基于动态预留的天基信息港接入策略研究

宋唐益嘉[1]，胡鹤飞[1]，秦　兴[2]，辛　宁[3]

（1. 北京邮电大学信息与通信工程学院，北京　100876；
2. 北京邮电大学电子工程学院，北京　100876；
3. 中国空间技术研究院通信与导航卫星总体部，北京　100094）

摘要：针对高动态终端需要频繁接入切换的问题，本文基于现有的信道预留策略结合接入切换控制策略，提出了一种改进的动态预留接入策略。该策略对高动态终端进行切换预测，建立卫星效用函数，选择使得效用函数最大的覆盖卫星作为目标卫星，天基信息港通过信令通知目标卫星进行动态信道预留。仿真结果表明，本文提出的接入策略在高动态终端场景下切换成功率达到98%以上，切换时延减低了约30%. 仿真结果验证了所提策略的可行性，其具备提高高动态终端的切换成功率的能力。

关键词：通信技术；天基信息港；高动态终端；接入策略；信道预留

中图分类号：TN927　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1674-2850(2020)04-0482-09

Research on access strategy of space-based information port based on dynamic reservation

SONG Tangyijia[1], HU Hefei[1], QIN Xing[2], XIN Ning[3]

(1. *School of Information and Communication Engineering*, *Beijing University of Posts and Telecommunications*, *Beijing*　100876, *China*;
2. *School of Electronic Engineering*, *Beijing University of Posts and Telecommunications*, *Beijing*　100876, *China*;
3. *Communications and Navigation Satellite General Department*, *China Academy of Space Technology*, *Beijing*　100094, *China*)

Abstract: To solve the problem of the high dynamic terminal requiring frequent access handoff, an improved dynamic reservation access strategy based on the existing channel reservation strategy combined with access handoff control strategy is proposed. In this strategy, switching prediction is made for the high dynamic terminal, satellite utility function is established, the coverage satellite with maximum utility function is selected as the target satellite, and the space-based information port notifies the target satellite through signaling for dynamic channel reservation. The simulation results show that the switching success rate of the access strategy proposed in this paper is over 98% and the switching delay is reduced by about 30% in the high dynamic terminal scenario, which indicates that the proposed strategy is feasible and has the ability to improve the switching success rate of the high dynamic terminals.

Key words: communication technology; space-based information port; high dynamic terminal; access strategy; channel reservation

0　引言

现有的天基信息系统存在着在轨信息转发与处理能力较弱的缺点，已无法满足日益增长与发展的天

作者简介：宋唐益嘉（1998—），女，硕士研究生，主要研究方向：卫星通信中网络功能虚拟化

通信联系人：胡鹤飞，副教授，主要研究方向：卫星网络、网络功能虚拟化及其他新型网络. E-mail: huhefei@bupt.edu.cn

基信息业务，因此天基信息港的概念应运而生。物理层面上，天基信息港是由五颗同步地球轨道（geosynchronous orbit，GEO）卫星通过倾角隔离与偏心率隔离的方法组合在一起，形成的一个“虚拟大卫星”；逻辑层面上，天基信息港是通过“池化”技术将五颗 GEO 卫星的计算、存储能力统一起来而形成的一个信息处理与转发的“计算平台”。天基信息港系统主要由天基信息港、低轨道（low earth orbit，LEO）星座以及相关地面配套设施组成，并通过高速激光链路实现卫星间及星地之间的连接，有着较强的在轨信息处理与服务能力，可以取代当前的地面指挥设施进行信息决策，并利用高速激光链路传递数据信息，优化数据信息传递链路，减少传播时延。高动态终端在执行任务时，利用高速激光链路接入天基信息港系统中实现信息装订，降低了高动态终端与指挥系统之间信息传输的难度。

由于高动态终端的高动态性与其执行的业务有着高突发性和高优先级的特点，当高动态终端与天基信息港系统通信时，不仅需要面对用户终端首次接入问题，也会遇到相关切换问题。切换问题可看作是接入问题的一种特殊情况。相比于低动态终端，高动态终端的速率高，当高动态终端与天基信息港系统通信时，会遇到更频繁的接入与切换问题。高动态终端执行的任务有着优先级高、数据完整性要求强的特点，切换的阻塞容易造成传输数据包的丢失，因此需要设计合适的接入策略，提升高动态终端切换的成功率。

