

数据广播调度自适应信道划分与分配方法*

胡文斌, 邱振宇, 聂聪, 王欢, 严丽平, 杜博

(武汉大学 计算机学院, 湖北 武汉 430072)

通讯作者: 胡文斌, E-mail: hwb@whu.edu.cn



摘要: 随着移动网络的不断发展,移动终端设备的计算能力与日俱增,越来越多的用户倾向于通过移动网络获取信息资源,这使得实时按需数据广播面临新的挑战:(1) 数据内容和规模的多样化;(2) 用户请求的实时性与需求多样性使得热点数据增加,直接导致广播数据总量的剧增;(3) 用户对服务质量和水平的要求越来越高.当前的研究成果主要集中在固定信道模型和算法上,一定程度上忽略了当前数据广播调度环境的变化.固定信道存在如下问题:(1) 局限于特定的网络,缺乏通用性;(2) 信道大小、个数不能随着网络环境的变化而自动调整,降低了广播效率.基于以上考虑,对实时按需数据广播调度的自适应信道划分和分配进行研究,提出一种自适应信道划分与分配方法 OCSM(optimized channel split method),其根据数据请求特征的不同,实时自适应地调整信道个数和大小,从而提高系统敏感性、鲁棒性以及广播效率.该方法包括:(1) 广播数据均衡聚类算法 WASC(weight average and size cluster algorithm),其挖掘数据特征,为信道划分提供依据;(2) 数据项广播优先级评定算法 $R \times W/SL$,其实时评定数据项调度优先级;(3) 信道划分与分配算法 CSA(channel split algorithm).实验包括两个方面:(1) 确定不同数据项大小和请求截止期分布下的信道划分策略,并分析聚类算法中聚类距离 K 在不同情况下的最佳取值以及最佳信道划分;(2) 验证自适应信道划分与分配策略的有效性,并通过对比实验验证在不同情况下 OCSM 的有效性.实验结果表明: OCSM 优于其他调度算法,并具有较强的自适应.

关键词: 数据广播调度;自适应信道划分;失效率;均衡聚类;实时按需

中图法分类号: TP393

中文引用格式: 胡文斌,邱振宇,聂聪,王欢,严丽平,杜博.数据广播调度自适应信道划分与分配方法.软件学报,2018,29(9): 2844-2860. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/5277.htm>

英文引用格式: Hu WB, Qiu ZY, Nie C, Wang H, Yan LP, Du B. Channel split and allocation method for data broadcast scheduling. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2018,29(9):2844-2860 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/5277.htm>

Channel Split and Allocation Method for Data Broadcast Scheduling

HU Wen-Bin, QIU Zhen-Yu, NIE Cong, WANG Huan, YAN Li-Ping, DU Bo

(Computer School, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: With the rapid development of mobile networks and a great increase in the computing ability of mobile devices, a huge number of people tend to obtain information through mobile networks, which poses some new challenges for real-time on-demand data broadcasting: (1) The data types and sizes are diverse; (2) The real-time characteristics and demand diversity of the user requests greatly increase the volume of hot-spot data (the most access data) and the volume of broadcast data; (3) The users' demands for high service

* 基金项目: 国家自然科学基金(61572369, 61711530238); 湖北省自然科学基金(2015CFB423); 武汉市重大科技计划(2015 010101010023)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61572369, 61711530238); Hubei Province Natural Science Foundation (2015CFB423); Wuhan Major Science and Technology Program (2015010101010023)

收稿时间: 2016-04-13; 修改时间: 2016-09-01; 采用时间: 2017-03-07; jos 在线出版时间: 2017-03-31

CNKI 网络优先出版: 2017-03-31 21:54:55, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2560.TP.20170331.2154.010.html>

quality become stronger. Current research has been focusing on the fixed-channel models and algorithms and ignoring the changes of real-time data broadcast environments. The problems of fixed-channel models are as follows: (1) They are limited to specific network with fixed channel-models which lack generality; (2) The size and number of channels cannot be adjusted with the changing of broadcast environments automatically. This paper studies the possibility of an automatic channel split and allocation method that can adapt to the environment, and proposes an optimized channel split method (OCSM), which can adjust the bandwidth and number of broadcast channels to the different characteristics of real-time requests. The method includes the following algorithms: (1) A weight average and size cluster algorithm (WASC) for data characteristics mining; (2) A weight evaluating algorithm ($R \times W/SL$) for evaluating the priority of data item; (3) A channel split algorithm (CSA) for channel split. The experiments undertaken in this study include two aspects: (1) Determining the different strategies under different data size distributions and deadline distributions; (2) Verifying the validity of OCSM by validating the effectiveness in different situations through a series of experiments. The results reveal that significantly better performance can be obtained by using the OCSM rather than other state-of-the-art scheduling algorithms.

Key words: data broadcast scheduling; adaptive channel split; loss rate; balance clustering; on-demand

由于移动网络技术和数据广播支持大量用户同时访问热点数据,实时按需数据广播被广泛应用于热点数据的传播中,如股票信息传送、交通信息发布^[1]等实时系统.数据广播包括静态周期广播和按需广播两种方式.由于移动网络用户对信息服务质量要求的不断提高,实时按需数据广播调度成为当前研究的热点.时效性是按需数据广播调度的重要约束性条件^[2],设计高效的数据广播调度算法^[3,4],最大限度地满足用户请求,是按需数据广播研究的重中之重.

