

基于捷变波束的卫星通信网络用户随机接入技术

黄子轩, 周家喜, 张 靖, 张正宇

(天地信息网络研究院, 安徽 合肥 230001)

摘要: 基于高轨多波束卫星通信网络, 设计捷变波束机制下用户终端随机接入网络的流程以及具体的信令交互, 提出捷变信令波束的调度策略及分配方案。该方案在保证所有用户终端都能接入网络的前提下, 提高接入资源分配的灵活性, 有效地提升卫星网络资源的利用率。由于用户接入卫星通信网络的请求属于突发类型, 更适合通过随机竞争的方式接入网络, 因此在通用随机竞争接入策略基础上, 提出一种基于热力值的自适应随机竞争接入算法, 基于网络侧预测的热力值, 用户选择不同的随机接入策略进行接入。通过对该优化算法的仿真分析, 证明该算法可以有效地在各种网络负载下降低接入冲突概率, 达到用户可以快速接入网络的目的。

关键词: 卫星通信系统; 捷变波束; 用户随机接入; 竞争接入; 时隙ALOHA

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2022002

User Random Access Technology Based on Beam Hopping Satellite Communication System

HUANG Zixuan, ZHOU Jiayi, ZHANG Jing, ZHANG Zhengyu

Institute of Space Integrated Ground Network, Hefei 230001, China

Abstract: On the basis of geosynchronous earth orbit multi-beam satellite communication systems, this paper designed the process of user random access to the network and specific signaling interaction under the agile beam mechanism, and proposed the scheduling strategy and allocation scheme of the agile signaling beam. This scheme increased the flexibility of access resource allocation under the premise of ensured that all users could accessed the network, effectively improved the utilization rate of satellite network resources. The request of user access to the satellite communication network belongs to the burst type, it is more suitable to use the random competition access, so this paper based on the general random competition access strategy, proposed an adaptive random competition access algorithm based on the heat value, based on the heat value predicted by the network side, the user selects different random access strategies for access. Through the simulation and analysis of the optimization algorithm, it is proved that the algorithm could effectively reduced the probability of access collision under various network loads, so as to achieved the purpose of users quickly accessing the network.

Keywords: satellite communication system, agile beam, user random access, contention access, slotted ALOHA

0 引言

卫星通信利用卫星作为转发器, 实现区域甚至全球范围覆盖的移动通信, 包括固定式卫星通信和移动卫星通信。由于卫星通信相对地面通信覆盖范围更广泛, 受地面自然条件影响较小, 可以提供更大带宽和更灵活的应用, 因此在一些场景下, 可以作为地面移动通信的补充。

在传统的多波束卫星通信系统中, 每个波束的覆盖范围、分配的频率资源和功率资源固定, 然而用户之

间的业务需求差异较大, 并且时间和空间分布不均匀, 因此基于空间固定分配的卫星波束资源并不能实现真正“公平”的分配, 高业务需求的地区资源可能会严重不足, 低业务需求的地区则造成卫星资源的浪费。由于业务存在一定的时变性, 不同时间段的业务需求是不均匀的, 固定的波束分配很难适应业务需求的变化, 带来资源的浪费。面对日益增多且复杂的通信需求, 传统的波束分配和调度机制很难实现多样化业务灵活高效的传输

和覆盖,在卫星通信网络的设计上需要采用更灵活的捷变波束技术,研究更高效的用户随机接入策略,以提升网络资源的利用率。

1 多波束卫星通信系统

为了提升卫星资源的利用率,实现多样化业务的传输,近年来业内提出跳波束(Beam Hopping, BH)^[1]和采用相控阵体制的灵活捷变多波束技术^[2]。灵活捷变多波束一方面采用时间分片的思想,在不同的时间分片内灵活调度波束指向,实现对不同区域的通信覆盖;另一方面利用相控阵载荷波束可动态赋形的优点,可实时通过加权调整波束形状,实现对特定区域的覆盖。相比于传统的固定波束覆盖,实现空间、时间、频率、功率资源按需在各个波束间灵活分配。因此,灵活捷变多波束技术引起广大研究人员的广泛关注,被认为是卫星通信演进的一种关键技术。

以地球同步轨道(Geosynchronous Earth Orbit, GEO)卫星为例,其波束覆盖范围大且相对于地面保持位置不变。如图1所示,在卫星波束可达的覆盖区域内,可根据用户的分布特征以及通信业务量的实时需求,动态地将星下区域划分为多个波位。在载荷设计上,可以针对用户信令和业务设计不同的波束类型,将低增益宽波束用于信令传输,进行卫星波束覆盖区域内信令消息交互,实现用户终端的接入、卫星业务波束资源的调度以及卫星对用户终端的控制管理等功能。高增益窄点波束用于业务数据传输,满足高速率通信的需求,并且可根据不同用户的业务速率需求灵活进行波束间资源的动态分配,满足不同区域不同用户类型的通信需求。例如某区域用户终端较多,业务需求量较大,可以在该区域分配更多波束,或者在波束内分配更多的功率和频率资源。图1中以宽波束为例展示波束捷变的机制,在T1时刻,仅调度波束1内的用户终端,到T2时刻,跳转到波束2

