

# GEO 卫星通信系统中 MF-TDMA 信道分配算法研究

徐其乐<sup>1,2</sup> 陈建州<sup>1,2</sup> 刘立祥<sup>2</sup>

(中国科学院大学 北京 100190)<sup>1</sup> (中国科学院软件研究所 北京 100190)<sup>2</sup>

**摘要** 提出了 GEO 卫星通信系统中 MF-TDMA 信道分配算法 C-BFD。与传统信道资源分配算法相比, C-BFD 采用了基于优先组合的方式, 利用用户信道请求大小以及信道结构的特点, 通过分配过程中对用户信道请求进行组合并优先分配, 来减少时隙碎片的产生。仿真结果表明, 该算法能够有效降低系统阻塞率以及信道碎片对系统资源利用率的负面影响。

**关键词** 卫星通信, 多频时分多址接入, 信道分配, 一维装箱, 优先组合

**中图分类号** TP393.04 **文献标识码** A

## Channel Allocation Algorithm in MF-TDMA GEO Satellite System

XU Qi-le<sup>1,2</sup> CHEN Jian-zhou<sup>1,2</sup> LIU Li-xiang<sup>2</sup>

(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)<sup>1</sup>

(Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)<sup>2</sup>

**Abstract** A channel allocation algorithm named C-BFD in MF-TDMA GEO satellite system was proposed. Comparing with the traditional channel allocation algorithms, C-BFD uses preferential combination and allocates channel for users based on the characteristics of the channel structure and requested channel sizes. It reduces the channel fragmentation by combining users' requests which can fill up a complete carrier with the same frequency. The simulation result shows that this algorithm can effectively bring down the system block rate and channel fragmentation.

**Keywords** Satellite communication, MF-TDMA, Channel allocation, Bin packing, Preferential combination

## 1 引言

移动通信分为地面移动通信和卫星移动通信。卫星移动通信又可分为星座移动通信和静止轨道卫星移动通信。GEO(Geosynchronous Orbit)系统星地位置相对静止、波束覆盖面积大,不用考虑网络切换的问题<sup>[1]</sup>,因而成为区域性通信的首选。由于 GEO 卫星通信网络中星地距离较远,链路损耗大,传输时延长<sup>[2]</sup>,现有的地面移动通信协议无法直接应用于 GEO 卫星,如通用无线分组业务(General Packet Radio Service)协议。为此,欧洲电信标准化委员会(European Telecommunications Standards Institute, ETSI)提出了一套适合 GEO 卫星的无线分组业务协议(GEO-Mobile Packet Radio Service, GMPRS),其重点是为用户提供一套标准协议<sup>[3]</sup>。

在 GMPRS 信道分配相关标准中,采用了 MF-TDMA (Multi-frequency time-division multiple-access) 的信道结构<sup>[4]</sup>。MF-TDMA 系统由多个载频组成,每个载频又被细分为多个时隙。如何针对每个用户请求有效地在复杂的信道结构中分配时隙资源将成为关键。针对 MF-TDMA 系统的信道分配,文献<sup>[5]</sup>提出了时隙列表法,改进了周期轮询法中浪费在已分配信道上面的时间;文献<sup>[6]</sup>提出了一种 RCP\_fit 分

配算法,采用了载波信道预约策略,解决了载波信道选择的问题;在此基础上,文献<sup>[7]</sup>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,解决了信道内时隙的选择问题。但它们都未充分利用 MF-TDMA 系统信道的结构以及用户信道请求的数据特点,导致信道资源不能得到充分利用。

针对 GEO 卫星通信系统中 MF-TDMA 信道的结构以及现有算法的不足,本文将 MF-TDMA 系统信道分配问题转化为经典一维装箱问题,并在在一维装箱算法降序首次适应(First Fit Decreasing, FFD)和降序最佳适应(Best Fit Decreasing, BFD)<sup>[8]</sup>基础上,结合用户信道请求的数据大小特点,提出了基于优先组合的降序最佳适应算法(Composition Best Fit Decreasing, C-BFD),并通过理论分析与仿真实验对该算法的信道利用率和用户请求阻塞率进行验证。

