

GEO 移动通信系统中 MF-TDMA 突发分配算法研究*

曾显华, 陈建州, 刘立祥

(中国科学院软件研究所 天基综合信息系统重点实验室, 北京 100190)

摘要: 针对 GEO 移动无线分组业务 GMPRS 协议中 MF-TDMA 突发分配问题, 提出了一种基于平衡树结构的分配算法 BTP。该算法依次分割分配空间, 每次分配具有最小代价值的突发块, 并且为了加快分配空间的搜索, 对表示布局空间的二叉树进行平衡优化, 保证了突发分配的实时性及系统资源利用率。仿真结果表明, 该算法能在规定的时间内完成突发分配任务, 并且在高负载下的时隙带宽利用率达到 95% 以上, 满足了 GMPRS 标准对信道分配的要求。

关键词: 地球同步轨道卫星无线分组业务协议; 多频时分多址; 突发分配; 平衡树

中图分类号: TP393.04 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2013)12-3708-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.12.049

MF-TDMA burst allocation algorithm in GEO telecommunication system

ZENG Xian-hua, CHEN Jian-zhou, LIU Li-xiang

(Science & Technology on Integrated Information System Laboratory, Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Based on a balanced tree structure, this paper proposed an MF-TDMA burst allocation algorithm BTP (balanced tree packing) for GEO telecommunication system. The algorithm recursively divided the allocated space with a binary tree structure, choosing the burst with the lowest cost each time. Meanwhile, it adopted a rotation operation to keep the tree balanced, guaranteeing the searching efficiency and resource utilization. Simulation results show that burst allocation can be finished within a predetermined time and that the resource utilization is above 95% under high traffic load, which satisfy the requirements of GMPRS standard.

Key words: GMPRS; MF-TDMA; burst allocation; balanced tree

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^[1]。GEO (geosynchronous orbit) 系统星地位置相对静止、波束覆盖面积大, 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^[2], 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 卫星无线分组业务协议 (GEO-mobile packet radio service, GMPRS), 其重点是卫星通信系统的数据传输提供一套标准协议^[3]。

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^[4]。GMPRS 标准中只简单介绍了固定分配及动态分配两种信道分配方式, 未提供其具体实现。针对 MF-TDMA 信道分配问题, 文献^[5]提出了一种 RCP-fit 分配算法, 能有效地减少信道的时隙碎片。在此基础上, 文献^[6]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, 能有效降低时隙碎片对系统资源利用率的影响。但它们都是基于在一个载波内分配时隙, 未实现跨载波分配。文献^[7, 8]提出了跨频信道分配方式, 但其未遵循 GMPRS 中规定的分配给突发的时隙必须连续的原则。

针对 GMPRS 中信道特点以及现有算法的不足, 本文提出

了一种基于平衡二叉树信道分配模型。

1 GMPRS 中的信道结构

在 GMPRS 中, 工作的上行频段为 1626.5 MHz ~ 1660.5 MHz, 下行频段为 1525.0 MHz ~ 1559.0 MHz。34 MHz 的频段划分为 1087 个频点, 每个频点的带宽为 31.25 kHz^[9]。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。对于高速终端, 可以同时占用多个频点。多个连续的时隙和频点可以组成一个突发, 用户可在所接收到的信道分配信息中得到帧中发送数据的突发位置。

在单波束内的一个帧中, 系统的信道资源是一定的。在进行信道分配前, 需计算出终端请求所需的突发大小: 首先基于马尔可夫模型预测比特误码率; 然后通过比特误码率来选择调制方式; 最后根据调制方式和数据传输速率, 查询突发表获得突发的大小, 即所需的带宽及时隙数^[5]。具体如图 1 所示。

在 GMPRS 中, 突发可表示为 burst (b, t), ($b, t \in N$), 带宽为 $b \times 31.25$ kHz, t 为连续的时隙个数^[10]。GMPRS 分组业务的时隙分配周期为一帧, 信道结构采用 FDMA (frequency division multiple access) 与 TDMA (time division multiple address) 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)。因此, 突发分

