

文章编号:1000-6893(2009)09-1718-09

# 高效 MF-TDMA 系统时隙分配策略

董启甲, 张军, 张涛, 秦勇

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

## Resource Allocation Strategies in MF-TDMA Satellite Systems

Dong Qijia, Zhang Jun, Zhang Tao, Qin Yong

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of  
Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**摘要:** 由于具有高效性和灵活性,多频时分多址接入(MF-TDMA)技术被广泛应用于现代宽带通信卫星系统的上行链路设计中。时隙分配算法的有效性是高效利用 MF-TDMA 系统资源的保证。在 MF-TDMA 系统中,时隙资源分配问题可以分为两步:载波信道选择和信道内的时隙分配。对于第 1 步, RCP-fit 等算法提供了良好的用户载波信道预约策略。本文主要针对时隙分配过程的第 2 步展开讨论,针对载波内的时隙管理问题提出了一种基于倒序时隙编号时隙资源树的时隙组织方式,从时隙编号的角度解决了时隙时间均分问题。并采用伙伴递归调整算法作为载波内时隙优化定位方法,有效减低时隙碎片对系统资源利用率的负面影响。最后通过仿真,验证了该时隙管理算法的高效性。

**关键词:** 卫星通信; 多频时分多址接入; 无线资源管理; 时隙编号; 时隙分配

**中图分类号:** TN927

**文献标识码:** A

**Abstract:** In modern satellite communication systems, because of its high efficiency and flexibility, multi-frequency time-division multiple-access (MF-TDMA) technique is widely applied to the up-link of broadband communication satellites. The timeslot allocation strategy is the key to guarantee the efficient utilization of the system resources. This issue can be divided into two steps: channel select and in-channel slot allocation. In step 1, there are already some efficient methods such as the RCP-fit algorithm. This article concentrates on step 2, and proposes an inverse numbering slot tree as a model, thereby simplifying and solving the difficulty of time-evenly-dispersed slot allocation. Based on this bin-tree model, an optimized timeslot allocation algorithm is advanced including the Buddy-fit optimal allocation method and recursive adjusting process to reduce the detrimental influence caused by timeslot fragments. The simulation shows that the allocation algorithm is of high efficiency in the management of timeslot resources.

**Key words:** satellite communication; MF-TDMA; radio resource management; slot numbering; resource allocation

多频时分多址接入(MF-TDMA)技术是宽带多媒体卫星通信系统关键技术之一,被广泛应用于 ATM-based, DVB-based 和 IP-based 等卫星通信系统的上行链路设计中,是目前卫星移动通信技术研究的热点。

MF-TDMA 技术中上行链路由多个载波信道构成,每个信道又被细分为若干个时隙,这种设计可以保证多用户、多业务接入的灵活性,提高卫星系统无线资源的利用率。在业务接入阶段,需要针对每个连接的 QoS 请求在复杂的信道结构中分配时隙资

源,在多用户、多业务环境下时隙资源的有效管理将面临巨大挑战,面向用户 QoS 的高效时隙资源分配算法一直都是 MF-TDMA 技术的难点<sup>[1-3]</sup>。

若将 MF-TDMA 中的载波/时隙资源占用表看成是一个二维的矩阵(其中行表示不同频率的载波,列表示按时间划分的时隙),则 MF-TDMA 时隙资源分配问题可以描述为:在一定约束条件下,针对某业务对时隙数目的需求,如何从上述时隙矩阵中的空闲时隙中寻找最优时隙位置的问题。具体来说,当 MF-TDMA 时隙分配器收到某业务的时隙需求后,时隙分配器将从现有的空闲时隙中找到合适的时隙分配给该业务,这种分配需要满足一定约束条件,同时要使时隙资源利用率最优。

目前,对于 MF-TDMA 宽带多媒体卫星通信

收稿日期:2008-07-08; 修订日期:2009-04-19

基金项目:国家自然科学基金(60532030); 国家杰出青年科学基金(60625102)

通讯作者:张军 E-mail: buaazhangjun@vip.sina.com

系统,时隙资源分配问题的约束条件主要有4个:①资源管理器响应终端发起的请求,为一个连接分配的资源要限制在一个载波中;②资源管理器为同一终端分配的时隙资源,在时间上不能重叠;③为避免冲突的发生,同一个时隙资源不能同时分配给两个连接;④为一个终端分配的时隙总数不能超过一个载波的时隙容量。由于上述限制的存在,所以同一个终端的所有连接资源往往都分配到一个载波中。所以时隙分配过程可以分解为两个步骤:第1步是确定在哪个载波信道中为终端用户分配资源;第2步是如何在该信道中确定可用时隙资源分配给终端。

其中,第1步需要解决用户信道选择问题。在这方面,最具代表的是 J. M. Park 的 RCP-fit 算法。在 J. M. Park 等<sup>[4-5]</sup>的研究中,MF-TDMA 卫星系统的信道被标志成预约、共享等状态,采用了预约优先的信道选择方法,与 First-fit 和 Best-fit 等算法进行了比较并显示了较好的仿真结果。RCP-fit 及其改进算法能够提供有效的载波信道选择方法。