1 相关工作

1.1 信道预留策略研究现状

在卫星通信系统中，为用户终端的接入与切换业务预留相应的通信信道可以优化接入和切换的成功率。常见的卫星信道预留策略可以划分为固定信道预留和动态信道预留两类。但是固定信道预留策略无法满足用户业务突发性强、场景不断变化的需求，无法适用于卫星网络[1]，因此更多情况下还是使用动态信道预留策略。

目前针对信道预留有多方面的策略研究，例如通过导航卫星获取相应的覆盖区域信息，动态计算所在区域用户终端数据包的到达率，以优化用户终端接入与切换的成功率为目标，从而动态确定预留的信道数[2~4]；通过对终端进行甄别与区分，优化确定预留的信道数[5~7]；根据接入卫星的运动轨迹可预测的概念，当预测有切换需求时，目标卫星才会进行信道预留，利用卫星运动轨迹预测用户终端的切换[8~9]。文献[10]提出了一种基于优先级的动态信道预留策略，通过动态计算信道预留阈值集合优化系统整体的服务质量，但是该策略未考虑用户接入终端的优先级，且将呼叫类型优先级设置过低，无法保证高动态终端接入切换服务质量的要求。

1.2 卫星接入切换控制策略

研究人员针对接入切换控制策略，从不同角度进行了大量的研究和优化。文献[11]根据不同信号强度的概念进行优化和切换选择。文献[12]～[14]引入接入系统的代价函数和效用函数对待接入系统中的信道进行排序，用户终端将选择最优的可用信道作为目标接入信道。文献[15]～[16]利用加权分析、关联分析等方法将以上三种基本准则融合成一种多准则控制方案。文献[17]借鉴软件定义网络概念，将卫星节点、终端节点、终端与卫星之间连接信道分别建立集合，利用二分图表示三者的关系，建立接入效用函数。当有接入或切换时，选择可以使效用函数最大的可用信道进行切换接入。该策略认为接入和切换是多个用户终端去随机抢占卫星通信信道资源的过程，可以看作是一个潜在博弈的过程；并根据效用函数推导了系统存在纳什均衡点，证明了系统可以达到整体的最优解。

综上所述，动态信道预留策略可以满足系统内业务动态变化与业务突发性强的特性，且能够很好提升系统整体的信道利用率，在系统整体服务质量方面有优势。接入切换控制策略与通信链路质量、接入切换的平均次数和卫星系统负载均衡密切相关。用户终端在通信过程中会被天基信息港系统的多星所覆盖，本文以动态预留策略作为研究基础，结合接入切换控制策略，提出改进动态预留接入策略，以解决高动态终端的高动态性带来的频繁接入切换问题。

2 系统模型

2.1 卫星运动模型

LEO 卫星覆盖地球区域可分为地球固定小区（earth fixed cell，EFC）系统和卫星固定小区（satellite fixed cell，SFC）系统两类。EFC 系统是利用天线技术确保一段时间内覆盖地球的区域相对静止不变。SFC 系统是卫星对地球的覆盖区域，相对于卫星静止不变，会随着卫星的运动而变化。常见的 LEO 星座，例如铱星系统、全球星系统，均是采用 SFC 系统。本文天基信息港系统中的 LEO 星座参考是铱星系统，因此采用 SFC 系统建立运动模型，同时考虑 LEO 卫星运动和高动态终端的运动。

天基信息港系统中卫星网络拓扑是 LEO 卫星与 GEO 卫星组成的双层架构，同步地球轨道上的天基信息港相对于地面静止不动。其中 LEO 卫星采用 SFC 系统，卫星轨道高度 h=780 km，运行周期 T=100 min，卫星倾角采用极圆轨道模型，卫星运行角速率 $\omega=\pi/3\ 000$ rad/s，运动轨迹如图 1 所示。可根据式（1）计算卫星运动速率：