收稿日期: 2013-03-13; 修回日期: 2013-04-19 **基金项目:** 国家共性软件预研基金资助项目 (6150103)

作者简介: 曾显华 (1987-), 男, 湖南邵阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为网络协议设计 (x_h_zeng@126.com); 陈建州 (1986-), 男, 江苏南京人, 博士研究生, 主要研究方向为组网与通信; 刘立祥 (1973-), 男, 安徽合肥人, 研究员, 博士, 主要研究方向为卫星组网。

配问题可以描述为:在一定约束条件下,针对某业务突发数目的需求,如何从上述矩阵中的空闲区域寻找最优位置的问题。GMPRS 的突发分配问题的约束条件主要有:a)在频率与时隙上,突发连续不可分割;b)不同连接的突发不能重叠。例如,计算出来的突发为 $burst_1(2,6)$ 、 $burst_2(4,2)$ 。一种满足以上约束条件的突发分配如图 2 所示。



图 1 确定突发流程

2 基于平衡树的突发分配 BTP

在突发分配过程中需解决两个基本问题:突发排序问题,如何确定突发请求分配的的顺序;单突发分配问题,如何快速查找特定的突发可分配空间。本文将采用二叉树结构表示分配空间布局,并且为了加快分配空间的搜索,将对该结构进行平衡优化。

2.1 突发排序规则

突发的排序规则被用来决定待分配突发的顺序,它直接影响到分配算法的运行结果。在 GMPRS 中,排序规则有以下三种:a)按突发块的面积递减排序;b)按突发块所占用的时隙数和带宽两者之间较大的边递减排序;c)按突发块所占用的时隙数和带宽两者之间较小的边递减排序。

比较以上三种排序规则可以发现:若赋予面积较大的突发块较大的优先级,细长的突发块在分配过程中容易被忽略。规则 b) 优先考虑的是占用时隙或带宽多的突发块,规则 c) 则考虑占用时隙数和带宽接近的突发块。因此,为了适应布局空间的动态变化,本文采用代价函数作为未分配突发的排序规则,代价值最小的突发最先被考虑,参考最大梯度法^[10],代价函数具体定义如下:

$$O = S + P - F \quad (1)$$

其中: P 是突发块的面积; S 是总的分配空间的面积; F 是突发分配的可行区域:

$$F = (A - a)(B - b) + (A - b)(B - a) \quad (2)$$

其中: A 、 B 是 S 的边长; a 、 b 为突发块的边长。通过选定该排序规则(记为 BurstPacking),突发块的放入顺序是不断变化的,这样保证了每次选取分配的突发都是针对当前布局空间最优的。

2.2 基于二叉树的单突发分配

根据排序规则,选取一个相对于布局空间最优的突发后,进入单突发分配流程。用空间四元组 $d_i = (b_i, t_i, x_i, y_i)$ 表示第 i 个已分配的突发,其中, b_i 为突发的带宽, t_i 为突发的时隙数目, x_i 为分配起始时隙号, y_i 为分配起始带宽。当需分配第 j 个突发时($j > i$),此时布局空间可表示为 $D = \{d_1, d_2, \dots, d_{j-1}, D_j\}$ 。其中, D_j 表示总可用空间,且 $d_i \cap d_k = \emptyset (i, k < j)$ 。若成功分配突发 j ,此时布局空间变为 $D = \{d_1, d_2, \dots, d_{j-1}, d_j, D_j'\}$ 。