## 2 MF-TDMA 信道分配问题描述

### 2.1 信道结构

在 GMPRS 中,工作的上行频段为 1626.5~1660.5MHz,下行频段为 1525.0~1559.0MHz。将资源划分为超帧、多帧、帧、时隙等多个层次以实现资源的高效、灵活分配。GMPRS 中,支持多种终端类型,不同类型的终端的数据传送能力不同。GMPRS 分组业务的时隙分配周期为一帧,信道结构采

到稿日期:2013-06-08 返修日期:2013-10-15 本文受国家共性软件预研基金(6150103)资助。

徐其乐(1988—),男,硕士生,主要研究方向为网络协议设计, E-mail: xuqile2060708@126.com; 陈建州(1986—),男,博士生,主要研究方向为组网与通信; 刘立祥(1973—),男,博士,研究员,主要研究方向为卫星组网。

用 FDMA (Frequency Division Multiple Access) 与 TDMA (Time Division Multiple Address) 相结合的方式, 可将信道资源视为一个二维矩阵结构(其中行表示不同频率的载波, 列表示按时间划分的时隙), 如图 1 所示。

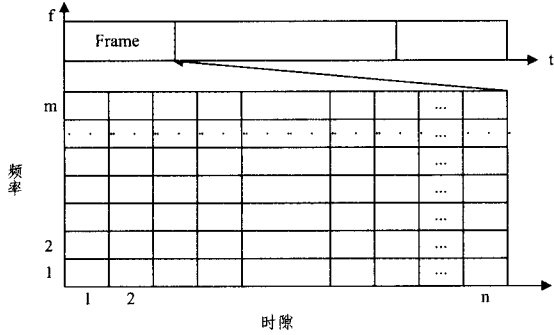


图 1 MF-TDMA 系统信道结构

分配过程可以看作是: 在一定的约束条件下, 在系统资源中为移动终端的时隙请求分配信道。约束条件主要有以下 4 个方面<sup>[9]</sup>: 为同一终端站分配的时隙资源, 在时间上不能冲突; 同一个时隙资源不能同时分配给两个业务申请; 为同一个业务申请分配的时隙资源必须要连续; 为同一业务申请分配的时隙资源不能跨频。

### 2.2 MF-TDMA 信道分配问题描述

根据前面描述的 MF-TDMA 信道结构以及分配约束, MF-TDMA 信道分配数学描述如下:

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m s(a_i) x_{ij} \\ \text{s. t.} \quad & \sum_{i=1}^n s(a_i) x_{ij} \leq N, j=1, 2, \dots, M \\ & \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq 1, i=1, 2, \dots, n \\ x_{ij} = & \begin{cases} 1, & \text{第 } i \text{ 个请求放入第 } j \text{ 个载频 } i=1, 2, \dots, n \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad j=1, 2, \dots, M \\ & s(a_i) \in [1, N], i=1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

其中,  $a_i$  表示第  $i$  个业务请求,  $s(a_i)$  表示该请求的信道数,  $M$  表示系统载波数,  $N$  表示系统每条载波内信道时隙数。

一维装箱问题的目标是用最少的箱子装下所有的物品; 而 MF-TDMA 系统信道分配问题是利用有限的载频尽量多地分配业务请求, 以达到信道资源的最大化使用。可将上述 MF-TDMA 信道分配的目标函数转换为

$$\min M \times N - \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m s(a_i) x_{ij}$$

其中,  $M$  为载频数,  $N$  为每载频内信道数。显然, 这两个问题是等价的。

一维装箱经典算法中, 按照从大到小排序后的业务请求顺序去进行信道分配, FFD 算法中, 在已分配的载波中找到第一个能容纳下该业务请求的载波, 分配相应业务请求; 而 BFD 算法中, 则每次都是把请求尽量分配到能容纳得下该请求的剩余信道数最少的载波中, 目的是让该载波得到充分的利用。但无论 FFD 还是 BFD, 它们在信道分配过程中都不可避免地会产生较多的信道碎片, 限制了信道利用率的提升, 增加了业务阻塞率。