$$v_{\mathrm{sat}}=(R+h)\times\omega, \tag{1}$$

其中，R 为地球半径。

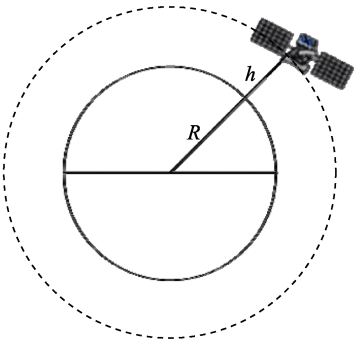


图 1 LEO 卫星运动轨迹

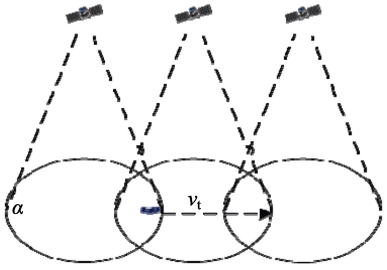
Fig. 1 Trajectory of LEO satellite

LEO 卫星覆盖地球的表面近似于平面，如图 2 所示。可利用式（2）计算用户终端与覆盖卫星的距离，利用式（3）计算卫星覆盖区域的大小：

$$d_{\mathrm{dis}}=h/\sin\varphi, \tag{2}$$

$$R_{\mathrm{plane}}=h/\tan\varphi, \tag{3}$$

其中，φ 为用户终端所见卫星的最小仰角。



注：v_t 为高动态终端的速率

图 2 LEO 卫星覆盖模型

Fig. 2 Coverage model of LEO satellite

2.2 用户终端运动模型

本文研究重点在于高动态终端接入与切换性能指标，为简化终端运动与业务模型和系统计算量，重点优化高动态终端的接入与切换性能指标，将用户终端业务模型分为高动态终端切换业务、高动态终端接入业务和低动态终端接入切换业务，只为高动态终端的接入切换预留信道资源，其余低动态终端的接入切换去竞争剩余的共享信道资源。

对于低动态终端来说，相对于卫星对地速率，其速率均可忽略，只需考虑卫星运动速率即可。高动态终端一般指临近空间飞行器，速率在 5～16 马赫之间，相对于 LEO 卫星对地速率不可忽略。因此本文采用一维用户终端运动模型，如图 3 所示。结合运动模型，可由式（4）计算卫星与用户终端的合成速率：

$$v_{\mathrm{total}}=v_{\mathrm{sat}}+v_{\mathrm{t}}. \tag{4}$$

本文所提的改进动态预留接入策略可以动态调整信道预留阈值参数，并且天基信息港系统可以通过配套的导航卫星获取高动态终端的位置进行切换预测，因此可以很好地补偿高动态终端的高动态性，确保在简化模型的基础上可以取得较好的服务质量。

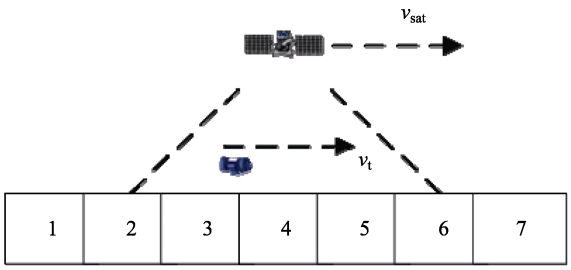


图 3 卫星-用户终端运动模型

Fig. 3 Satellite-user terminal motion model

3 动态预留接入策略研究

3.1 整体流程

改进的动态预留接入策略流程如图 4 所示，当高动态终端接入天基信息港系统并传输第一个数据包时，天基信息港通过导航卫星获取高动态终端和接入 LEO 卫星的经纬度等位置信息，计算终端在 LEO 卫星中的剩余生存时间，将剩余生存时间与高动态终端的服务时间进行比较，判断是否有切换需求。当判断高动态终端有切换需求时，天基信息港系统建立卫星效用函数，选择使得效用函数最大的覆盖卫星作为目标卫星，并利用信令通知相应的目标卫星进行信道的动态预留。

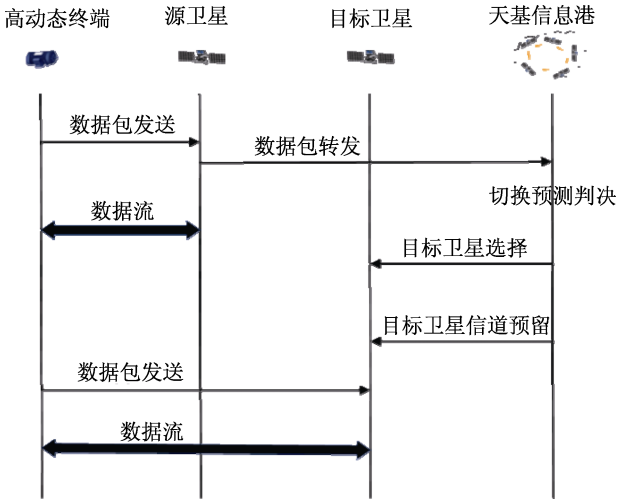


图 4 改进的动态预留接入策略流程图

Fig. 4 Flowchart of improved dynamic reservation access strategy

3.2 卫星切换预测

用户终端的服务时间服从参数为 τ 的负指数分布，由于高动态终端执行任务的特殊性，其服务时间可以被天基信息港系统获取到。因此，本文在文献[18]的基础上，结合高动态终端的运动模型，计算覆盖高动态终端卫星的剩余生存时间，并将高动态终端的服务时间与卫星的剩余生存时间对比，进行切换预测，如式（5）所示。