MF-TDMA 中的时隙资源分配问题中的第2步实质是单载波内时隙资源管理问题。主要需要解决两个问题:①如何更好地满足多种业务的 QoS 要求;②选取什么样的模型作为时隙管理和分配的目标。在这方面,X. F. Pan 等<sup>[6]</sup>给出了一种时隙块单元(Unit Block)的概念,块大小被定义为  $2^n$  ( $n$  为整数,且  $0 \leq n \leq \log_2 N$ , 其中  $N$  为载波内划分的时隙个数),资源被整块地分配给用户。这样主要是为了简化分配处理过程,但其主要存在两个问题。首先,当用户带宽要求(时隙的个数)不符合块的大小时,必须近似为某一级块单元的大小,不能体现连接真正的带宽要求,从而降低了带宽利用率。其次,突发时隙块的分配方式,使所有分配给一个用户的连接集中于超帧中的一段时间,而剩余的时间用户没有传送数据的能力,对于语音视频等要求时间连续的多媒体业务,这种处理方法会显著影响它们的服务质量。针对现有算法对载波内时隙管理的不足,本文提出了基于倒序时间资源二叉树作为时隙管理的模型,并给出了基于这种模型的时隙优化分配算法,很好地避免了时隙碎片的影响,提高了时隙资源利用率。

## 1 载波内时隙管理模型

### 1.1 问题分析

在讨论时隙分配算法之前,首先要解决的是时

隙标注问题。MF-TDMA 系统中,资源管理器是按照时隙为单位来管理无线资源的。要对无线资源进行高效管理,首先要在系统内对时隙进行统一编号。高效、明确地统一时隙编号,是提高星上资源管理器(RAM)与地面终端交互效率的必要前提。

目前的 MF-TDMA 时隙分配算法都是以研究时隙数量分配为主<sup>[7-11]</sup>,而对于时隙在 MF-TDMA 帧中的位置分配则研究很少,仅文献[1]、文献[2]和文献[12]在研究时隙数量分配的基础上提出了简单的时隙位置分配方法,但并没有开展不同的时隙位置分配对于业务时延性能影响的研究。随着现代宽带通信卫星的发展,卫星系统不但要支持以数据包为主的通信方式,还要支持各种多媒体业务,如视频、语音。如果按照突发数据(Burst Time Plan)模式为用户分配时间连续时隙资源,如图1(a)所示,终端获得的时隙资源必然会出现时隙资源集中于一个较短的时间内,而大部分时间内用户产生的信息不能及时传输,导致数据的不连贯,对视频业务和语音业务影响尤其严重<sup>[13]</sup>。为了保证通信的实时性和连贯性,在针对语音和视频等时延抖动要求高的业务时,需要给数据源在分配时间上均匀分布的时隙资源。即时隙应该在一个超帧时间内均匀分布,具有等间隔性和周期性,以保障用户均衡有效的工作,如图1(b)所示。

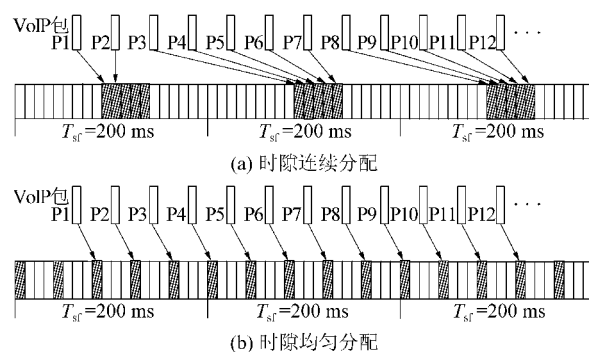


图1 时隙均分方法

Fig. 1 Timeslot allocation mode

传统的时隙资源编号方式,多采用时隙与时间相对应的编号方法,即按照时隙在超帧中的时间先后顺序进行编号,这样的编号方法简单,易于实现。但采用这种方式不易于表示超帧中均匀分散的时隙资源。如果采用时隙均分法,管理和分配时隙资源将面临很大的挑战。本文提出一种时间序号倒序的时隙编号方式,解决了 MF-TDMA 时隙管理中周期性时隙的时间不连续与编号连续性的矛盾,从时隙组织的角度解决了时间均分法。

## 1.2 倒序编号资源二叉树

以一个典型的 MF-TDMA 卫星系统为例,一个超帧结构中,每个载波包含 256 个时隙,首先采用常规的按照时间顺序的方法给 256 个时隙进行排序编号  $0 \sim 0xFF$ , 然后根据每个时隙的末位 bit(0,1), 可以将 256 时隙分为 2 组, 将末尾为 1 的归类到 Group 1, 末尾为 0 的归类到 Group 0。然后根据倒数第 2 位可以进一步把每个组再次分隔, 如可以把 Group 0 进一步分为 Group 00 和 Group 01, 这样可以逐步二分, 生成资源二叉树, 如图 2 所示。资源树中的每一层节点包括的时隙数是上一层节点的一半。沿着资源树的分支号, 就可以得到该时隙的倒序编号。