## 3 基于优先组合的分配算法

针对 MF-TDMA 信道分配的特点, 本章对基于优先组合

的 C-BFD 算法进行描述, 并给出相应理论分析。

### 3.1 C-BFD 算法

在有限的信道资源下, 要更最大限度地利用现有信道, 满足更多的用户请求, 减少信道时隙碎片的产生, 而前述的 FFD 和 BFD 算法都没有过多地考虑信道碎片问题。例如, 假设信道结构为  $2 \times 10$  的 TDMA 帧, 用户的连接请求时隙为 A(4)、B(6)、C(8)、D(7)、E(3)。则根据 BFD 的分配流程, 将按照 C(8)、D(7)、B(6)、A(4)、E(3) 的顺序进行业务分配。分配结果如图 2(a) 所示, 图中灰色区域为信道碎片。为了减少碎片的产生, 应该在分配业务请求时尽量让每一个载波刚好分配完它所有的信道资源, 这样这个载波就没有碎片产生了。待分配的用户请求信道数量有大有小, 可以把这些业务请求信道大小进行优先组合, 让两个业务请求大小之和刚好等于一个载波信道数的两个请求优先进行分配。按照这种分配方式, 将优先分配 D(7)、E(3) 和 B(6)、A(4)。结果如图 2(b) 所示, 信道碎片明显减少。C-BFD 算法流程如表 1 所列。

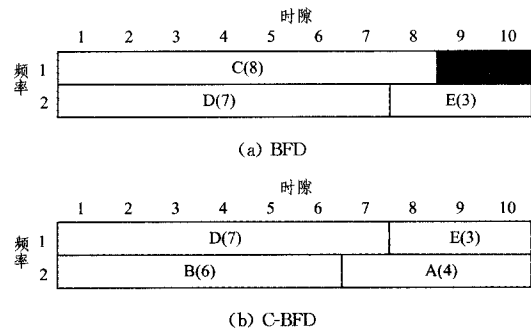


图 2 C-BFD 和 BFD 的分配结果

表 1 基于优先组合的 C-BFD 算法

Algorithm: C-BFD	
1.	按非升序对所有业务请求排序
2.	找出上述排序请求中所有配对的组合
3.	while 还有待分配的组合业务
4.	if 还有空闲载波 then
	分配组合业务
5.	else
6.	该业务被阻塞
7.	从业务序列中删除该业务组合
8.	endwhile
9.	while 还有待分配的非组合业务
10.	运用 BFD 算法寻找最佳位置
11.	if 位置存在 then
	将该业务分配到该位置中
12.	else
	该业务被阻塞
13.	从业务序列中删除该业务请求
14.	endwhile

考虑到系统信道资源有限以及用户业务申请数量不断增加, 与其他算法相比, 利用 C-BFD 算法优化后的信道时隙碎片有了一定程度的减少, 提高了载波信道的资源利用率, 并且能够满足更多的用户业务请求, 减少了包阻塞。为了更进一步说明该算法在减少时隙碎片和业务阻塞率方面的有效性, 下节将做出相应的理论分析, 给出几种算法在不同业务状况下的分配效果的差异性。

### 3.2 理论分析

假设 MF-TDMA 信道结构为  $M \times N$ , 即有  $M$  个载频, 每一个载频有  $N$  个时隙信道。所有的用户请求数为  $n$ , 按照每

个请求的信道数大小进行非递增排序后,得到这样的一组序列  $a_1, a_2, \dots, a_n$ , 请求  $a_i$  ( $1 \leq i \leq n$ ) 申请的信道大小为  $s(a_i)$ , 即  $s(a_1) \geq s(a_2) \geq \dots \geq s(a_n)$ , 且  $s(a_i) < N$ 。不妨设  $n$  个请求中现在有  $k$  对组合  $L_k = \{(a_{i_1}, a_{j_1}), (a_{i_2}, a_{j_2}), \dots, (a_{i_k}, a_{j_k})\}$ , 每队组合满足请求信道数之和等于  $N$ , 即  $s(a_{i_t}) + s(a_{j_t}) = N$  ( $1 \leq t \leq k$ ), 且  $s(a_{i_t}) \geq s(a_{j_t})$ 。不妨设  $s(a_{i_1}) \geq s(a_{i_2}) \geq \dots \geq s(a_{i_k})$ , 则  $s(a_{j_1}) \leq s(a_{j_2}) \leq \dots \leq s(a_{j_k})$  也成立, 除了这  $k$  对组合之外,  $n$  个请求中的其他请求都不可能与剩下的任何一个请求组合起来等于  $N$ 。