$$f(x,y)=\mathrm{sgn}(x-y), \tag{5}$$

其中，x 为高动态终端的服务时间；y 为卫星剩余生存时间。当 $f(x,y)$ 的值为−1 时，表示高动态终端不会发生切换；当 $f(x,y)$ 的值为 1 时，表示高动态终端会发生切换。即当服务时间小于卫星剩余生存时间时，天基信息港系统判断高动态终端不会发生切换；当服务时间大于卫星剩余生存时间时，天基信息港系统判断高动态终端会发生切换。

3.3 接入切换控制策略

建立的卫星效用函数 u_i 为

$$u_i(S)=g_i(S)-l_i(S), \tag{6}$$

$$g_i(S)=\alpha t_{ij}+\beta\theta_{ij}, \tag{7}$$

$$l_i(S)=w_{\mathrm{req}}t_{\mathrm{req},ij}+w_{\mathrm{res}}t_{\mathrm{res},ij}, \tag{8}$$

其中，$g_i(S)$ 为增益函数；$l_i(S)$ 为损失函数；α 和 β 为常量参数，且 $\alpha+\beta=1$；t_{ij} 为 LEO 卫星 j 对用户

终端 i 的可见时间；θ_{ij} 为用户终端 i 对于 LEO 卫星 j 的仰角；常量参数 $w_{\text{req}}+w_{\text{res}}=1$；$t_{\text{req},ij}$ 为用户终端 i 与 LEO 卫星 j 接入切换的请求时间；$t_{\text{res},ij}$ 为用户终端 i 与 LEO 卫星 j 接入切换的响应时间。

本文将计算与存储放在天基信息港中，数据平面由 LEO 卫星与用户终端构成，控制平面由天基信息港系统与地面配套设施构成。控制器将相关接入切换信令发送到 LEO 卫星。LEO 卫星之间通过高速无线链路相互通信。基于此，构建天基信息港系统接入与切换二分图框架。

在天基信息港系统中，将其中的 LEO 卫星节点建模为集合 X，用户终端建模为集合 Y，LEO 卫星与用户终端连接的信道建模为集合 E，接入的系统模型可以被建模为 $G=<X,E,Y>$，如图 5 所示。当发生切换时，LEO 卫星与终端连接的信道链路集合会发生改变，因此 $G=<X,E,Y>$ 会变成 $G=<X,E',Y>$. 当有终端接入到天基信息港系统时，用户终端集合和 LEO 卫星与用户终端连接的信道链路集合会发生改变，因此 $G=<X,E,Y>$ 会变成 $G=<X,E',Y'>$.

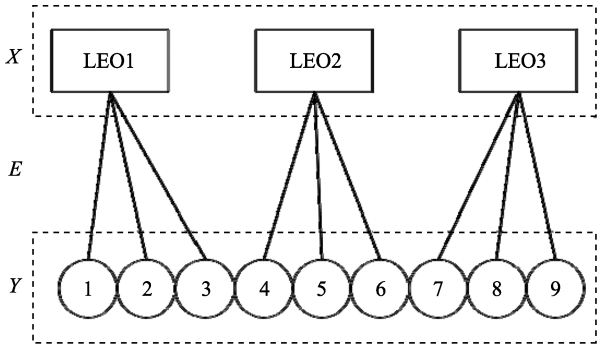


图 5 LEO 卫星-用户终端二分集合示意图

Fig. 5 Binary set schematic diagram of LEO satellite-user terminal

3.4 信道预留策略

本文设计的信道预留的流程如图 6 所示，具体步骤为：

1）当一个用户终端的呼叫到达后，判断终端类型是否为高动态终端类型；

2）判断用户终端的呼叫类型是新接入还是切换；

3）比较 LEO 卫星实时信道占用数和相应的阈值参数，若卫星实时信道占用数小于阈值参数，则进行接入，反之，则进行阻塞。

对于整个预留过程来说，假设接入的到达率服从参数为 λ 的泊松分布，对于不同的用户终端类型，接入到达率为 $\lambda^i=p\lambda$，其中 $\sum p=1$.