一个时隙从倒序时隙资源二叉树中得到的编号, 实际上是其时间顺序编号的按位前后颠倒。

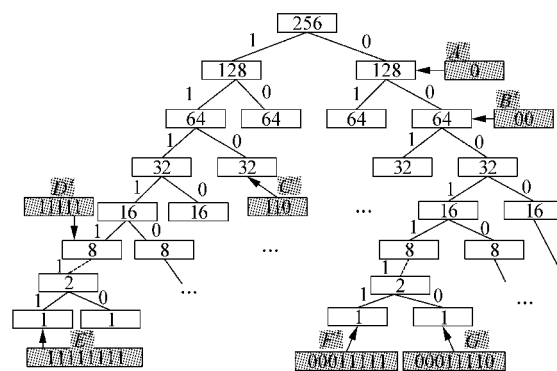


图 2 倒序编号时隙资源树

Fig. 2 Timeslot tree using inverse numbering

按照倒序编号, 一个时隙资源组内的时隙的编号是连续的, 它们在时间上是分散且均匀分布的。图 3 表示了时隙的分组方法和时隙组中时隙在时间上的分布情况。

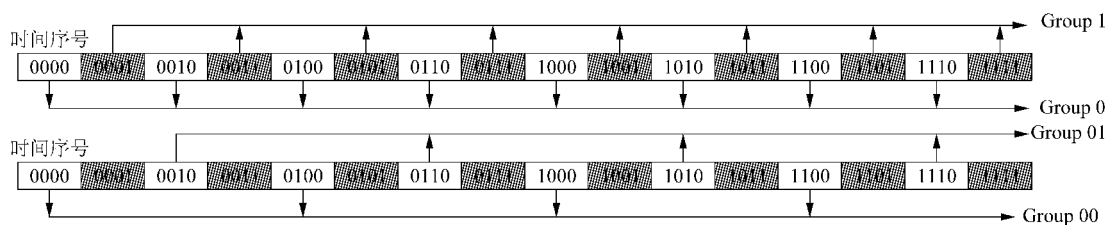


图 3 时隙编号例子

Fig. 3 Example of inverse order numbering

树中的每一个节点代表一组时隙, 下面给出时隙资源树的组织方法中用到的一些概念:

**时隙组** 是资源树中的一个节点所代表的时隙的集合。一个时隙组可以用组号和掩码来表示 (类似于 IP 地址)。每个组的大小为  $2^n$ 。图 2 中的  $A' \sim G'$  就表示了不同大小、不同编号的时隙组。

**组号** 一个组的组号由其在资源树中的位置决定, 可以通过从上而下沿树枝的编号得到。

**组掩码** 组掩码中的 1 的个数表示了组号中的有效位数。该组包含的时隙个数, 即组大小, 可以由组掩码的补码得到。

如对 256 个时隙进行编号, 那么编号和掩码都采用 8bit 的二进制数。如图 2 中的  $C'$  组资源, 其组号为 110B, 掩码为 11100000B, 所有与掩码进行与运算等于 11000000B 的时隙都在这个组内, 时隙组的大小为 32, 资源组起始编号为 11000000B。

在用户端, 由于时间顺序编号和倒序编号存在一一对应的关系, 它们之间的对应和转换也可以通过硬件快速实现, 如图 4 所示, 首先组号和组掩码相与, 取结果中对应其组掩码位为 1 的若干

位, 并将其按位前后颠倒后, 作为时隙时间序号的末若干位。前面的剩余位任意填充, 得到的这些顺序编号的时隙都属于该倒序编号组。图 4 中, 倒序编号在组 110 中的时隙的时间顺序编号位末位是 011 的 32 个时隙资源。

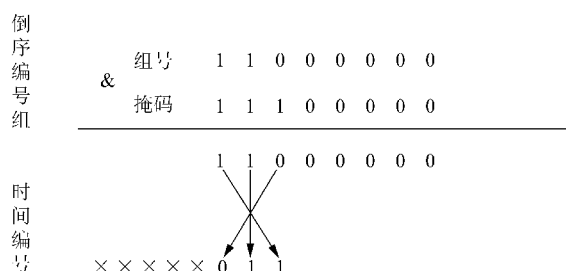


图 4 倒序编号和时间编号的转换

Fig. 4 Convert method between inverse order number and time sequence number

由倒序资源树中得到的时隙编号, 实际上就是其时间序号的翻转。采用这种倒序的分组编号方法, 同组里时隙资源的编号是连续的, 但是在时间轴上是等间隔均匀分布的。如果多个时隙组分配给同一个连接, 虽然得到分配结果不满足在时

间上严格均匀,但每个时隙组内部的时隙满足时间轴的均匀分布特性。这样,在兼顾时隙分配结果的有限段表示的同时,基本可以满足时间均匀分布性要求。

## 2 载波内优化时隙分配算法

采用倒序编号资源二叉树作为时隙管理模型,在时隙资源分配阶段,就是要在资源树中的各层中查找最合适的节点,然后将其代表的时隙组分配给该业务,完成时隙分配任务。

### 2.1 时隙分配的分段处理方法

因为时隙资源树中的每个时隙组的大小都是 $2^n$ ,当连接的申请的时隙数不等于 $2^n$ 时,就不能通过分配一个时隙组来满足申请时隙要求。为确切反映用户的带宽要求,有效利用时隙资源,本文采用分段分配的方式,即处理时隙申请时,将分配若干个时隙组,每个时隙组的大小为 $2^x$ ( $x$ 为整数,且 $0 \leq x \leq \log_2 N$ ),分别位于时隙资源树中的不同位置。

基于分段处理方法的时隙分配过程可以描述为以下步骤:

首先对用户连接请求的时隙数进行划分,划分成符合各层时隙组大小的块,即分成若干个 $2^x$ 的和。即 $N = 2^k + 2^l + \dots + 2^m$ ,其中 $\log_2 N > k > l > m > 0$ 。

然后在倒序资源树结构的每一层中,分别对各块进行资源搜索和分配。

采用上述先分解、再填充的方法,在将若干个资源申请定位到一个空的载波时,可以采用 First-fit,即靠右对齐的原则,将每个资源申请块都定位在资源树中最靠右边的且满足申请块大小要求的时隙组。如资源管理器先后收到 5 个资源申请  $A(16)$ ,  $B(32)$ ,  $C(8)$ ,  $D(24)$ ,  $E(48)$ 。其中  $D$  分成了 16 和 8 两个资源块,  $E$  分成了 32 和 16 两个时隙块。5 个连接总共申请的时隙数为 128 个,在初始分配时,由于时隙树结构中没有时隙碎片的影响,载波时隙资源的利用率最高可以达到 100%,也就是说如果通过接入控制(即载波内有足够的资源满足分配要求),一定能成功地对连接分配资源。但时隙管理是一个连续的过程,随着连接多次分配和释放以后,时隙碎片对整个系统利用的影响就开始显现出来。