**定理 1** FFD 或者 BFD 算法都是按照非递增的顺序进行请求的分配, 假设  $a_i$  被分配到了载频  $M_i$  中, 如果  $a_i$  是上述  $k$  对组合的成员, 不妨设  $a_i \in \{a_{i_1}, a_{i_2}, \dots, a_{i_k}\}$ , 则与其组合在一起的对应业务必然也会被分配在载频  $M_i$  中。

证明: 按照上面推论中的假设,  $a_i$  被分配到了载频  $M_i$  中, 且  $a_i$  属于  $K$  对组合中的成员, 不妨设与业务  $a_i$  组合的那个请求为  $a_j$ , 则  $s(a_i) + s(a_j) = N$ , 且  $s(a_i) \geq s(a_j)$ 。知道所有的请求按照非递增的顺序进行分配, 已知  $a_i$  被分配到了载频  $M_i$  中, 则在  $a_i$  前面分配的那些业务, 由于它们任何两个组合起来请求的信道总数是大于  $N$  的, 因此每一个业务都会分配一个新的载波,  $a_i$  业务同样如此, 故  $t = i$ , 即载波  $M_i$  就是第  $i$  个载波  $M_i$ 。对于业务请求  $a_i$  与业务请求  $a_j$  之间的任何一个业务  $a_k$ ,  $s(a_k) \geq s(a_j)$ , 所以  $s(a_k) + s(a_i) > N$ 。根据 FFD 或者 BFD 的算法分配原理, 可以知道  $a_k$  是不可能被分配到  $a_i$  所在的载波  $M_i$  中的, 当分配到  $a_j$  时, 由于  $M_i$  前面的载波所剩余的空间都小于  $s(a_j)$ , 因此  $a_i$  所在的载波  $M_i$  是第一个能满足  $a_j$  的载波, 且在所有满足的载波中它是剩余空间最小的, 这样不管对于 FFD 还是 BFD,  $a_j$  都会被分配到载波  $M_i$  中, 并且刚好完全利用载频  $M_i$ , 定理得证。

对于 FFD 和 BFD, 如果  $n$  个业务中的任何一个不属于  $k$  对组合中的业务被分配到某一个载频中, 除非是有多余 2 个以上的业务申请信道数组合在一起刚好等于  $N$ , 否则该条载频必然会有信道碎片存在。信道总载频数目为  $M$  个, 对于前面  $k$  对组合  $L_k$ , 根据载频数目大小的不同, FFD、BFD 和 C-BFD 算法的分配结果也就不同。由于根据前面的推论, 我们得知基于 FFD 和 BFD 算法在组合上面的结论是一样的, 故后面将其放在一起来说。我们只需要考虑  $k$  对组合中对应下标  $i_1, i_k$  和  $M$  的大小关系:

1) 如果  $M < i_1$

FFD 或 BFD: 前面  $k$  对组合中的任何一对都不可能分配到载波中, 全都被阻塞。因为  $a_{i_1}$  的前面有多于  $M$  个业务存在, 则根据算法原理, 会优先分配这些业务, 前面任何一个业务分配时都会启用一条新的载频, 且剩余空间都会小于  $s(a_{i_k})$ , 故  $k$  对组合中的业务全都会被拒绝; 同时根据前面的分析,  $M$  条载波很可能每一条都会有信道碎片存在而不能被利用。

C-BFD: 如果  $k < M$ , 则所有的  $k$  对都会分别被分配到  $k$  条载频中, 且这  $k$  条载频没有信道碎片; 如果  $k > M$ , 则  $k$  对中将会有一对  $M$  对被分配到  $M$  条载频中。

2) 如果  $i_1 \leq M < i_k$

FFD 或 BFD: 则在  $k$  对组合中必然存在两个值的大小介于  $M$  之间, 不妨将其设为  $i_p$  和  $i_q$ , 则有  $i_p \leq M < i_q$  成立, 则这  $k$  对组合中, 将会有一对  $p$  对被分配到信道中, 而剩下的将被

阻塞。从而会有  $M - p$  个载频有信道时隙存在。

C-BFD: 如果  $k < M$ , 则  $k$  对都会分别被分配到  $k$  条载频中; 如果  $k > M$ , 则将会有一对  $M$  对被分配到  $M$  条载频中。