在分配中对突发块采取布局紧凑的策略,即存在已分配突发序列 $\{d_1, d_2, \dots, d_m\} (n \geq 0)$,使得 $d_i (0 < i \leq n)$ 与 d_j 相邻。在突发 i 分配后,若对其 D_j 沿 d_i 的水平和垂直线进行划分。定义关系 $H, \langle d_m, d_n \rangle \in H (m < n)$ 表示第 n 个突发分配在由第

m 个突发分配后划分的分配空间中,则对于 d_j ,存在唯一的 d_i ,使得 $\langle d_i, d_j \rangle \in H (i < j)$,这类类似于二叉树中的前驱关系。因此,可用二叉树表示总的布局空间,将分配空间映射到树的叶子节点,划分状态映射到树的内部节点,划分线表示关系 H ,突发分配在叶子节点中。对于第 j 个分配的突发 $burst_j$,从根节点 root 开始查找其分配空间。单突发分配算法记为 BurstPacking($root, burst_j$),具体流程如下:

a) 节点不为叶子节点,否则进入步骤 b)。先在左子树中查找,若不存在可分配空间,则转到右子树中查找。当左右子树都不存在可分配空间时,进入步骤 d)。

b) 判断空间是否能容纳突发,如果不能,返回,进入步骤 a);否则,得到可分配空间节点 leaf。

c) 根据可分配空间与突发的大小对其分割,突发的分配位置可由存储在 leaf 中的信息得到。

d) 当没有可分配空间时,返回拒绝信息。若成功找到可分配空间,则返回突发分配的位置信息。算法结束。

在步骤 c) 中,对可分配空间的分割规则为:设节点 leaf 带宽为 H ,时隙数为 W ,突发的带宽为 h ,时隙数为 w ,将突发填充在可分配空间的左下角,如图 3(a) 所示,将原来的空间划分为三个子空间,分别为突发填充的区域 A_0 、空间 A_1 和 A_2 ,同时生成分别代表 A_1 和 A_2 新的叶子节点 $leaf_1$ 和 $leaf_2$,新的布局空间 dw 与 dh 的大小有关,当 $dw > dh$ 时,布局如图 3(b) 所示,当 $dw < dh$ 时,布局如图 3(c) 所示。

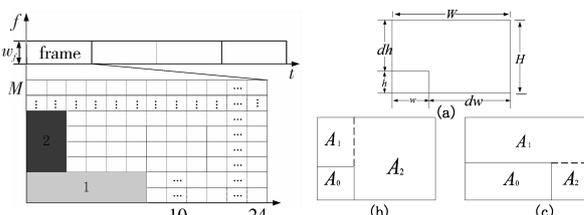


图 3 突发分配过程中的可行解空间变化

图 2 突发布局示意图

例如,依次分配突发 $burst_1(2,6)$ 、 $burst_2(4,2)$,算法执行过程如下:

分配 $burst_1$,根据分配规则,选择区域 1。区域 1 填充后,产生新的可分配空间 A_r 和 B_r ,布局空间及对应的二叉树如图 4 所示。图 4(b) 中,叶子节点用方框表示,突发分配在用颜色填充的叶子节点中。

接着对 $burst_2$ 进行分配,算法首先沿着路径 $A \rightarrow B \rightarrow B_r$ 找到叶子节点,但空间 B_r 太小,容纳不下突发。退回根节点后,沿着路径 $A \rightarrow A_r$ 找到空间 A_r ,此时突发能填充在 A_r 中,根据算法将 A_r 进行分割,并产生新的可分配空间。在分配第二个突发块之后,布局空间及对应的树结构如图 5 所示。

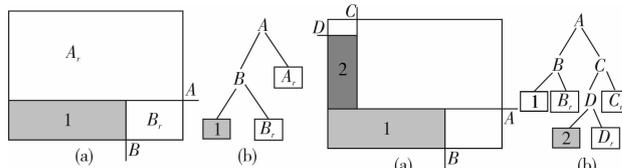


图 4 分配突发 $burst_1$ 后的空间布局及树的结构

图 5 分配突发 $burst_2$ 后的空间布局及树的结构

2.3 树的平衡化

在进行突发分配的过程中,可能会出现树往一边生长的情况,这时查找新的分配空间速率受到影响。为了保证树的查找

性能,在进行突发分配时,对树的结构进行调整,使其满足平衡二叉树的性质,即任何节点的左右子树深度之差的绝对值不超过1。当树不满足平衡条件时,可通过单向或双向旋转操作使树保持平衡条件。具体分以下两种情况:

a) 当树出现左左情况(右右情况)时,通过对相应节点进行右旋(左旋)操作,使树保持平衡,具体如图6所示。

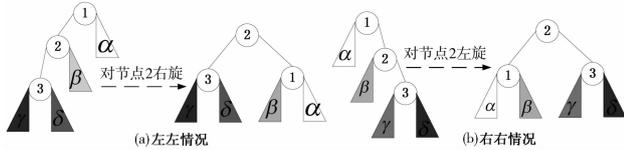


图6 单向旋转操作

b) 当树出现左右情况(右左情况)时,通过对对应的区域进行先左后右(先右后左)旋转操作,使树平衡,如图7所示。

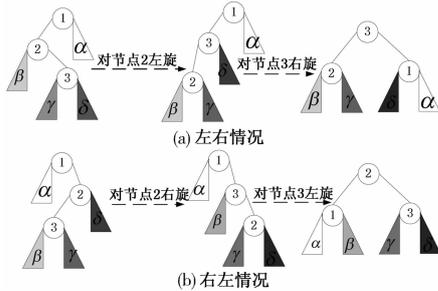


图7 双向旋转操作

通过平衡化操作,在平衡树上进行查找突发分配区域的复杂度为 $O(\log n)$,有效保证了可分配区域的查找效率。

至此,BTP算法描述完毕,算法流程如算法1所示。

算法1 突发分配算法

```

Algorithm: BTP(burst1, burst2, ...)
1  产生根节点 root
2  while 还有待分配的突发
3  从待分配的突发序列中根据代价规则 BurstRanking 选择当前最优的突发 burst
4  result = BurstPacking( root, burst)
5  if 分配成功 then
6  在用户终端的信道分配消息中填充位置信息,若树不满足平衡条件,对树进行平衡化操作
7  else
8  返回突发拒绝信息
9  从突发序列中删除该突发
10 end while
    
```

2.4 算法的复杂度分析

2.4.1 算法的时间复杂度

对于每个突发资源块的定位都需要一个查找过程,一次查找需要花费的时间与当前分配空间相关。设 M 为矩形的总面积, m 为最小突发的面积,由于采用的平衡二叉树结构,一次查找时间不会超过 $\log(\lceil 2M/m \rceil)$ 。

另外,树的平衡化操作平摊的复杂度为 $O(1)$,故在最坏情况下,突发分配的复杂度小于 $O(N \log(M/m))$ (N 为待分配突发的个数),其复杂度接近一次排序的过程。

2.4.2 存储结构

在管理频率时隙资源时,可以通过维护一个载波/时隙占用表和用户信息结构来实现。载波/时隙表中每一个比特表示时隙的占用情况。载波/时隙表不保存载波/时隙为哪个用户占用,具体的占用情况保存在用户信息结构中,采用位图与索引结合的方式加快查找速度。

3 性能评估

仿真实验采用 QualNet 仿真软件^[11]对 GMPRS 中的分组业务流程进行仿真,并对算法的运行时间、系统的资源利用率及拒绝率进行验证。

3.1 仿真场景的搭建

在 QualNet 中完成仿真场景的搭建,由 GSS(gateway station subsystem)、MES(mobile earth station)、GEO 卫星三类节点组成。MES 在移动过程中通过 GEO 的转发完成与 GSS 的 ATTACH 过程及后续的数据传输。

MES 通过随机接入信道向 GSS 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。GSS 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 MES 端。部分场景界面如图8所示。