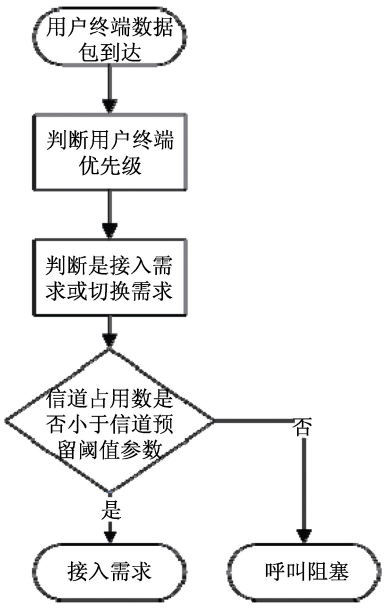
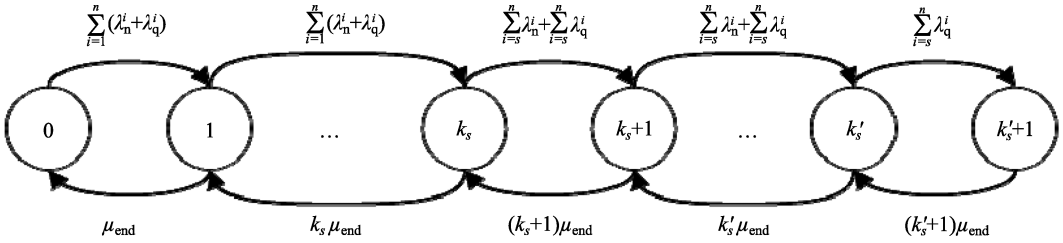


图 6 改进的信道预留流程图

Fig. 6 Flowchart of improved channel reservation

将信道建模为 $M/M/C/C$ 型的马尔科夫过程，马尔科夫状态链的转移过程如图 7 所示，当前 LEO 卫星被占用的信道总数定义为马尔科夫状态空间。用户终端接入到达率参数表示为 $\lambda_{\text{n}}=\left\{\lambda_{\text{n}}^{\text{ord}},\lambda_{\text{n}}^{\text{s}}\right\}$，其中 $\lambda_{\text{n}}^{\text{ord}}$ 为低动态终端接入到达率，$\lambda_{\text{n}}^{\text{s}}$ 为高动态终端接入到达率；切换到达率参数表示为 $\lambda_{\text{q}}=\left\{\lambda_{\text{q}}^{\text{ord}},\lambda_{\text{q}}^{\text{s}}\right\}$，其中 $\lambda_{\text{q}}^{\text{ord}}$ 为低动态终端切换到达率，$\lambda_{\text{q}}^{\text{s}}$ 为高动态终端切换到达率；卫星信道预留阈值参数的集合为 $K=\left\{k_s,k_s'\right\}$.

文中所提的信道预留主要是考虑高动态终端接入切换的成功率，当用户终端接入或切换业务到达时，若当前卫星信道被占用数小于系统预设的预留阈值参数，用户终端的接入或切换业务可以成功被接收，反之，用户终端的接入或切换业务会被阻塞。本文在文献[10]中基于优先级的动态信道预留策略的基础



注：μ_{end} 为服务离去率

图 7 马尔科夫状态转移图

Fig. 7 Markov state transition diagram

上加入终端优先级因素的考虑，建立系统服务质量（quality of service，QoS）公式：

$$\mathrm{QoS}=\sum_{i=0}^{n}\beta_i\left[\alpha_0\left(1-p_{\mathrm{block}}^{\mathrm{access}}\right)+\alpha_1\left(1-p_{\mathrm{block}}^{\mathrm{switching}}\right)\right], \tag{9}$$

其中，$\beta_i=\{\beta_0,\beta_1\}$，$\beta_0$ 为低动态终端的权重，β_1 为高动态终端的权重；α_0 为接入的权重，α_1 为切换的权重；$p_{\mathrm{block}}^{\mathrm{access}}$ 和 $p_{\mathrm{block}}^{\mathrm{switching}}$ 分别为接入阻塞与切换阻塞的概率。

由于 π_i 表示模型平稳后系统中的接入用户数为 i 的概率分布，所以用户终端接入与切换阻塞的概率为各状态 i 的概率分布之和，则式（9）可以写为

$$\mathrm{QoS}=\sum_{i=0}^{n}\beta_i\left[\alpha_0\left(1-\sum_{i=k_s}^{n}\pi_i\right)+\alpha_1\left(1-\sum_{i=k_s'}^{n}\pi_i\right)\right]. \tag{10}$$

