低,于是针对非预留信道,提出新的信道分配方案,避免资源浪费,提升用户体验,改善系统的整体服务质量.

终端根据业务类型和优先级的不同请求不同的信道数目,每个业务的信道请求都包含标准带宽与理想带宽. 卫星周期性检测各个波束小区的

非预留信道占用数量 C_r , 当占用数量小于阈值 C_{thresh1} , 即 $C_r < C_{\text{thresh1}}$ 时,控制中心满足业务的理想带宽需求,若随用户数量增加, $C_r > C_{\text{thresh2}}$, 则仅满足低优先级用户的标准带宽需求,保持信道占用数量不高于阈值 C_{thresh1} , 如果仍高于阈值,则高优先级用户释放信道,直到高优先级用户仅剩下标准带宽或信道占用数量低于阈值 C_{thresh1} ; 若 $C_r > C_{\text{thresh1}}$, 则控制中心满足业务的标准带宽需求,如果用户数量减少到 $C_r < C_{\text{thresh1}}$, 按用户优先级顺序满足理想带宽.

其中,为防止产生乒乓效应,在特定情景下,用户不断竞争与释放信道,造成较多的信令交互,信道释放阈值 C_{thresh2} 需要大于 C_{thresh1} .

1.3 增强型排队策略

若小区中负载超出限制,信道全部被占用,此时,新呼叫与其他小区切换过来的呼叫均无法接入,而与新呼叫无法接入相比,切换呼叫发生掉话的用户体验更差,因此在这种情况下需要一种新的方案进一步提升用户体验. 因为卫星通信系统两个波束小区存在重叠覆盖区,以往的切换排队 (handover queue, HQ) 策略通常是使其他小区即将切换过来的呼叫在进入重叠区时加入切换队列进行排队,当目标小区有空闲信道时优先接入.

HQ 策略在小区负载超出限制后使得切换呼叫相比新呼叫优先接入,在一定程度上提升了用户体验. 但是没有考虑不同业务类型的特点以及高优先级用户的接入紧急性,系统整体的服务质量有待进一步提升,因此,提出增强型排队策略 (enhanced queue, EQ). 与 HQ 策略不同, EQ 策略分为两个队列,分别是切换和新呼叫队列. 当出现空闲信道后,切换队列中的业务可优先接入信道,直到切换队列为空,开始接入新呼叫队列中的业务. 此外,为保证高优先级用户和业务的服务质量,同时兼顾用户使用信道资源的公平性,最大程度保障用户体验,提出采用多属性联合决策的方式对队列中的业务进行排序,并实时更新,当有空闲信道时,按顺序依次接入信道. 定义测度函数如下:

$$W = a \times \frac{U}{U_{\text{max}}} + b \times \frac{B}{B_{\text{max}}} + c \times \frac{T}{T_{\text{max}}} + d \times \left(1 - \frac{R}{R_{\text{max}}}\right). \tag{7}$$

其中: $a + b + c + d = 1$; U 代表用户本身的优先级; U_{max} 代表所有用户的最高级别; B 代表业务优先级; B_{max} 代表对实时性要求最高的业务; T 代表用户在队列内等待的时间; T_{max} 代表不同特征的业务等待阈值的最大值; R 代表剩余等待时间,例如

切换呼叫,在一定的时间后,用户会离开当前小区和目标小区的覆盖区,产生掉话,剩余等待时间即为强迫掉话前的时间; R_{\max} 代表剩余时间最大值.队列中按照 R 从大到小的顺序排列.

2 仿真验证

本文利用 C++ 语言搭建仿真系统,对整体方案进行了仿真,并与基于时间的信道预留算法 (time-based channel reservation algorithm, TCRA) 和固定信道预留 (fixed channel reservation, FCR) 策略相比较.实验中涉及的参数如下.

卫星通信系统采用 FDMA/TDMA 的混合多址方式,每个波束小区中信道总数为 80,FCR 策略预留的信道数始终为 10,仅供切换业务使用.各类业务呼叫到达率均服从泊松分布,不同业务到达比例相同,呼叫时间服从负指数分布,平均呼叫时间设置为 180 s.

一类业务的影响因子 α^1 和业务优先级 B 设置为 1,二类业务的影响因子 α^2 和业务优先级设置为 2,新呼叫业务的影响因子 β 取值为 1,切换业务的影响因子为新呼叫业务影响因子的 10 倍,用户优先级 U 统一设置为 1,业务等待阈值的最大值设置为 2 s.差分进化算法中的种群规模大小为 200,最大进化代数为 1 000,交叉概率为 0.3,缩放因子为 0.5.