3.2 实验结果

在系统中,突发的种类共有四种,如表1所示(b 为突发频带宽度,单位为 31.25 kHz, t 为时隙数目)。

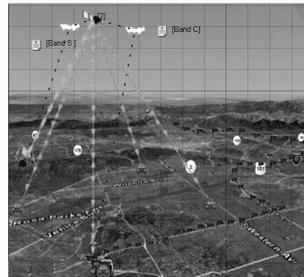


表1 分组业务突发

	burst ₁	burst ₂	burst ₃	burst ₄
b	4	5	1	2
t	3	3	6	6

图8 QualNet 仿真场景界面

下面的这些参数反映了系统的运行情况。

a) 系统的利用率。其反映了突发的分配状况,利用率高,表示时隙带宽资源被合理利用。系统资源的利用率定义为

$$\rho = \frac{\sum b_i t_i}{BT}$$

其中: b_i 、 t_i 为成功分配的每个突发的带宽和时隙数; B 、 T 分别为系统总的带宽及时隙数目。

b) 拒绝率。作为算法性能的一个考核方面,它是衡量算法可行性的一个参考参数。拒绝率定义为

$$\eta = \frac{n}{N}$$

其中: n 表示分配失败的突发个数, N 表示总的突发个数。

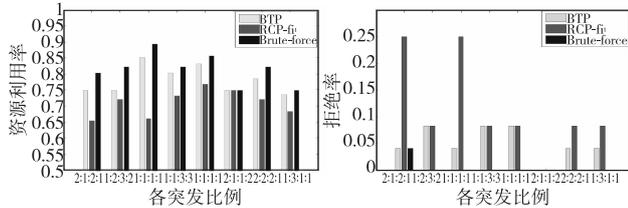
实验分别测试系统在低负载和高负载下的算法运行时间、资源利用率及拒绝率。系统在场景1下,波束中共有24个MES,场景2下,波束中共有48个MES。系统的突发请求种类按照一定的比例通过随机函数产生。

在表2中, MES 的数目用 M 表示,一帧中总的时隙数用 W 表示,总的带宽用 H 表示。实验中,对 RCP-fit 算法的输入进行了处理:将突发块转换为等面积的时隙块。Brute Force 算法通过穷举解空间能得到最优值。从表2中可以看出,由于 BTP 算法在进行突发分配的过程中保持了树的平衡性,能快速定位突发的分配位置,在时间方面优于 RCP-fit 及暴力算法。

表2 BTP 与 RCP-fit、暴力算法运行时间比较

场景	M	W	H	BTP time/s	RCP-fit time/s	Brute Force time/s
1	24	24	14	0.005 3	0.013 7	15.362 5
2	48	24	14	0.019 8	0.045 6	350.878 3

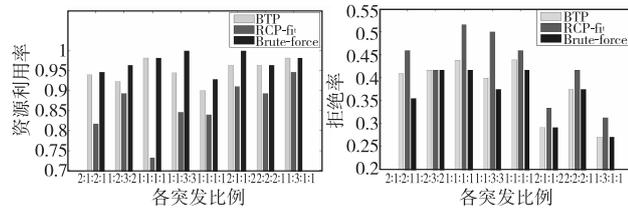
场景 1 下的系统利用率如图 9(a) 所示。图中的横坐标表示在实验中设定的各种突发的比例。图 9(a) 中,系统利用率方面,BTP 算法接近暴力算法得到的最优值,且优于 RCP-fit 算法。场景 1 下的拒绝率如图 9(b) 所示。由于突发分配时的碎片影响,BTP 的拒绝率与理论最优值存在一定的差异。



(a) 不同突发比例下各算法的资源利用率 (b) 不同突发比例下各算法的拒绝率

图 9 场景 1 中的系统利用率与拒绝率

算法在场景 2 下的运行结果如图 10 所示。图 10(a) 中,在高负载下,BTP 算法的系统利用率逼近最优值,平均值接近 95%;图 10(b) 中,系统的总资源是一定的,当 MES 请求的资源远远超出系统总资源时,拒绝率接近 37%。



(a) 不同突发比例下各算法的资源利用率 (b) 不同突发比例下各算法的拒绝率

图 10 场景 2 中的系统利用率与拒绝率

4 结束语

本文为了改善 GPRS 协议 MAC 层中的 MF-TDMA 突发分配算法的性能,提出了一种基于平衡树的分配算法 BTP。该算法将带宽时隙资源空间进行分割,每次分配当前满足条件最优的突发,在构造表示可分配空间的二叉树中进行平衡化操作。该算法简化了突发分配问题,有效保证了突发分配的实时性及系统资源的高利用率。仿真结果表明,该算法能在规定时间内完成突发分配任务,在高负载下,系统的资源利用率达到