因此得出系统服务质量是马尔科夫信道稳态概率的函数。而根据马尔科夫稳态概率方程可得，稳态概率与信道预留阈值集合、用户终端接入与切换的到达率和服务离去率有关。在仿真中，用户终端接入切换到达率、服务离去率是已确定好的参数，因此服务质量只与信道预留阈值 K 相关，可将式（10）简化为式（11）的形式。为使系统整体取得最优解，需要求得使得方程最大的信道预留阈值集合。本文采用遗传算法优化器来求解使得方程最优的预留阈值集合。

$$\mathrm{QoS}=f(K). \tag{11}$$

4 实验结果与分析

4.1 仿真场景与参数

通过 STK 软件搭建用户终端与天基信息港系统通信的场景，并用 matlab 实现改进的动态预留接入策略，在该场景下仿真对比所提的改进动态预留接入策略性能。利用双层天基信息港系统接入模型，用户终端通过 LEO 卫星接入天基信息港系统。在本次的仿真场景中，将用户终端分为高动态终端与低动态终端两类；高动态终端的速率服从 5～16 马赫的均匀分布；将呼叫类型分为接入与切换两种；用户终端平均服务时间服从参数为 τ 的负指数分布；LEO 星座拓扑参考铱星系统，LEO 卫星高度为 780 km，对地速率为 26 600 km/h，信道数目固定为 100，覆盖用户终端的 LEO 卫星数目为 2 颗。仿真参数如表 1 所示。

4.2 结果分析

4.2.1 关于切换时延仿真对比分析

切换时延是高动态终端与 LEO 卫星的通信链路下降到门限值以下至高动态终端接入目标卫星重新进行通信的这一段时间。在切换时延里，由于用户终端与卫星之间的仰角过小，两者之间的通信链路质量会急速下降，因此切换时延的时间越短越好。

表 1 仿真参数表

Tab. 1 Simulation parameter table

仿真参数	符号	值
高动态终端的速率（马赫数）	v_t	[5～16]
呼叫类型（0 表示接入，1 表示切换）	CallType	0/1
用户终端类型（0 表示低动态终端，1 表示高动态终端）	UserType	0/1
用户终端与天基信息港通信时间分布参数	τ	180
LEO 卫星的高度/km	SatHeight	780
LEO 卫星对地速率/(km/h)	v_{sat}	26 600
LEO 卫星的信道数目	C	100
覆盖用户终端的 LEO 卫星数目	CoverSatNum	2

在采用切换预测策略的条件下，当高动态终端与天基信息港系统通信时，天基信息港会对高动态终端进行切换预测并计算经过选择的目标卫星的位置。在切换前，天基信息港系统通过信令系统通知目标卫星高动态终端的切换信息。在切换时，高动态终端发送的数据包消息会被目标卫星接收到。

采用切换预测策略的切换时延是从源 LEO 卫星将目标卫星信息发送给高动态终端时开始，到高动态终端成功接入卫星收到数据包为止。而未采用切换预测策略的切换时延包含了目标卫星到天基信息港的这一段传播时延，因此时延较长。相对于未采用切换预测策略，采用切换预测策略使高动态终端的切换时延缩短了近 30%（如图 8 所示）.

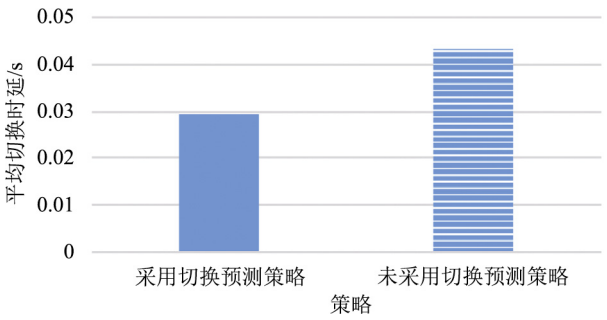


图 8 切换时延对比图

Fig. 8 Comparison diagram of switching delay

4.2.2 关于不同信道预留策略仿真对比分析

统计接入切换成功率时，信道占用率分布在[0,100%]区间上，高动态终端与低动态终端用户数目比例为 1:2. 由于本文主要针对高动态终端的切换问题，所以分别对比所提改进的动态预留接入策略、基于优先级的动态信道预留策略和固定信道预留策略下高动态终端的接入与切换成功率，仿真实验结果及对比如图 9 所示。