3) 如果  $M > i_k$

FFD 或 BFD: 则所有的  $k$  对组合都将被分配到  $M$  条载频中。

C-BFD: 同样  $k$  对组合都将被分配到  $M$  条载频中。

综合上面的分析, 只有第 3 种情况下 3 种算法对于这种组合的分配处理是一样的, 但是在现实分配中, 由于载频资源有限,  $M$  的值也会较小, 同时用户的请求会较大, FFD 和 BFD 算法分配较大程度上会有信道碎片存在, 并且当不属于组合里面的较大的信道请求的业务被分配时, 该条载频剩余空间较小, 这样较大程度上将不能容纳其他的业务进来; 而对于 C-BFD, 将优先分配组合, 这样将最大限度地利用信道资源, 同时也降低了阻塞率。

## 4 仿真与分析

实验采用 Qualnet 仿真软件<sup>[10]</sup> 搭建仿真平台, 对 MF-TDMA 系统信道分配过程进行仿真, 并对算法的系统资源利用率及阻塞率进行验证。

### 4.1 仿真平台搭建

在 QualNet 中完成仿真场景的搭建, 由信关站、移动终端、GEO 卫星 3 类节点组成。移动终端通过 GEO 的转发完成与信关站的 ATTACH 过程及后续的数据传输。

移动终端通过随机接入信道向信关站申请信道资源, 然后在相应的接入许可信道等待突发分配消息。信关站中的 MAC (Medium Access Control) 层信道管理模块完成突发分配任务, 将突发分配相关地址信息传送给移动终端。部分场景界面如图 3 所示。

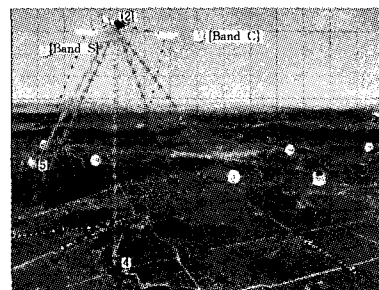


图 3 Qualnet 仿真场景界面

仿真系统中, 考虑一个点波束范围, 该点波束分配有 500kHz 的带宽, 其中每 25kHz 为一个基本载波, 故该点波束内共有 20 个基本载波。每一个载波内共有 24 条可用时隙信道。连接申请的到达符合泊松分布, 每超帧时间内的到达量为统计变量; 每个连接的持续时间满足持续时间为中心的高斯分布; 每一个连接在一个超帧时间内申请的信道时隙数符合  $[1, 24]$  的均匀分布。

### 4.2 仿真结果

(1) 系统资源利用率

如图 4 所示, 随着业务申请数的增加, 系统资源利用率都不断提高, 当业务申请数不到 45 时, 实验数据显示  $M > i_k$  成立, 符合理论分析中的第 3 种情况, 故 3 种算法相差不大; 但当申请数超过 45 后, 实验数据显示  $M \leq i_k$  成立, 业务申请数

据符合前两种情况,相比于其他几种算法,C-BFD算法较大程度地减少了时隙碎片的产生。

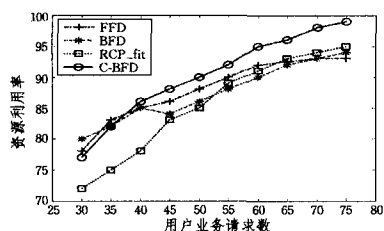


图4 系统资源利用率和业务请求数的关系

### (2) 申请阻塞率

申请阻塞率可以表示为  $N_{rej}/N_{req}$ ,  $N_{rej}$  为系统拒绝掉的业务申请数,  $N_{req}$  为总共收到的业务申请数。如图5所示,随着用户业务申请到达数的不断增加,申请阻塞率都呈现增长的趋势。由于C-BFD算法采取对业务进行组合并优先分配,最大限度地减少时隙碎片的产生,从而降低了因时隙碎片而导致的业务请求阻塞,故C-BFD算法要明显优于其他算法。