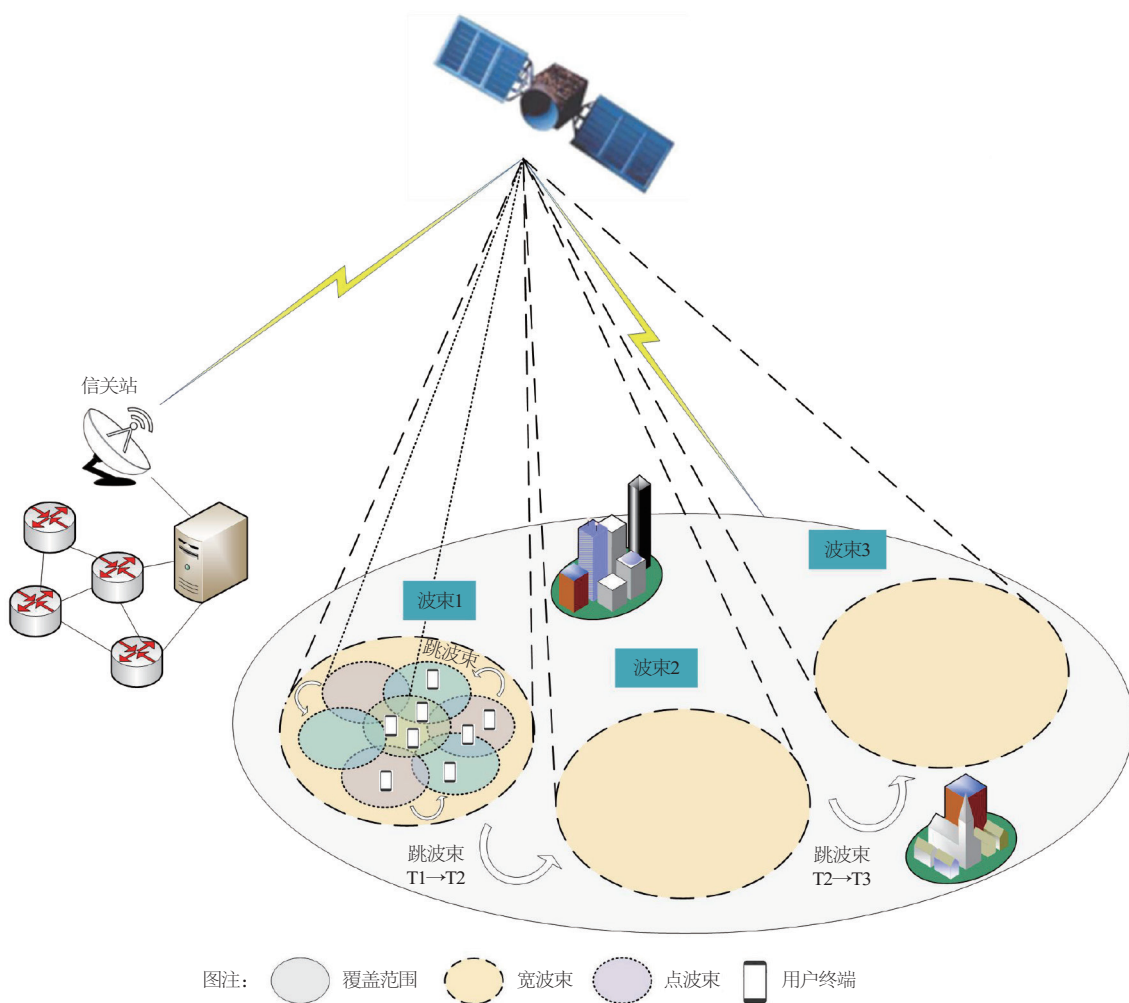


图1 GEO多波束卫星通信系统架构

进行调度, T3时刻跳转到波束3……以此类推。点波束也是类似的机制, 实际通信系统中, 同一时刻可以选择多个波束进行调度。

本文旨在基于GEO多波束卫星通信系统, 结合捷变波束的灵活调度机制, 研究波束的动态跳变策略, 设计用户终端在捷变波束信令情况下接入卫星网络的流程以及具体的信令交互过程。此外, 通过对用户随机接入机制的优化研究, 降低用户随机接入的冲突概率以实现用户高效接入, 从而降低用户的接入时延。

2 用户接入流程及信令交互

2.1 用户状态转换过程

GEO多波束卫星通信系统中, 多频TDMA (Multiple Frequency-TDMA, MF-TDMA) 运行下的用户终端状态转换过程如图2所示。

用户终端通电后首先进入“关闭/待机”状态, 当

成功获取登录所需的配置数据后, 进入“准备登录”状态, 此时允许传输登录突发消息。用户完成登录过程后进入“准备TDMA同步”状态, 此时允许传输控制突发消息用于进行TDMA同步过程。完成同步过程后, 用户进入“TDMA同步”状态, 这是用户的正常运行状态, 在此状态下可以进行数据传输。同时在此状态下若检测到网络时钟基准 (Network Clock Reference, NCR) 丢失, 用户进入“NCR监测”状态, 此时不允许进行传输。在任何状态检测到传输禁用标志置1时, 用户立即进入“保持/待机”状态, 直到传输禁用标志置0, 用户返回“关闭/待机”状态重新接入网络。