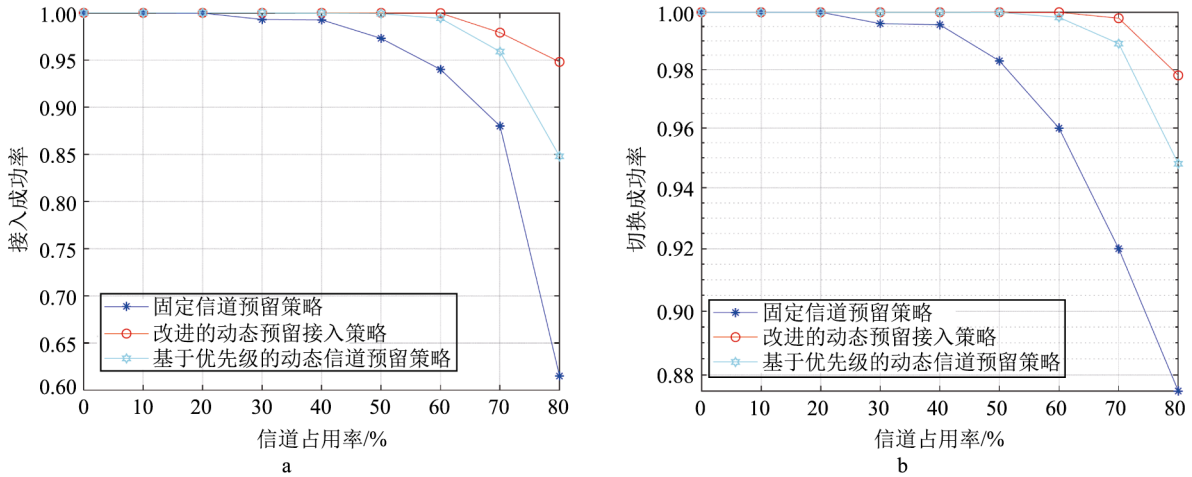


图 9 高动态终端接入（a）与切换（b）成功率仿真曲线

Fig. 9 Simulation curves of high dynamic terminal access (a) and switching (b) success rate

图 9 对比了在固定信道预留策略、基于优先级的动态信道预留策略和改进的动态预留接入策略下高动态终端的接入与切换成功率。在高动态终端接入天基信息港系统实现信息装订的场景下，由于固定信道预留策略无法适应数据包流量的变化，导致采用该策略的高动态终端的切换成功率一直处于最低。而改进的动态预留接入策略与基于优先级的动态信道预留策略相比，着重考虑了高动态终端的终端优先级，且同样根据数据包流量的变化实时调整信道预留阈值，因此该策略可以使高动态终端获得一个最优的切换成功率，提升了整个高动态终端的通信服务质量。

出于对高动态终端快速切换策略研究的角度，本文设置服务质量公式中各类权重参数为：$\{\alpha_0,\alpha_1\}=\{0.1,0.9\}$；$\{\beta_0,\beta_1\}=\{0.1,0.9\}$. 服务质量的仿真对比结果如图 10 所示。由于改进的动态预留接入策略主要考虑高动态终端接入切换成功率指标，且高动态终端接入切换成功率在服务质量公式中所占权重较大，所以所提策略的服务质量始终在固定信道预留策略与基于优先级的动态信道预留策略之上。因此，所提策略为高动态终端接入与切换需求动态分配较多的信道预留阈值，从而获得较高的服务质量。

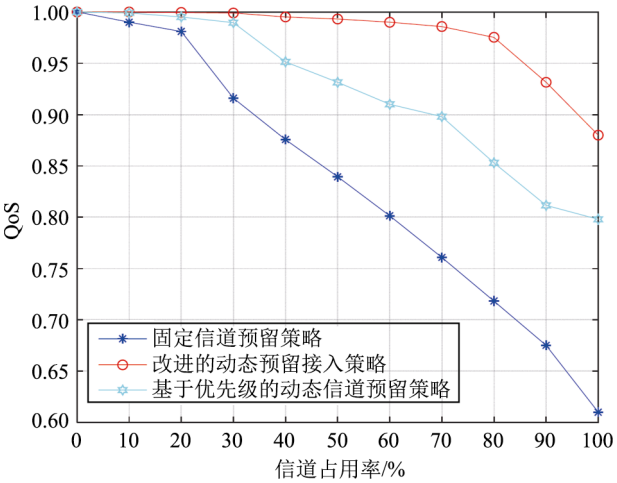


图 10 系统服务质量仿真曲线

Fig. 10 Simulation curves of system QoS

5 结论

本文针对高动态终端与天基信息港系统通信过程中接入与切换的问题，提出了改进的动态预留接入策略。当高动态终端接入后，天基信息港基于位置信息与运动模型对高动态终端进行切换预测。预测高动态终端有切换需求后，建立卫星效用函数，选择使得效用函数最大的覆盖用户终端的卫星作为切换目标卫星，利用信令系统通知目标卫星进行信道动态预留。经过仿真实验可知，在切换成功率方面，改进的动态预留接入策略使得高动态终端的切换成功率基本维持在 98%以上，优于基于优先级的动态信道预留策略和固定信道预留策略。在切换场景下，引入切换预测后，该策略使得高动态终端的切换时延缩小了近 30%.