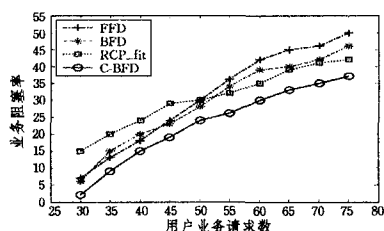


图5 业务阻塞率和业务请求数的关系

### (3) 空闲信道数

如图6所示,随着业务申请数量的增加,空闲信道数也会减少,但是不同的分配算法在时隙碎片上面的性能不一样,明显可以看出C-BFD算法在减少时隙碎片方面有更好的表现。

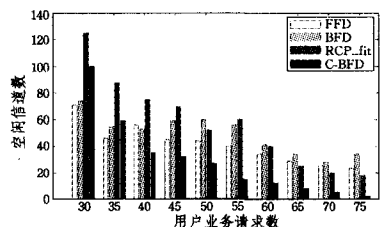


图6 信道碎片和业务请求数的关系

**结束语** 根据 GEO 卫星通信系统中 MF-TDMA 信道结构以及分配约束,针对现有信道分配算法在时隙碎片方面的不足,在一维装箱算法基础上提出了基于优先组合的 C-BFD 方法,并给出了理论分析。仿真结果显示,相比于传统算法,该算法提高了系统资源利用率,降低了业务阻塞率以及信道空闲数。

## 参考文献

- [1] 叶晓国,肖甫,孙力娟,等. 卫星移动通信网络切换算法的研究[J]. 计算机科学,2009,36(9):79-82
- [2] 郭庆,王振永,顾学迈. 卫星通信系统[M]. 北京:电子工业出版社,2010:15-16
- [3] European Telecommunications Standards Institute. GMPRS-101. 201v2. 2. 1General Packet Radio Service; Introduction to the GMR-1 Family [EB/OL]. [http://pda.etsi.org/exchange-folder/ts\\_1013760102v020201p.pdf](http://pda.etsi.org/exchange-folder/ts_1013760102v020201p.pdf),2005-01-02
- [4] European Telecommunications Standards Institute. GMPRS-101. 201v2. 2. 1General Packet Radio Service; Radio interface physical layer specifications [EB/OL]. [http://pda.etsi.org/exchangefolder/ts\\_101376-55v02\\_0201p.pdf](http://pda.etsi.org/exchangefolder/ts_101376-55v02_0201p.pdf),2005-03
- [5] 许楠,郝学坤,许众. MF-TDMA 卫星通信系统信道分配时间优化方法[J]. 无线电通信技术,2012,38(2)
- [6] Park J-M, Savagaonkar U R, Chong E, 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
- [7] 董启甲,张军,张涛,等. 高效 MF-TDMA 系统时隙分配策略[J]. 航空学报,2009,30(9):1718-1726
- [8] 余国松. 与装箱相关的几类问题[D]. 杭州:浙江大学,2009
- [9] Park J-M, Savagaonkar U R, Chong E, 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
- [10] Scalable Network Technologies, Inc. QualNet 4.0 Programmers Guide[M]. Los Angeles, USA, 2007:1-5

(上接第27页)

- [6] Murillo A C, Guerrero J J, Sagues C. Surf features for efficient robot localization with omnidirectional images [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, Roma, Italy, 2007:3901-3907
- [7] Arturo G, Oscar M, Monica B, et al. A comparative evaluation of interest point detectors and local descriptors for visual SLAM [J]. Machine Vision and Application, 2010, 21(6):905-920
- [8] Valgren C, Lilienthal A. SIFT SURF and Seasons: Longterm outdoor Localization Using Local Features[C]//Proc of the 3rd European Conf on Mobile Robots. Germany, 2007:253-260
- [9] 李慧, 高启忠, 刘庆杰. 基于 FAST 和 SURF 的遥感影像自动配

准方法[J]. 国土资源遥感, 2012, 2(6):28-34

- [10] 杜振鹏,李德华. 基于 KD-Tree 搜索和 SURF 特征的图像匹配算法研究[J]. 计算机与数字工程, 2012, 40(2):96-98
- [11] Cornelis N, Gool V L. Fast Scale Invariant Feature Detection and Matching on Programmable Graphics Hardware[C]//Computer Vision and Pattern Recognition Workshops 2008. AK, 2008:1-8
- [12] Randima F. GPU Gems; programming techniques, tips and tricks for real-time graphics[M]. Addison-Wesley Professional, 2006
- [13] GPGPU. General-purpose computation on GPUs[OL]. <http://www.gpgpu.org>,2010-07-04
- [14] 钱悦. 图形处理器 CUDA 编程模型的应用研究[J]. 计算机与数字工程, 2008, 36(12):177-180