2.2 用户接入流程及信令交互

用户终端主要通过5个过程建立并维护与卫星网络的连接, 图3说明从初始上电到进入TDMA同步状态正常过程中的信令交互过程以及对应的状态变化。下面对此过

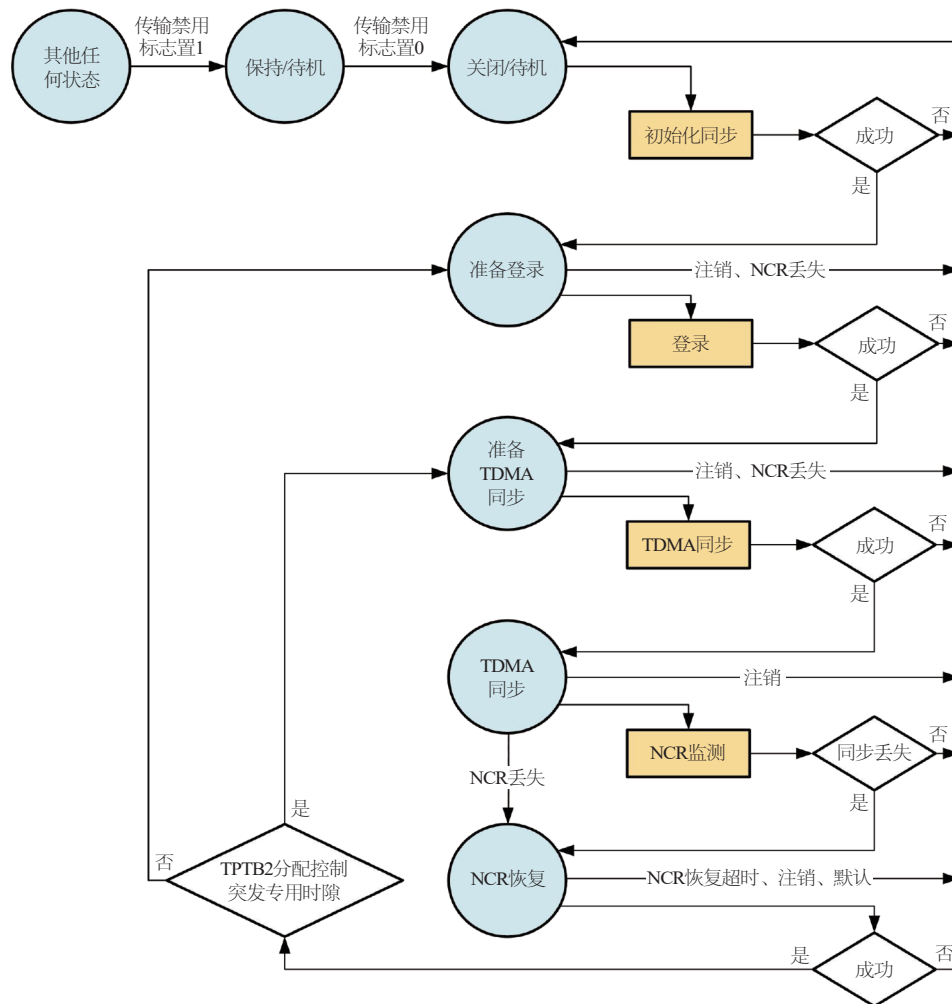


图2 多频TDMA运行下的用户终端状态转换过程

程进行详细的说明。

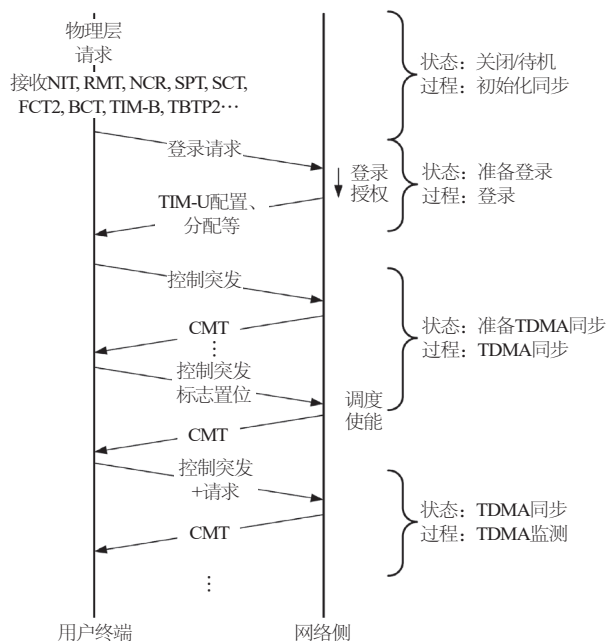


图3 信令交换过程以及对应的状态变化

(1) 初始化同步过程

用户终端首先需要从前向广播中查找与返向/上行链路网络运行相关的所有必要控制信息，包括网络信息表 (Network Information Table, NIT)、卫星位置表 (Satellite Position Table, SPT)、NCR、突发时间计划 (Burst Time Plan, BTP)、跳波束时间计划 (Beam Hopping Time Plan, BHTP)、超帧组成表 (Superframe Composition Table, SCT)、帧配置表2 (Frame Configuration Table2, FCT2)、广播配置表 (BCT)、终端突发时间计划表2 (Terminal Burst Time Plan2, TBTP2)、终端信息消息广播 (Terminal Information Message Broadcast, TIM-B)。成功接收到上述信息表后，用户终端可以进入“准备登录”状态。