95%,接近理论最优值,有效地满足了 GPRS 标准对信道分配的实时性与资源利用率的要求。

参考文献:

- [1] IPPOLITO L J. Satellite communications system engineering [M]. New Jersey: John Wiley & Sons Ltd, 2008:200-202.
- [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. GPRS- 101. 201v2. 2. 1 general packet radio service; introduction to the GMR-1 family [EB/OL]. (2005-01-02). http://pda.etsi.org/exchange-folder/ts_1013760102v020201p.pdf.
- [4] European Telecommunications Standards Institute. GPRS- 101. 201v2. 2. 1 general packet radio service; radio interface physical layer specifications [EB/OL]. (2005-03). http://pda.etsi.org/exchange-folder/ts_101376-55v02_0201p.pdf.
- [5] 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 Trans on Vehicular Technology, 2005, 54(1): 177-190.
- [6] 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.
- [7] YAZDANI N. Multi-frequency time-division multiple-access (MF-TDMA) resource packing [C]//Proc of Military Communications Conference. 2008:1-8.
- [8] LEE M, LEE J J, KIM J B, et al. Adaptive packing strategy to reduce packing loss in MF-TDMA satellite networks [C]//Proc of International Conference on Computational Science and Its Applications. Berlin: Springer, 2011: 133-146.
- [9] European Telecommunications Standards Institute. GPRS-101. 201 v2. 2. 1 general packet radio service; overall description of the GPRS radio interface [EB/OL]. (2005-03). http://pda.etsi.org/exchange-folder/ts_1013760322v020201p.pdf.
- [10] 傅英定,成孝予,唐应辉. 最优化理论与方法[M]. 北京:国防工业出版社, 2008: 150-155.
- [11] Scalable Network Technologies, Inc. QualNet 4.0 programmer's guide [M]. [S. l.]: Scalable Network Technologies, 2007: 1-5.

(上接第 3704 页)

3 结束语

本文深入分析研究无线网络中基于机会网络编码(ONC)的实时视频传输性能,设计了两组实验,通过 NS-2 仿真软件对这两组实验进行仿真,在接收端对视频数据进行恢复,将得到的重构图像与原始图像进行对比分析;比较分析了各种情况下的解码率、丢包率,并找出解码帧率下降的原因;分析了三种视频帧丢失的影响大小,以及这三种视频帧的重要性,为下一步提高视频传输质量的研究工作奠定了基础。

参考文献:

- [1] 沈航,白光伟,赵露,等. 多跳无线网络中具有时间意识的视频流控制协议[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2012, 42(5): 808-813.
- [2] BAI G, OLADOSU K, WILLIAMSON C. Performance benchmarking of wireless Web servers[J]. Ad Hoc Networks, 2007, 5(3): 392-

412.

- [3] BAI G, TAO J, SHEN H. A link-lifetime based dynamic source routing protocol (LTDSR) for multimedia over MANETs[J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2010, 33(5): 761-768.
- [4] AHLWEDE R, CAI N, LI S R, et al. Network information flow [J]. IEEE Trans on Information Theory, 2000, 46(4): 1204-1206.
- [5] KATTI S, RAHUL H, HU W, et al. XORs in the air: practical wireless network coding[J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 2008, 16(3): 497-510.
- [6] ZHANG J, CHEN Y P, MARSIC I. MAC-layer pro-active mixing for network coding in multi-hop wireless networks[J]. Computer Networks, 2010, 54(2): 196-207.
- [7] 王明伟,王奇,杨洁,等. 视频流传输性能的研究与分析[J]. 电视技术, 2010, 34(12): 30-33.
- [8] 杨嘉琛,侯春萍. 基于 PSNR 立体图像质量客观评价方法[J]. 天津大学学报:自然科学版, 2008, 41(12): 1448-1452.