### 2.2 问题分析及解决思路

采用分段处理方法,若对载波时隙资源做连续的管理,那么在多次分配释放后,载波时隙表中的资源就会出现分段碎片,而碎片的产生会对分配产生影响。时隙碎片的影响随系统运行时间而加剧。下面举两个例子说明两种情况对时隙分配的影响。

**例 1** 当连接  $A, B, D$  释放连接以后,其载波时隙资源占用情况如图 5 所示,这时空闲时隙数为 72,如果顺序收到  $G(16)$ ,  $H(16)$ ,  $K(32)$  3 个资源申请,若按照右对齐的分配原则,  $G$  将被定位在组 000,组 010 分配给  $H$ ,由于  $H$  的分配位置破坏了组 01 的完整性,使得当  $K$  申请到来时就没有一个空闲的大小为 32 的时隙组来分配给  $K$ 。对于这个问题可以调整  $H$  或  $G$  的分配位置来解决,避免破坏时隙块资源的完整性,避免产生时隙碎片。

**例 2** 如图 5,同样当连接  $A, B, D$  释放连接以后,这时如果连接  $F$  发起一个 64 个时隙资源的申请,当前的可用时隙资源数目显然可以满足连接  $F$  的要求,但是由于早先的连接  $C$  的时隙分配位置,破坏了组 0 的完整性,这些空闲时隙不能构成一个大小为 64 的时隙组。所以,由于碎片和分配方法的影响,虽然载波中有足够时隙资源,但却不能成功地对资源申请进行分配。

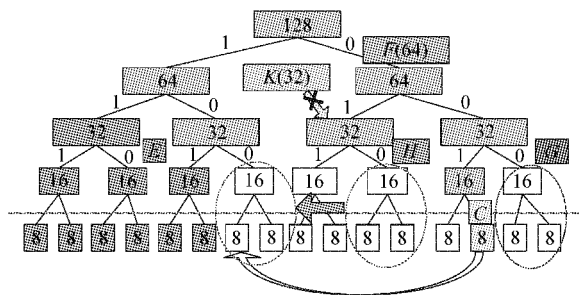


图 5 连接释放后重新分配的例子

Fig. 5 Example of sot fragment influence

所以在资源分配的过程中要解决两个问题: ①如何减少由于资源分配方法而形成的时隙碎片; ②如何有效利用连接释放后形成的资源碎片。从两个方面提高资源的利用率,降低由于时隙碎片引起的接入失败概率。

为了预防时隙碎片的形成,这里借鉴内存管理中的 Buddy 算法,结合 MF-TDMA 时隙资源树,在时隙管理中引入伙伴关系的概念<sup>[14]</sup>。满足

以下3个条件的称为伙伴:①两个块大小相同;②两个块地址连续;③两个块必须是从同一个大块中分离出来的。

伙伴关系可以应用于前面编码形成的资源树结构中,即一个树枝上的两个组可以看做是符合伙伴关系。引入伙伴关系的目的是在时隙分配阶段,不但要考虑当前组的占用情况,而且它的伙伴关系组的占用情况也要作为分配的判决参数,优先分配其伙伴组已经占用的时隙组。这样可以避免破坏大的空闲时隙组的完整性,避免时隙碎片的产生,提高资源的利用效率。那么例1中,考虑伙伴组的影响后, $G(16)$ 将被定位在组000,组100分配给 $H(16)$ ,时隙组01分配给 $K(32)$ ,3个资源申请都可以得到成功的分配。所以,采用伙伴关系对于时隙碎片的预防是有效的。

此外,为了尽量避免时隙碎片的产生,在时隙分配阶段,尽量使释放时间相近的连接定位相邻时隙资源块中,那么当时隙块释放时,就可以合并得到更大的整块可用时隙资源。

但在申请和释放过程中,即使有了预防时隙碎片的机制,时隙碎片的产生也是不可避免的。对于例2中的情况,并没有因为加入伙伴关系的影响而得到改善,仍然不能直接分配时隙组以满足 $F(64)$ 的要求。为了解决时隙碎片对系统利用率的负面影响,需要在分配过程中加入事件驱动的时隙调整过程,对时隙碎片进行整理。

### 2.3 伙伴递归时隙分配方法——BFRA

针对上述问题,给出一种基于资源树的伙伴优化定位递归整理时隙分配方法,实现MF-TDMA载波内时隙的高效分配,具体设计如下。

使用效用函数作为一个时隙组来判断一个时隙组的可用性,主要受4个因素的影响。

(1) 该组资源内的占用情况,反映了该组可用资源的情况。

$$W = \begin{cases} \alpha & \text{若该组资源未被占用} \\ \beta \frac{N_{\text{free}}}{N_{\text{all}}} & \text{若该组资源部分被占用} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\alpha, \beta$ 为比例因数。

(2) 资源树中各个组的伙伴关系组的占用情况影响函数

$$F = F_c + F_t \quad (2)$$

式中: $F_c(0 \sim \chi)$ 表示了其伙伴关系组的占用影响函数, $\chi$ 表示占用影响函数的影响因子,取值方法如下,分配时,优先分配其伙伴组已经被占用的时隙组。

$$F_c = \begin{cases} \chi & \text{伙伴关系组被占用} \\ 0 & \text{伙伴关系组未被占用} \end{cases} \quad (3)$$

$F_t$ 表示了伙伴关系组的剩余存活时间的影响。

$$F_t = \eta e^{-|t_t - t_1|} \quad (4)$$

式中: $\eta$ 为影响因子; $t_t$ 为伙伴关系组内被占用时隙的剩余存活时间; $t_1$ 为当前申请资源的连接要求的持续时间。 $F_t$ 主要考虑将释放时间相近的组放在一起,当其释放时,可以得到完整的时隙组资源。