(2) 底层登录过程

用户终端根据SCT、FCT2、BCT和TBTP2的规定，在BTP中搜索可以使用的登录时隙。用户终端在登录时隙中发送登录请求，使用随机接入或者用户终端专用的登录时隙（如果存在专用时隙，则优先使用专用时隙）。用户终端发送登录请求后等待登录响应，当没有收到响应或者被拒绝，重复传输随机接入登录请求时，用户终端应实施随机延迟。随机接入的重传将在随机延迟后进行，用户终端从TIM-B的登录竞争描述符中检索重传方案的参数。用户终端在延迟间隔之前不得再次发

出随机接入登录请求。如果用户终端等待到最后一个响应超时前没有收到登录接受指示，则登录过程失败。

(3) TDMA同步过程

TDMA同步过程使用专用接入控制时隙，相关的配置参数在TIM-B发送的校正控制描述符合终端信息消息单播 (Terminal Information Message Unicast, TIM-U) 发送的控制分配描述符中提供。用户终端等待专用的控制时隙传输控制突发，当TIM-U中发送的校正消息描述符或校正信息表 (Correction Message Table, CMT) 指示的频率及时间错误分别小于指示的非零频率阈值和非零时间阈值时，同步成功。用户终端尝试通过专用接入控制时隙传输的次数定义为最大尝试次数，如果超过该值后仍未完成同步，则视为同步失败。用户传输控制突发后，未连续收到的最大校正次数定义为最大丢失次数，如果超过该值，也视为同步失败。

(4) 同步监控过程

用户终端在专用接入控制时隙中继续进行控制传输的监控响应和缺失响应，以保持TDMA同步过程。该过程按照专用接入控制时隙的分配速度进行，和TDMA同步过程类似，在每次控制突发传送后，用户终端等待反馈的校正信令；当任何校正误差大于门限时，或者连续丢失校正超过最大值时，认为同步丢失。

(5) 注销过程

用户终端可在底层信令中发出注销请求和注销原因。收到注销请求后，网络侧应在TIM-U中回复注销指示和注销原因。网络侧也可向用户终端发出注销指示。收到此消息后，用户终端如果未处于“保持/待机”状态，则应停止传输并进入“关闭/待机”状态。

3 信令波束动态捷变策略分析

在GEO卫星通信系统中，用户终端一次接入往返传输时延高达几百毫秒，用户随机接入失败导致的重传将会带来很大的接入时延，因此在接入信令设计时需要尽可能提高一次接入成功的概率。在进行信令波束设计时首先需要考虑选取的信令波束与其他波束的空间隔离度，相邻波位避免使用相同频谱资源，降低波束之间的干扰，并且使用较低的码率和调制方式进行传输来降低误码率，利用频谱效率来换取高可靠性。此外，也需要考虑不同区域用户终端数量和活跃度的差异，根据波束覆盖区域内请求接入的用户数，即区域的热力值，为热点区域用户分配更多的接入资源。

由于信令波束是用户终端接入网络的基础，既要满足密集区域大量用户的高效接入，也要保证覆盖范围内的所有用户都可以接入网络中，因此不能采用完全按需

调度的模式，而要采用周期调度和按需调度相结合的混合调度方式。周期调度主要面向低热点区域的用户，保证一定周期的重访，以达到覆盖范围内所有终端用户都有机会接入卫星通信网络，可以采用帧或超帧为周期进行分配。按需调度则是面向中高热点区域用户，网络侧根据热力值预测，为各个区域分配所需的波束、时隙和频谱资源。

针对采用捷变波束的高轨卫星网络，在每个跳波束周期内，信令波束的动态跳变策略设计如下。

(1) 根据各个区域的热力值预测，预估得到跳波束周期内各个波束信令所需的时隙资源，假设共 N 个波束，其中波束 i 预测所需时隙资源为 $Req(i)$ ，预期分配资源为 $Allo(i)=\max\{1, Req(i)\}$ 。

(2) 根据总可用时隙和每个波束预测的待分配时隙，确定每个时隙调度波束的个数；假设总可用时隙为 $Stotal$ ，总待分配时隙为 $Sallo=\sum Allo(i)$ ； $K=\lfloor Sallo/Stotal \rfloor$ ；调度的波束个数为 $K+1$ 的时隙数为 $(Sallo-K\times Stotal)$ ，调度的波束个数为 K 的时隙数 $[Stotal-(Sallo-K\times Stotal)]$ 。

(3) 按照所需时隙大小从高到低为波束排序，依次为排序后的波束分配时隙资源，每个时隙在达到最大分配波束后将不再继续分配。这里尽量保证波束分配的资源是连续的时隙。

图4为跳波束信令分配示意，其中一个波束分配周期包含10个时隙，共6个待分配波束，每个波束待分配时隙分别为 $\{1,2,3,5,4,7\}$ 。首先计算每个时隙的分配波束个数，其中两个时隙分配3个波束，剩下的时隙分配两个波束；然后按照待分配时隙从大到小的顺序分配，最终分配的结果如图4所示。该示例可以解释按照从高到低的需求分配波束的原因，如果先从1号波束分配，则最后会剩余4个时隙的资源，波束6无法分配到足够的时隙资源。