[参考文献] (References)

[1] KUMAR S, SURESH P V. Performance comparison on fixed channel allocation for with and without borrowing scheme in wireless network[J]. International Journal of Information Technology, 2020, 12(1): 203-208.

[2] CHO S. Adaptive dynamic channel allocation scheme for spotbeam handover in LEO satellite networks[C]//IEEE VTS Fall VTC2000. 52nd. Boston: IEEE, 2000: 1925-1929.

[3] CHO S, AKYILDIZ I F, BENDER M D, et al. A new connection admission control for spotbeam handover in LEO satellite networks[J]. Wireless Networks, 2002, 8(4): 403-415.

[4] CHO S, AKYILDIZ I F, BENDER M D, et al. A new spotbeam handover management technique for LEO satellite networks[C]//IEEE Global Telecommunications Conference. San Francisco: IEEE, 2000: 1156-1160.

[5] BOUKHATEM L, GAITI D, PUJOLLE G. A channel reservation algorithm for handover issues in LEO satellite systems based on a satellite-fixed cell coverage[C]//Vehicular Technology Conference, Spring 2001. Rhodes: IEEE, 2001: 2975-2979.

[6] BEYLOT A L, BOUMERDASSI S. Adaptive channel reservation schemes in multitraffic LEO satellite systems[C]//IEEE

Global Telecommunications Conference. San Antonio: IEEE, 2015: 2740-2743.

[7] OLARIU S, SHIRHATTI R, ZOMAYA A Y. OSCAR-an opportunistic call admission protocol for LEO satellite networks[C]//International Conference on Parallel Processing. Montreal: IEEE, 2004: 548-555.

[8] BOUKHATEM L, BEYLOT A L, GAÏTI D, et al. TCRA: a time-based channel reservation scheme for handover requests in LEO satellite systems[J]. International Journal of Satellite Communications & Networking, 2003, 21(3): 227-240.

[9] BOUKHATEM L, BEYLOT A L, GAÏTI D, et al. TCRA: a resource reservation scheme for handover issue in LEO satellite systems[C]//2003 IEEE Wireless Communications and Networking. New Orleans: IEEE, 2003: 114-119.

[10] ZHOU J, YE X G, PAN Y, et al. Dynamic channel reservation scheme based on priorities in LEO satellite systems[J]. Journal of Systems Engineering & Electronics, 2015, 26(1): 1-9.

[11] WANG H J, KATZ R H, GIESE J. Policy-enabled handoffs across heterogeneous wireless networks[C]//WMCSA'99 Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems & Applications. New Orleans: IEEE, 1999: 51-60.

[12] LEE S, SRIRAM K, KIM K, et al. Vertical handoff decision algorithms for providing optimized performance in heterogeneous wireless networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(2): 865-881.

[13] SHEN W, ZENG Q A. Cost-function-based network selection strategy in integrated wireless and mobile networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(6): 3778-3788.

[14] LIANG L T, WANG H, ZHANG P. Net utility-based network selection scheme in CDMA cellular/WLAN integrated networks[C]//2007 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Kowloon: IEEE, 2007: 3313-3317.

[15] ONEL T, ERSOY C, CAYIRCI E, et al. A multicriteria handoff decision scheme for the next generation tactical communications systems[J]. Computer Networks, 2004, 46(5): 695-708.

[16] ZHANG W H. Handover decision using fuzzy MADM in heterogeneous networks[C]//2004 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Atlanta: IEEE, 2004: 653-658.

[17] WU Y, HU G Y, JIN F L, et al. A satellite handover strategy based on the potential game in LEO satellite networks[J]. IEEE Access, 2019, 7: 133641-133652.

[18] ALI I, AL-DHAHIR N, HERSHEY J E. Predicting the visibility of LEO satellites[J]. IEEE Transactions Aerospace and Electronic systems, 1999, 35(4): 1183-1190.

（责任编辑：张媛媛）