图 5 为不同算法下系统中呼叫的切换掉话率,在呼叫到达率较低时,系统负担较小,各小区中的信道充足,由于切换产生的掉话率接近于零.随着呼叫到达率的增加,FCR 策略由于在每个波束小区内预留了一定比例的信道资源,能很好地保证业务的切换成功率.但是当业务量继续增大时,发生切换的业务也随之增多,预留的信道资源无法满足所有的切换请求,越来越多的切换发生掉话,此时,系统性能严重恶化,切换掉话率也急剧升高. TCRA 能根据切换业务的多少调整信道预留数目,切换掉话率低于 FCR 策略.

在本文算法中,采用基于业务的自适应信道预留策略,当系统的业务量较小时,能很好地将切换呼叫的掉话率维持在较低水平,业务量增多后,相比新呼叫阻塞,切换呼叫掉话更让人难以接受. CABS 策略会提高信道的预留数量以接入更多的切换业务保障系统性能,同时当信道资源紧张时, EQ 策略会使切换业务暂时加入排队序列中,当小区中有业务结束通信释放信道,会优先接入排队中的业务以进一步降低切换掉话的可能性,切

换掉话率低于其余两种方案.

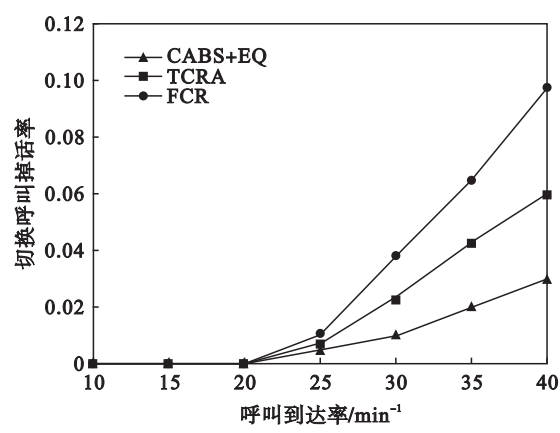


图 5 呼叫切换掉话率
Fig. 5 Rate of a call drop

在卫星的信道分配中,对切换呼叫的保护往往会造成较高的新呼叫阻塞率(图 6). FCR 策略由于始终在小区中预留固定数量的信道供切换业务使用,对切换掉话率的保障使得新呼叫阻塞率处于较高水平. TCRA 预测终端在当前小区中的滞留时间,在即将发起切换时开始信道预留,因此,在切换业务较少时,预留的信道数目较少,新呼叫阻塞率低于 FCR 策略,随着切换业务的增多,TCRA 预留的信道数目也会增加,导致新呼叫可用信道数较少,新呼叫阻塞率高于 FCR 策略.

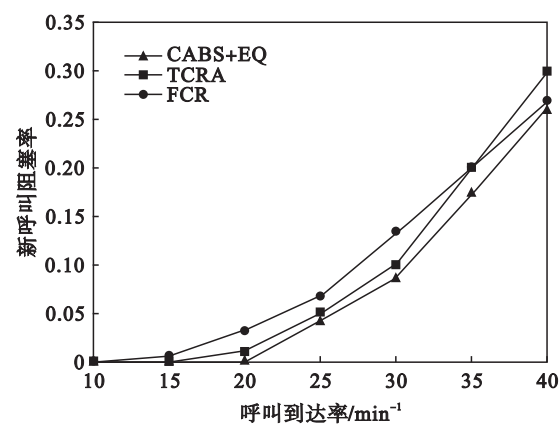


图 6 新呼叫阻塞率
Fig. 6 Blocking rate of a new call

CABS 策略会依据切换业务的多少动态调整信道预留门限,呼叫到达率较低时,新呼叫阻塞率低于 FCR 策略,此外, EQ 策略当信道资源紧张无法接入时,除切换业务外,新呼叫同样加入到排队序列中,按优先级顺序等待信道释放,可进一步降低呼叫阻塞率,所以在呼叫到达率不是很高时,新呼叫阻塞率略低于 TCRA,取得了较好的效果.当呼叫到达率较高时, CABS 策略将随着切换业务到达率的升高预留更多的信道满足切换请求,因

此,新呼叫阻塞率逼近 FCR 算法,但得益于 EQ 策略的有效性,仍略低于 TCRA,体现了 EQ 策略的必要性.