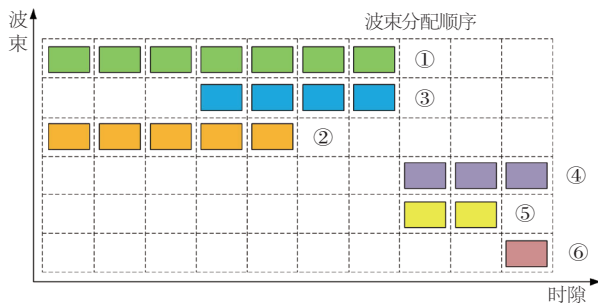


图4 跳波束信令分配示意

通过上述接入信令的波束分配策略设计，既可以保证所有覆盖区域的用户终端都可以接入卫星通信网络，又可以根据业务的多样性，为高热点区域分配更多的资

源，以降低用户接入冲突的概率，降低接入时延，从而保证所有用户都可以快速接入卫星通信网络。

4 用户随机接入机制

用户终端接入网络的请求属于突发类型，适合通过随机竞争方式接入网络。在随机竞争接入中，用户根据自身业务需求决定是否接入信道，无须与系统中其他的用户进行协商，每个用户公平竞争接入资源。因此随机接入中存在接入冲突的情况，如果用户接入冲突，则需要等待一段时间重新发送接入请求。在卫星通信系统中，接入冲突导致的重传会引入更多的传输时延。因此本节提出负载自适应优化算法，通过优化接入机制来降低冲突概率，进一步降低接入时延。

4.1 用户随机接入策略

卫星通信中常见的随机接入机制有两种，一种是时隙ALOHA (Slotted-ALOHA, S-ALOHA)，另一种是竞争解决分集时隙ALOHA (Contention Resolution Diversity Slotted ALOHA, CRDSA)。

(1) 时隙ALOHA

ALOHA适用于用户间不进行协商，且争夺同一个共享资源的系统。纯ALOHA机制中，只要用户有数据发送，就可以立即发送；如果发送失败，则随机延迟一段时间后进行重传，避免再次发生冲突。为了进一步降低冲突概率，提升系统吞吐量，在ALOHA系统中增加同步机制，引入S-ALOHA接入机制。

S-ALOHA接入机制把时间划分为固定长度的时隙，时隙长度和数据包长度相等或略大于数据包长度，用户只在时隙的起始位置发送数据。因此当两个数据包发生冲突时，它们将完全冲突，而不是部分冲突，该机制可以有效降低冲突概率。假设用户在第 n 个时隙的中间时刻有数据包要发送，它只能等待第 $n+1$ 时隙的开始才能发送数据包。

(2) 竞争解决分集时隙ALOHA

用户采用S-ALOHA协议接入时，不进行用户协商，因此用户之间存在发生接入冲突的情况，可能需要重新发起多次重传接入，在卫星通信中会导致较大的接入时延。作为改进，分集时隙ALOHA (Diversity Slotted ALOHA, DSA) 通过在帧中随机的时隙位置发送两份相同的接入数据包，增加时间分集，降低丢包率 (Packet Loss Ratio, PLR)，在低负载下可以提高S-ALOHA的性能，但是在高负载下可能会使性能恶化，导致更大的冲突概率和丢包率。

基于连续干扰消除 (Successive Interference Cancellation, SIC) 的随机接入方案可以进一步提升接入成功率，降低接入时延。CRDSA机制就是结合SIC技术，在DSA的基础

上进一步降低接入时延。与DSA类似,CRDSA将每个数据包发送 n 次,在一帧中随机选择不同时隙发送,区别在于数据包除了帧头、导码和有效负载信息外,还包含一个指向其他副本所在时隙的指针。接收机接收一帧数据后,首先遍历一帧,寻找不冲突的数据包,当该数据包被搜索到并成功解调后,可以获取到其副本所在时隙,通过干扰相消技术,消除其副本在对应时隙造成的干扰;然后不断迭代,直到解决所有的冲突或者达到最大迭代次数。

图5给出CRDSA的接入机制和解调示意,其中一帧包含10个时隙,传输8个不同的数据包,每个数据包重复发送2个或3个。第一步遍历一帧找到不冲突的数据包3、2和4,解调其数据包并消除其在其他冲突时隙上的干扰;然后第二次遍历,找到消除干扰后不冲突的数据包1和5,解调数据包并消除其在其他冲突时隙上的干扰;再进行第三次遍历,找到数据包6解调。此时,仅剩下数据包7和8,由于在时隙7和时隙10上同时存在,仅通过干扰消除无法成功解调数据包,这种不可恢复的冲突称为环路。随着负载加重或者复制比提高,环路产生的概率也会变大。参考文献[4]提出的多时隙多用户联合检测方案,可以获取不同时隙上的信道,通过解线性方程组消除环路带来的影响。这种方法只适用于冲突的时隙数大于等于冲突的数据包个数的情况。当具有捕获效应时,即接收信号功率存在较大差异,较强信号功率超过一定的阈值时,接收端也可能成功解调该数据包。

CRDSA根据复制比是否可变为固定复制比CRDSA (Constant Replication Ratio CRDSA, CR-CRDSA) 和可变复制比CRDSA (Variable Replication Ratio CRDSA, VR-CRDSA), 其中CR-CRDSA表示数据包的复制比是固定的,数据包的复制比越高,丢包率会呈现先降低后提高的趋势,同时使得用户能量效率越低,系统负载越