(3) 时隙组中分配的连接个数及其资源占用情况,调整组内被占用时隙块的难易程度 $L(<0.1)$ 可以表示为

$$L = \frac{\delta}{e-1} (e - e^{N_{\text{max}}/N_{\text{group}}}) \quad (5)$$

式中: $N_{\text{group}}$ 为当前所在的资源组大小; $N_{\text{max}}$ 为该时隙组内时隙所在已占用资源块的最大值。若组内的时隙资源隶属于一个上层的时隙资源块,则 $N_{\text{max}}$ 取该时隙块的大小。没有连接时取 $\delta$ ;如果时隙组内时隙过隶属的占用时隙块是当前搜索时隙组的上一级二叉树节点,即 $N_{\text{max}} > N_{\text{group}}$ ,那么 $L < 0$ 。调整组内被占用时隙块的难易程度 $L$ 的值越小,其难度越大。

例如,图6中,在搜索大小为16的组资源时,组111(16)和组110(16)同属于一个连接,它们的最大隶属于组11,所以它们的 $N_{\text{max}}$ 等于32。 $N_{\text{max}} > N_{\text{group}}$ ,所以 $L$ 取值为负数。

(4) 资源树层中各组的时间衰减函数 $T$ ,用来衡量一个时隙组被释放的可能性,可能性越高,则调整该组的效用越低,则时间衰减函数 $T$ 值就越小。若一个连接的预定时间为 $T_r$ ,已持续时间为 $T_d$ 。连接被划分为3个阶段,处在末期的连接有较高的释放连接的可能,不值得耗费多余的时间来调整其分配资源。

$$T = \begin{cases} 0 & \text{连接处于连接末期} & (T_d \geq 2/3 T_r) \\ 0.5\gamma & \text{连接处于连接中期} & (1/3 T_r < T_d < 2/3 T_r) \\ \gamma & \text{连接处于连接初期} & (T_d \leq 1/3 T_r) \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\gamma$  为比例因子。

一个时隙组资源的效用函数由这 4 部分因子构成, 其可以表示为

$$U_i = W_i + F_i + L_i + T_i \quad (7)$$

决定每个因素的影响因子时, 使得  $\alpha > \beta + \chi + \eta + \delta + \gamma$ , 全空的时隙组的可用性函数取值大于被部分占用的时隙组, 这样在存在可直接分配时隙组时, 就不会调整部分占用的组资源。若  $U > \alpha$ , 表示该时隙组为全空闲, 可以直接被分配; 若  $U < \alpha$ , 表示该组资源不直接可用, 需要将组内的连接进行调整后才可用。一个资源组的效用函数值越大, 其可利用性越高。载波内的时隙分配算法如图 6 所示, 其过程具体如下:

①遍历时隙资源树, 得到每个组的效用函数, 取值最大的那个组作为分配目标组; ②若  $U > \alpha$ , 说明该组内当前没有时隙被占用, 可以直接分配;

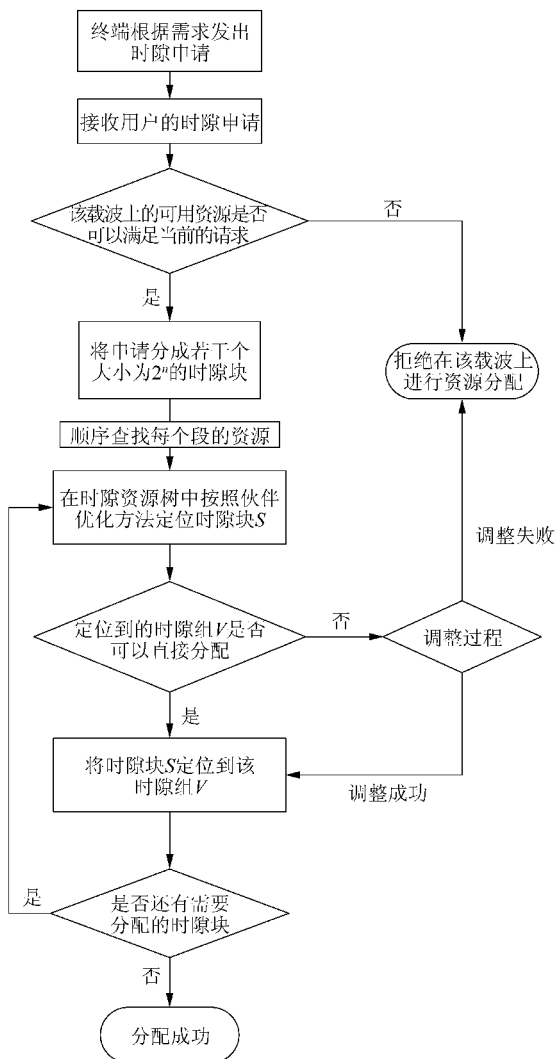


图 6 伙伴优化定位和调整过程

Fig. 6 Buddy-fit with recursive adjustment (BFRA) algorithm

③若  $U < \alpha$ , 说明该组内现有被其他连接占用的资源, 则启动调整步骤; ④若调整成功, 那么分配该组资源; ⑤若调整不成功, 拒绝连接请求。