图 7 为系统中二类业务的切换阻塞率和新呼叫掉话率在不同算法下的仿真结果.可以看出,CABS 与 EQ 结合的信道分配算法的二类业务呼叫失败率明显低于 FCR 和 TCRA.

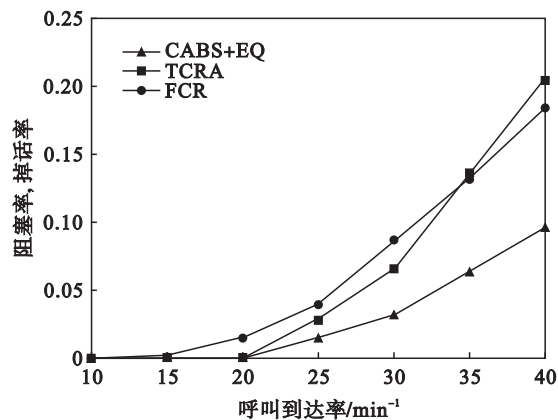


图 7 二类业务呼叫失败率

Fig. 7 Failure rate of the second class of services

FCR 策略和 TCRA 中只考虑了切换呼叫对于新呼叫的高优先级,通过信道预留为切换呼叫提供更好的用户体验,均没有考虑业务类型的优先级,因此二类业务呼叫失败率几乎持平,高于本文的信道分配算法.

CABS 与 EQ 结合的信道分配算法根据呼叫类型与业务类型设置了多级信道预留门限,不仅为切换呼叫提供了保障,也考虑到二类业务相对于一类业务的高优先级,为其设置部分预留信道,因此二类业务的呼叫失败率相对较低.

CABS 策略和 EQ 策略结合的信道分配算法,综合考虑用户优先级和业务类型的优先级,并充分考虑用户体验和系统整体服务质量,在同等压力下,GoS 值相对处于较低水平,提供了较好的服务质量.

3 结 语

结合卫星通信的发展趋势,针对目前卫星通信系统业务发展现状,提出高业务量下的自适应信道预留策略、低业务量下的非预留信道分配策

略和全部信道都被占用后的增强型排队策略.信道分配整体方案充分保障了高优先级用户的及时接入,同时兼顾了信道资源利用公平性,明显提升了低业务量时的信道资源利用率,系统性能得到显著增强.

参考文献:

[1] 汪宏武,张更新,余金培,等.低轨卫星星座通信系统的分析与发展建议[J].卫星应用,2015(7):38-44.
(Wang Hong-wu,Zhang Geng-xin,Yu Jin-pei,et al. Analysis and development suggestion of LEO satellite constellation communication system[J]. Satellite Application,2015(7):38-44.)

[2] Feng X,Tan Q,Liang Z C. The development of satellite mobile communication system[C]//The 6th International ICST Conference on Communications and Networking in China. Harbin,2011:1110-1114.

[3] Wang H Y,Gu X M. An adaptive bandwidth resource management scheme for multimedia LEO satellite networks[C]//2010 Global Mobile Congress. Shanghai,2010:1-6.

[4] Zheng L,Wang Y. A new channel assignment strategy for low earth orbit mobile satellite systems[C]//Advances in Satellite and Space Communications. Athens,2010:47-51.

[5] Na Z Y,Deng Z A,Chen N,et al. An active distributed QoS routing for LEO satellite communication network[C]//The 10th International Conference on Communications and Networking in China. Shanghai,2015:538-543.

[6] Guo L Z,Cui Q M,Liu Y J,et al. Graph theory based channel reallocation technique in channel borrowing in mobile satellite communication[C]//2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Shanghai,2013:2172-2177.

[7] Papapetrou E,Pavlidou F N. Analytic study of Doppler-based handover management in LEO satellite systems[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems,2005,41(3):830-839.

[8] Wang X L,Wang X X. The research of channel reservation strategy in LEO satellite network[C]//IEEE 11th International Conference on Dependable, Autonomic and Secure Computing. Chengdu,2013:590-594.

[9] Chatterjee S,Saha J,Banerjee S,et al. Neighbour location based channel reservation scheme for LEO satellite communication[C]//2012 International Conference on Communications,Devices and Intelligent Systems(CODIS). Kolkata,2012:73-76.

[10] Zhou J,Ye X,Pan Y,et al. Dynamic channel reservation scheme based on priorities in LEO satellite systems[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics,2015,26(1):1-9.

[11] Boukhatem L,Beylot A L,Gaiti D,et al. TCRA: a time-based channel reservation scheme for handover requests in LEO satellite systems[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking,2003,21(3):227-240.