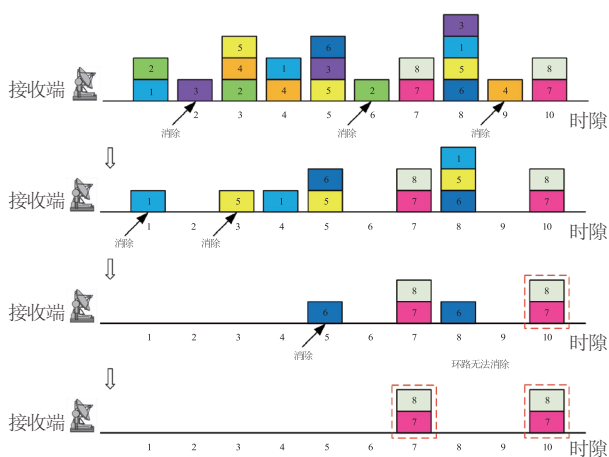


图5 CRDSA的接入机制和解调示意

重,因此不可以无限地提升重复次数。

VR-CRDSA表示数据包的复制比可变,对于每一个数据包,复制比是从已知的集合 i 中随机选择的,每个复制比对应的概率固定。概率分布函数可以表示为

$$F(i) = \sum_{i \in I} p_i x^i \quad (1)$$

其中 p_i 为复制比为 i 的概率, $\sum_{i \in I} p_i = 1$ 。

假设 $F(i) = 0.4x^2 + 0.35x^3 + 0.25x^4$,表示复制比为2的概率是0.4,复制比为3的概率是0.35,复制比为4的概率是0.25。

4.2 基于热力值的自适应接入机制

CRDSA相对于S-ALOHA在接入负载低时,可以提升通信系统接入的性能。随着网络接入负载逐渐变大,过多的时间分集反而会加重系统的负担,带来更大的冲突概率。基于每帧接入用户数固定的业务模型,固定接入用户数下的CRDSA接入用户仿真如图6所示,其中 D 代表时间分集数。从仿真结果可以看出,随着系统归一化负载的提升,用户的接入冲突概率逐渐变大,吞吐量先上升再下降。从仿真结果也可以看出,在高负载下,尽管分集数下降可以带来性能的提升,但是过高的接入冲突概率仍然不能满足通信的要求,因此可以考虑通过改变退避时间来改变每个帧的接入用户数。

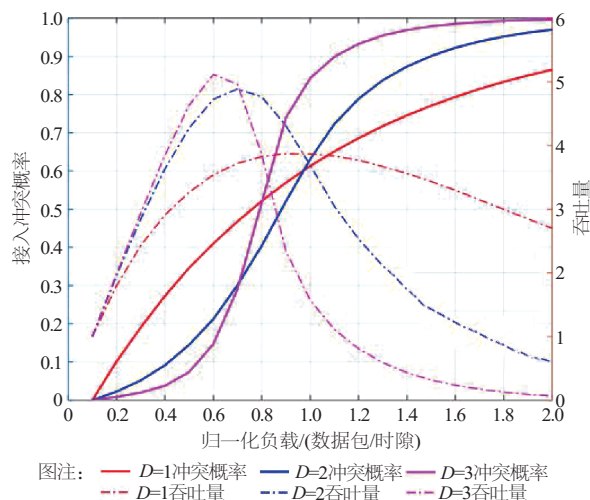


图6 固定接入用户数下的CRDSA接入用户仿真

用户随机接入过程中的退避时间指的是用户在随机接入失败后等待的时间,一般服从 $[0, \text{最大退避时间}]$ 的平均分布。退避时间越大,同一时间接入网络的用户数越多,接入冲突概率越低,但同时导致用户等待接入的时间增加。因此为了减少用户的接入时间,需要综合考虑随机

退避机制引入的接入等待时间以及接入冲突引入的传输时延。在网络接入负载较低的情况下,用户接入冲突概率较低,此时应该设置较小的退避时间,使得所有用户可以快速接入网络。当网络接入负载很高时,用户同时接入网络会造成网络的拥塞,可能会导致每个用户都无法接入网络,此时应该设置较大的退避时间,牺牲用户等待接入的时间来保证每个时刻都有用户可以成功接入。

在多波束卫星通信系统中,各个波束覆盖范围内的接入用户数不同,固定的随机接入机制显然不能满足多样化的用户接入需求。本文提出一种自适应的用户接入机制,根据网络侧对不同波束区域热力值的预测,分配不同的随机退避时间,通过信令消息下发至用户终端,每个用户终端根据网络指示的最大值随机生成退避时间进行用户接入。

基于热力值的自适应接入机制如下:

(1) 由于捷变波束的机制,网络侧持续预测波束可达区域内的热力值和接入时隙,计算得到每个区域的归一化负载;

(2) 网络侧根据归一化负载计算用户的最大退避时间,假设用户的基础最大退避时间为 D ,归一化负载为 y ,则计算得到的最终最大退避时间为 $D'=D \times y$;

(3) 网络侧通过信令将最大退避时间下发给用户,用户采用分集数为3、退避时间服从 $[0, \text{最大退避时间}]$ 平均分布的方式接入卫星网络。

CRDSA随机接入性能对比如图7所示,仿真使用的业务模型为固定总接入用户数,用户接入失败后,随机等待一定时间再次发起接入,等待时间服从 $[0, \text{最大退避时间}]$ 的平均分布,直到所有用户接入网络。仿真的参数设置为:共仿真20帧,每帧包含10个时隙,假设每个时