调整过程是将组内的已分配时隙资源重新定位到更合适的位置, 通过调整过程可以整理时隙碎片, 提高资源的利用率。重新定位过程也要按照以效用函数为判断准则的时隙分配查找方法, 这样在重定位过程中可能会引起新的组调整过程。时隙的调整实际是一个递归过程, 时隙资源树中上一层时隙组内的调整可以引发并依赖于树中下层时隙组的调整。由于每一级调整中, 调整块的大小会递减, 块越小, 调整的成功率就越高, 当调整的块大小递归到 1 时, 则肯定能够得到成功的调整结果。所以基于递归的时隙调整算法, 能够有效利用时隙碎片, 解决碎片对系统的影响, 达到理论上 100% 的时隙利用率。调整过程的嵌套深度决定了算法的复杂程度, 可以调整组内调整的级数控制算法复杂度。

根据分配算法, 例 2 中, 连接 F 发起一个 64 个时隙的资源申请, 那么经过分配算法第 1 步, 得到效用函数最大的那个组为 0 号组, 组内只为连接 C 分配了 8 个时隙, 启动调整算法, 可以将连接 C 搬移到组 100 中, 搬移后可以得到一个空闲的时隙组 0(64) 分配给连接 F。

递归调整的具体过程如图 7 所示。

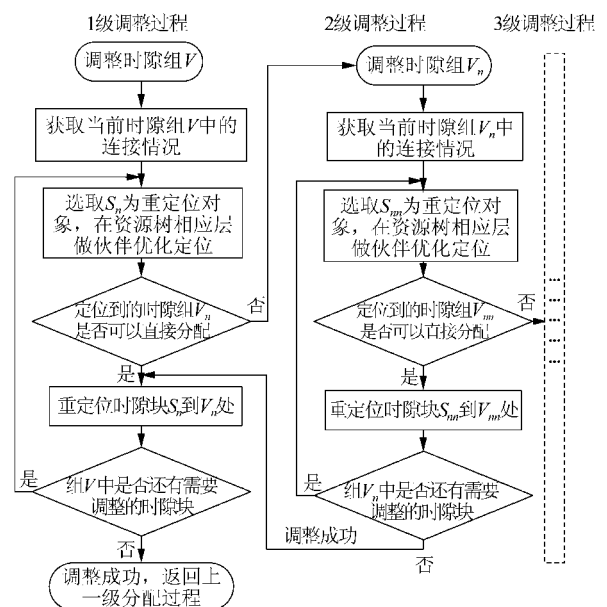


图 7 递归调整过程

Fig. 7 Recursive adjusting process

## 2.4 算法实现复杂度分析

卫星节点的处理能力主要受限于处理器

运算能力和存储器存储能力。

### (1) 算法计算复杂度

对于伙伴优化定位过程,时隙资源块的每次定位都需要一次全局的优化查找过程,定位过程是一次查找效能函数的最优值查找过程,其复杂度由系统超帧内划分的时隙数  $N$  与当前需要定位的时隙块大小  $m$  决定,需要比较的次数为  $N/m$ 。当需要查找的时隙块大小为 1 时,单次查找定位的复杂度最大,需要查找次数为  $N$ 。递归调整算法的最大递归深度为  $\log_2 N - 1$ 。每层调整需要对该层内的被占用时隙块做重定位调整,重定位的次数决定了完成整个时隙分配任务的复杂度。在最坏情况,在定位大小为  $m$  的时隙块时,最多要调用  $\frac{1}{2}(1+m)\log_2 m$  次重定位,一般小于  $m$ 。所以时隙分配过程的复杂度小于  $mN$ 。故复杂度最高为  $O(N^2)$ ,其复杂度近似于一次排序过程,可以由星上处理器来运行完成。

### (2) 存储结构

在卫星节点的无线资源管理器的实现中,无线资源管理器可以通过维护载波/时隙占用表和用户信息结构来管理当前的资源利用情况。

载波/时隙占用表,表示各个载波内时隙的占用状态,表中每个 bit 表示一个时隙的占用情况。载波时隙表中不保存时隙被哪个用户占用,具体的占用情况由用户信息结构记录。采用位图结合索引的表示方法。

为了避免每次优化定位查找过程对效能函数的重复计算,与位图表示的时隙占用表相配合,可以采用与时隙资源二叉树对应的结构对树中的每一层的节点的效能函数进行保存,称之为时隙资源效能函数表,用来配合执行伙伴优化定位算法的快速实现。由于效能函数反映的是一个实时的时隙占用信息,故在每一次时隙分配过程成功后,分配结果发生变动的时隙资源块的效能函数将发生改变,需要在分配成功后进行更新,而与分配结果无关的时隙块的效能函数维持不变。为节省存储空间,大小为 1 的块不需要对效能函数进行存储。这样表示一个载波内的 256 个时隙资源需要的存储空间大小为  $32(\text{MTCS bitmap}) + 256(\text{时隙占用时长}) + 254(\text{效能函数查找表}) = 542 \text{ Byte}$ 。

对于一个典型的 MF-TDMA 系统,假定一个超帧内包含了 256 个数据时隙,系统中有 48 个载波信道和 36 个波束。整个系统的时载波时隙占

用表和其效用函数对应表需要占用的内存小于 1 MB,小于星上存储空间限制,可以满足现代通信卫星系统的存储容量要求。

## 3 仿真分析

采用前面介绍的 MF-TDMA 卫星系统背景,对时隙分配过程进行模拟,对用户和业务模型做如下假定:①连接申请的到达率符合泊松过程,每超帧时间内的到达量为统计变量;②每个连接的持续时间满足持续时间为中心的高斯分布;③每个连接申请的时隙数满足  $[0, 16]$  的均匀分布;④系统中当前有 100 个用户,其中有 2 个用户发起的连接带宽要求是其他用户的 8 倍;⑤一个超帧中包含了 256 个时隙。

下面参数反映当前系统的运行情况。

(1) 系统资源利用率:当前时隙资源的利用率情况反映了系统的负载情况。

(2) 申请拒绝率(Rejection Ratio):因为申请在进入资源分配过程以前已经通过了接入控制(CAC),假定当前的空闲资源可以满足被到达资源管理器的每一个资源申请,系统的拒绝率主要来源于时隙碎片的影响。把申请拒绝概率作为算法性能一个考核方面,是衡量系统长时间运行后稳定度的一个重要参数。申请拒绝率可以表示为  $N_{\text{rej}}/N_{\text{req}}$ ,  $N_{\text{rej}}$  为资源管理器拒绝掉的申请数,  $N_{\text{req}}$  为总共收到的申请数。

(3) 时隙调整触发率(Adjust Ratio):可以表示为  $N_{\text{adj}}/N_{\text{req}}$ ,  $N_{\text{adj}}$  表示时隙组首次定位不成功,需要触发时隙调成的次数。时隙调整触发率表示了由于调整算法使得用户已分配连接需要重新调整的概率,过高的调整触发率会加重信令处理单元与地面的交互任务,影响终端通信的连贯性。

(4) 调整过程中时隙定位过程的触发率(Relocation Ratio):发起一次调整过程,需要对当前组的各个已被占用的资源块进行调整,需要触发多次调整过程中的时隙组定位。调整过程的触发率反映了算法的时间复杂度。

下面将针对这些因素,对 First-fit 算法, Buddy-fit 算法, Single-adjust (SA) 算法, Buddy-fit with single adjust (BFSA) 算法和 Buddy-fit with recursive adjust (BFRA) 算法展开分析。

用时隙利用率来表示当前的系统负载情况,图 8 表示了时隙资源利用率与拒绝率的关系。从图中可以看出,在相等的负载情况下,First-fit 表

现出最高的拒绝率。考虑了 Buddy 因素的 Buddy-fit 算法在没有付出调整代价的情况下降低了拒绝率,但是在系统的利用率超过 85% 时,系统时隙申请拒绝率高达 10%,这两种算法在系统负载较高时的表现都不理想。在时隙分配算法中加入调整过程后,高系统负载下的拒绝率显著降低。没有加入 Buddy 影响的单级调整时隙分配算法,在系统负载达到 95% 时,其拒绝率始终保持在 5% 以下。由时隙分配阶段加入 Buddy 组的影响因素的算法,可以看到拒绝率进一步得到了优化。如果采用递归调整分配算法,由于时隙碎片带来的时隙申请拒绝将被彻底地消除。

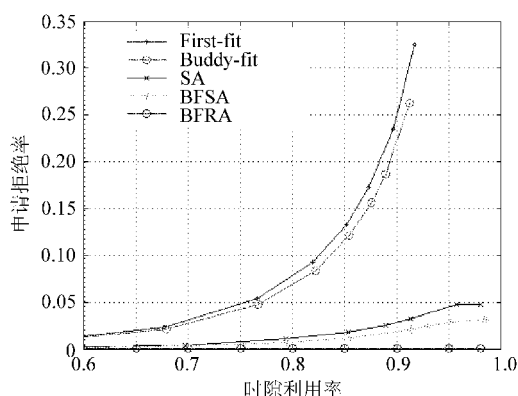


图 8 申请拒绝率与时隙利用率的关系

Fig. 8 Reject rate vs utilization rate

图 9 显示了在不同的系统负载下,由于时隙碎片影响导致的首次时隙分配失败,系统调整时隙资源分布的概率。First-fit 和 Buddy-fit 算法不会触发调整过程,所以下面分析中不再涉及这两种算法。从图 9 可以看到,BFSA 算法在高负载的情况下可以保持比较低的时隙调整触发率,SA 算法中时隙调整的突发率会随系统负载的提高而显著上升,BFSA 算法在两者间取得折中。

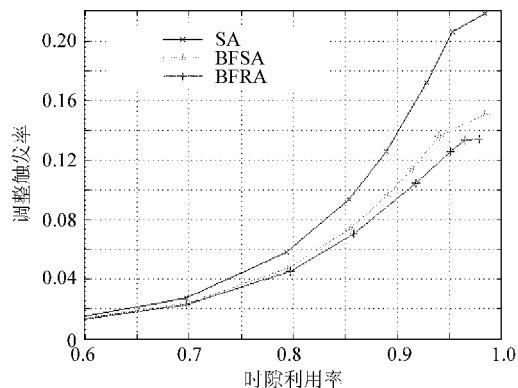


图 9 调整触发率与时隙利用率的关系

Fig. 9 Adjust trigger rate vs utilization rate

说明在相同的负载情况下,处理相同个数的时隙申请,BFSA 算法的时隙组调整触发率最低。这是由于每次调整过程 BFSA 算法都采用递归调整,使调整得到的空闲资源的可用性和完整性得到提高。通过 SA 和 BFSA 算法的比较,可以看到 BFSA 算法能够保护时隙组的完整性,在相同负载下降低了调整的触发率。比较来看,采用 BFSA 算法能够避免时隙组调整的频繁触发,减少了由于分配结果变化带来的星地间的交互。

每次调整时隙资源分布的过程可能触发多个重定位过程,每次优化重定位的过程是相近的,整个信令处理时间段内的重定位过程的触发程度反映了由于加入调整运算而带来的附加的时间消耗,如图 10 所示。First-fit 和 Buddy-fit 都没有采用调整方法,故它们没有复杂度的增加。从图 10 中可以看到,时隙块重定位的发生率来说,3 种算法曲线相近。也就是说处理相同个数的资源申请,3 种算法所发起的时隙块重定位的时间消耗是相近的。所以 3 种算法的时间复杂度上是相近的,故 BFSA 算法每次深度调整所多花费的时间代价是值得的,虽然每次可能触发的调整层次比较深,但是在相同的时间复杂度情况下能够得到较好的调整效果。