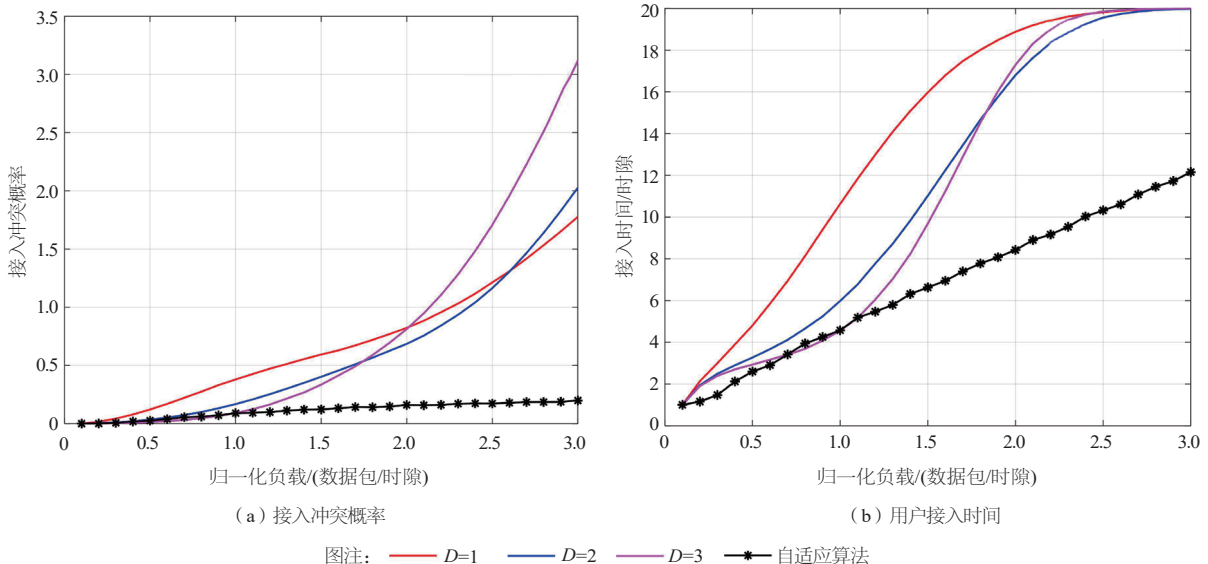
隙可以发送一个接入请求数据,总的用户数在1~30遍历,基础的最大退避时间设置为3帧,蒙特卡洛仿真次数设置为100 000次。

首先对比接入冲突概率。接入冲突概率定义为平均每帧的冲突用户数,从仿真结果可以看出,采用自适应算法的接入冲突概率在归一化负载小于1时,始终低于0.1;在归一化负载接近3时,达到0.2,远远小于采用基础的CRDSA接入机制,可见基于热力值的自适应接入算法可以有效地降低因为接入冲突引入的传输时延。

其次,图7中的用户接入时间是指所有用户成功接入网络所用的时间,这里没有考虑接入消息往返用户和网络侧之间的传输时间。从仿真结果可以观察到,当系统的归一化负载接近1时,采用基础的CRDSA接入机制的接入时间会快速升高,这是由于接入冲突概率变大、用户重传次数变多,因此等待的时间变长。采用自适应算法接入网络的接入时间随着负载增加也平稳增加,但是相比于基础的CRDSA接入降低一半的等待时间。这进一步证明本文提出的自适应接入算法可以有效降低因为冲突重传引入的等待时间。

通过仿真结果可以验证提出的基于热力值预测的自适应接入机制可以在不同的网络负载下,很大程度地降低用户接入冲突的概率,从而降低因接入冲突导致的重传概率,减少接入的传输时间以及等待时间。

网络侧在预测的热力值发生变化时,重新计算最大规避时间,下发信令通知用户终端。因此为了降低信令的开销,在实际的实现中可以将热力值范围划分为不同的区间,当两次预测热力值处于同一区间时,认为小区负载没有发生变化,不下发额外的信令通知用户终端。为了避免



预测值不断地在两个等级之间来回波动,可以通过设计双门限或者惩罚机制对网络侧预测值进行防抖动处理。

5 结束语

本文基于捷变多波束卫星通信系统,设计用户随机接入的流程和信令交互的机制,结合捷变波束机制提出信令波束的动态捷变策略,可以在保证所有用户终端都有机会接入网络的基础上,有效地提升卫星系统的资源利用率。通过对CRDSA机制的进一步分析,提出一种基于热力值的自适应接入机制优化算法,降低用户接入冲突的概率,加速用户接入网络;后续可以再进一步考虑网络侧热力值预测的设计和优化方案。

参考文献:

- [1] ROSSI T, DE SANCTIS M, CIANCA E, et al. Future space-based communications infrastructures based on High Throughput Satellites and Software Defined Networking[C]//Proceedings of 2015 IEEE International Symposium on Systems Engineering. Piscataway: IEEE Press, 2015: 332-337.
- [2] FENECH H, AMOS S, WATERFIELD T. The role of array antennas in commercial telecommunication satellites[C]//Proceedings of 2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-4.
- [3] 陈坤汕. 基于LTE的GEO卫星通信系统上行接入技术研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2013.
CHEN K S. Research on uplink access technologies in GEO satellite communication system for LTE[D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2013.
- [4] 冯亚丽. 基于CRDSA的卫星随机接入与控制方案研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
FENG Y L. CRDSA based random access and control scheme in satellite network[D]. Xi'an: Xidian University, 2018.
- [5] 朱子行, 赵尚弘, 李勇军, 等. 再生式通信卫星转发器的研究进展[J]. 电讯技术, 2011, 51(8): 147-153. ZHU Z H, ZHAO S H, LI Y J, et al. Research progress of regenerative communication satellite repeaters[J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51(8): 147-153.
- [6] ETSI EN 301 545-2(v1.3.1): Digital Video Broadcasting (DVB); Second Generation DVB Interactive Satellite System (DVB RCS2); Part 2: Lower Layers for Satellite standard[Z].
- [7] 宋奕辰, 徐小涛, 宋文婷. 国内外卫星移动通信系统发展现状综述[J]. 电信快报, 2019(8): 37-41.
SONG Y C, XU X T, SONG W T. Overview of the development of satellite mobile communication systems at home and abroad[J]. Telecommunications Information, 2019(8): 37-41.
- [8] 李怡, 易克初, 于全, 等. 基于多波束GEO卫星的大容量互联网接入系统[J]. 信号处理, 2016, 32(12): 1387-1394.
LI Y, YI K C, YU Q, et al. A large capacity Internet access system based on multi-beam GEO satellite[J]. Journal of Signal Processing, 2016, 32(12): 1387-1394.
- [9] 李欣. 基于MF-TDMA/CWTDM的多波束卫星通信系统研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
LI X. Research on multi-beam satellite communication system based on MF-TDMA/CWTDM[D]. Xi'an: Xidian University, 2014.
- [10] 贾和平, 宋莉, 李红涛, 等. GEO卫星移动通信系统的体系结构特征研究[J]. 无线电工程, 2017, 47(9): 7-11, 50.
JIA H P, SONG L, LI H T, et al. Research on architecture characteristics of GEO mobile satellite system[J]. Radio Engineering, 2017, 47(9): 7-11, 50.
- [11] 包文倩. 多波束卫星通信系统资源分配研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
BAO W Q. Research of resource allocation in multi-beam satellite communication system[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018.
- [12] 王小龙. GEO/LEO卫星移动通信系统的接入控制策略研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2014.
WANG X L. Research on access control strategy in GEO/LEO satellite mobile communication system[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014.
- [13] 王继高. 基于移动通信系统随机接入过程的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
WANG J G. Research on random access process based on mobile communication system[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006.
- [14] 李倩. 低轨卫星通信系统随机接入技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
LI Q. Research on low-orbit satellite random access technology[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [15] 马吟龙. 高延迟空天网络的接入控制策略研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2017.
MA Y L. Research on call admission control of high delay space network based on GEO satellite[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2017.
- [16] 周卫兵. 卫星网络资源管理与接入技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
ZHOU W B. Research of resource management and access technology based on satellite network[D]. Beijing: Beijing

- University of Posts and Telecommunications, 2018.
- [17] CASINI E, DE GAUDENZI R, DEL RIO HERRERO O. Contention resolution diversity slotted ALOHA (CRDSA): an enhanced random access scheme for satellite access packet networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(4): 1408-1419.
- [18] LIVA G. Graph-based analysis and optimization of contention resolution diversity slotted ALOHA[J]. IEEE Transactions on Communications, 2011, 59(2): 477-487.
- [19] MENGALI A, DE GAUDENZI R, ARAPOGLOU P D. Enhancing the physical layer of contention resolution diversity slotted ALOHA[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(10): 4295-4308.
- [20] MENGALI A, DE G R, ARAPOGLOU P. Optimizing contention resolution diversity slotted ALOHA to support massive access protocols[C]//Submitted to IEEE Transtion on Communication 2016. [S.l.:s.n.], 2016.
- [21] STEFANOVIC C, POPOVSKI P, VUKOBRATOVIC D. Frameless ALOHA protocol for wireless networks[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(12): 2087-2090.
- [22] STEFANOVIC C, POPOVSKI P. ALOHA random access that operates as a rateless code[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(11): 4653-4662.
- [23] PAOLINI E, LIVA G, CHIANI M. High throughput random access via codes on graphs: coded slotted ALOHA[C]//Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2011: 1-6.
- [24] GALLINARO G, ALAGHA N, DE GAUDENZI R, et al. ME-SSA: an advanced random access for the satellite return channel[C]//Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2015: 856-861.
- [25] GHANBARINEJAD M, SCHLEGEL C. Distributed probabilistic medium access with multipacket reception and Markovian traffic[J]. Telecommunication Systems, 2014, 56(2): 311-321.
- [26] SAITO M, OKADA H, SATO T, et al. Throughput improvement of CDMA slotted ALOHA system by modified channel load sensing protocol[C]//Proceedings of PIMRC '96 - 7th International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Communications. Piscataway: IEEE Press, 1996: 103-107.
- [27] FENG Y L, REN G L, ZHANG H N. Multi-slot and multi-user joint detection scheme for CRDSA in satellite network[J]. IEICE Communications Express, 2018, 7(3): 89-94.

[作者简介]



黄子轩（1994-），女，硕士，现就职于天地信息网络研究院，主要从事卫星通信物理层算法和卫星通信网络协议的研究工作。



周家喜（1980-），男，博士，现就职于天地信息网络研究院，主要从事卫星网络架构与协议研究以及测控通信系统设计工作。



张靖（1983-），男，硕士，现就职于天地信息网络研究院，主要从事卫星网络架构与协议研究以及卫星通信系统设计工作。



张正宇（1985-），男，博士，现就职于天地信息网络研究院，主要从事卫星网络架构与协议研究以及测控通信系统设计工作。