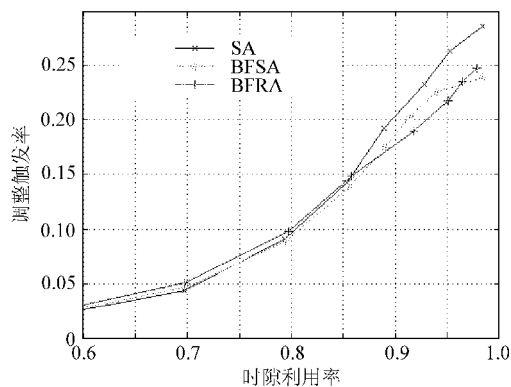


图 10 重定位过程触发率与时隙利用率的关系

Fig. 10 Trigger rate of relocation vs utilization rate

## 4 结 论

针对 MF-TDMA 卫星通信系统的资源管理中的载波内时隙分配问题展开了讨论。在建立时隙管理模型时,采用基于倒序时隙编号时隙资源树结构,可以简化时隙时间均分问题,有效保障音视频业务流的传输实时性和连续性。采用这种管理模型,时隙碎片会影响整个系统的时隙利用率,采用伙伴优化定位的递归调整时隙分配算法



BFRA, 可以从预防和调整两个方面解决时隙碎片对时隙分配的影响, 并保证低的额外开销。测试结果显示, 该算法在保证低接入拒绝率的情况下, 系统资源利用率显著提高。由于其高效性和可实现性, 该算法可以广泛应用于现代 MF-TDMA 通信系统中。

### 参 考 文 献

- [1] Prisco F D, de Santis M, Faggiano A. Resource management in a broadband satellite network [C]//First International Conference on 3G Mobile Communication Technologies. 2000, 471: 292-400.
- [2] Olariu S, Todoroua P. Resource management in LEO satellite networks [J]. IEEE Potentials, 2003, 22(2): 6-12.
- [3] Acar G, Rosenberg C. Performance study of end-to-end resource management in ATM geostationary satellite networks [C]//Military Communications Conference on Communications for Network-Centric Operations; Creating the Information Force. 2001, 2: 764-769.
- [4] Park J M, Savagaonkar U, Chong E K P, et al. Allocation of QoS connections in MF-TDMA satellite systems; a two-phase approach[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(1): 177-190.
- [5] Park J M, Chong E K P, Siegel H J. Efficient resource allocation for QoS channel in MF-TDMA satellite systems [C]//Proceedings of 21st Century Military Communication Conference, MILCOM2000. 2000, 2: 645-649.
- [6] Pan X F, Wei L. Resource allocation in variable bandwidth MF-TDMA satellite communications [C]//Processing of the 8th International Conference on Signal. 2006, 4: 16-20.
- [7] Koutsakis P. Predictive resource reservation access for multimedia integration over GEO satellite networks [C]//Proceedings of the Third International Conference on Wireless and Mobile Communications. 2007: 33.
- [8] Chisci L, Fantacci R, Francioli F, et al. Dynamic bandwidth allocation via distributed predictive control in satellite networks [C]//Proceedings of the First International Symposium on Control, Communications and Signal. 2004: 373-376.
- [9] Gaudenzi R D, payload nonlinearity impact on the Globalstar forwardlink multiplex. Part I: physical layer analysis [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1999, 48(3): 960-976.
- [10] Jiang Z, Leung V C M. A predictive demand assignment multiple access protocol for Internet access for broadband satellite networks [J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2003, 21(4/5): 451-467.
- [11] 吕蓉, 曹志刚. 采用自适应 FEC 的卫星 ATM 网络的有效带宽估计[J]. 电子与信息学报, 2004, 26(10): 1513-1520.  
Lu Rong, Cao Zhigang. Estimation of effective bandwidth for satellite ATM networks with adaptive FEC [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2004, 26(10): 1513-1520. (in Chinese)
- [12] Lee K D, Cho Y H, Lee H J, et al. Optimal scheduling for timeslot assignment in MF-TDMA broadband satellite communications [C]//Proceedings of Vehicular Technology Conference. 2002, 3: 1560-1564.
- [13] 黄凯, 毛玉泉, 苗强, 等. STDMA 数据链系统的动态时隙分配研究[J]. 航空电子技术, 2005, 36(3): 25-29.  
Huang Kai, Mao Yuquan, Miao Qiang, et al. A dynamic slot allocation scheme in STDMA data link systems[J]. Avionics Technology, 2005, 36(3): 25-29. (in Chinese)
- [14] 郑晓曦, 张虎. 一种改进的伙伴系统内存管理方法 [J]. 计算机与数字工程, 2008, 36(3): 46-48.  
Zheng Xiaoxi, Zhang Hu. An improvement memory management method based on buddy system[J]. Computer and Digital Engineering, 2008, 36(3): 46-48. (in Chinese)

#### 作者简介:

董启甲(1984—) 男, 硕士研究生。主要研究方向: 卫星移动通信, 无线资源管理。

E-mail: dongqijia@ee.buaa.edu.cn

张军(1965—) 男, 博士, 北京航空航天大学电子信息工程学院院长, 博士生导师。主要研究方向: 天空地一体化网络通信。  
E-mail: buaazhangjun@vip.sina.com

张涛(1973—) 男, 副教授。主要研究方向: 移动通信, 卫星网络通信。  
E-mail: zhtao73@163.com

秦勇(1981—) 男, 博士研究生。主要研究方向: 卫星移动通信, 无线资源管理。  
E-mail: qinyong@ee.buaa.edu.cn

(编辑: 张利平, 杨冬)