按需数据广播系统实时接收用户请求,利用相应的调度算法组织数据广播序列.按需数据广播调度具有按需性和实时性:按需性体现在每个周期所广播的数据由用户请求决定,实时性体现在用户请求的数据必须在截止期内得到满足.按需数据广播调度有效地降低用户请求的平均等待时间以及移动终端的调谐时间^[5],因而被广泛应用于动态、大规模数据的广播与传输中.一些文献研究了单一信道按需数据广播,提出了优秀的算法,如 $SIN-\alpha, R \times W$ 算法等,这些算法在降低系统请求失效率、平均等待时间、客户端调谐时间^[6]和终端能耗^[7]等方面都有出色表现.但随着移动网络技术的发展,用户需求的多样化使得对广播调度系统支持多数据项请求的需求不断提高,例如基于 XML 文档结构的数据请求等不断增加^[8],单一信道按需数据广播调度不能发挥多信道并行广播优势.针对这一问题,大量文献研究了固定多信道多数据项调度算法,并证明了固定多信道多数据项请求调度是 NP-hard 的问题,提出了大量的调度分配算法.如 TOSA 算法等都能很好地结合多信道并行广播的特点,提高数据广播调度的效率.但固定多信道广播调度算法只能针对特定需求的网络,不能适应多变的需求环境.

无论是单一信道广播还是固定多信道广播都无法自适应热点数据分散、热点变化快和数据特征差异性大的广播环境:首先,在移动网络中,基于结构的物理限制,例如客户端可能有不同的通信能力,制约了单一信道高速传输的可行性;其次,面向用户应用的需求,信道可合并或者协调可提供可变的的服务质量;同时,由于实时热点数据的分散,多信道广播相对于单一信道广播具有更高的时效性;最后,依据广播数据特征实时地调整广播信道,能够更好地适应多变的移动网络环境.因此,基于当前用户需求多变的现实以及上述算法存在的若干局限性,本文对自适应多信道广播调度进行了研究,提出了一种实时按需数据广播的自适应信道划分与分配方法 OCSM(optimized channel split method).

本文的主要研究工作包括如下几个方面.

- (1) 提出一种 $R \times W/SL$ 数据项优先级评定算法(其中, R 为数据请求数、 W 为请求最长等待时间、 SL 为系统即将失效数).该算法同时考虑数据请求数、数据请求最长等待时间和系统即将失效请求数这 3 个指标,通过准确评定单个数据项的紧急程度,为均衡聚类算法提供聚类指标;
- (2) 综合考虑数据项大小、信道大小和数据项紧急程度等因素,提出了广播数据项均衡聚类算法 WASC (weight average and size cluster algorithm),为自适应信道划分方法 OCSM 提供划分依据;
- (3) 提出算法 CSA(channel split algorithm),其根据 WASC 算法聚类结果将信道划分成多个子信道,同时,调度数据广播队列匹配对应子信道进行广播.

本文第 1 节介绍相关研究工作.第 2 节介绍实时按需数据广播系统模型.第 3 节详细介绍自适应信道划分

与分配 OCSM 方法,第 4 节通过仿真实验确定相应参数的最佳取值,并通过对比实验验证 OCSM 方法的有效性.第 5 节是对全文的总结和未来研究方向的说明.

1 相关工作

实时按需数据广播系统中,调度算法是关键,其分为单一信道数据广播调度和多信道数据广播调度.本文主要从这两个方面介绍当前研究的相关成果.

在单一信道实时按需数据广播调度方面,Xuan 等人^[9]提出了基于 EDF(earliest deadline first)算法的按需广播模型 BoD(broadcast on demand),能有效地保证带宽使用和控制用户访问时间.Lei 等人^[10]同时考虑失效率和访问时间,提出最大价值优先算法 MVGF(maximum value gained first).Kalyanasundaram 和 Velauthapillai^[11]考虑了在单一信道按需数据广播中请求长度和请求截止期因素,提出了请求长度确定和不确定两种情况下的调度算法 BCast 和 BCast2.Ng 等人^[12]针对实时信息传输系统提出了一种 MRS(most request served)广播算法,并且提出一种客户端的缓存策略,MRS 在 MRF(most request first)的基础上考虑了数据项大小对带宽的敏感性.Lu 等人^[13]针对用户请求,数据项提出两层调度算法 SLLH(scheduling scheme with maximum gain heuristic),能够获得最佳的广播效率.Dewri 等人^[14]研究了基于截止期约束的按需数据广播调度,并指出,数据项的响应时间和数据项请求的优先级决定了数据项调度效率.当前,绝大部分考虑请求截止期的调度算法均集中在降低请求失效率^[15]上,但很少能同时优化等待时间.文献[16]提出的 $R \times W$ 算法考虑了数据项请求数和数据项最长等待时间,但其数据广播调度模型中各项请求是没有截止期约束的.Xu 等人^[17]提出了一种典型的带有截止期约束的按需数据广播调度算法 SIN- α (slack time inverse number of pending requests),SIN- α 考虑了数据项截止期和当前请求数两个指标.我们在前期研究工作^[18]中提出 $L \times R \times W$ 算法,提出将即将失效数 L 、数据项请求数 R 、数据项最长等待时间 W 同时考虑,其 $Weight(d_i)$ 权重指标能够全面的衡量数据项的优先级.对比实验表明,该算法比 EDF,MRF 和 $R \times W$ 算法具有更低的失效率以及更短的等待时间.上述几种算法均不考虑数据项大小变化,即假设数据项大小固定.我们在前期的另一项研究工作中^[19]考虑数据项大小不一的情况,提出将数据项进行等大小拆分,结合 $L \times R \times W$ 算法,较好地解决了考虑数据项大小的按需数据广播调度问题.虽然单一信道数据广播在一些情况下面能够取得很好的表现,但由于单一信道模型的局限,其不能并行广播来满足数据规模剧增和服务需求个性化提高的现状,服务质量相对较低.

针对单一信道数据广播存在的缺陷,许多学者对固定多信道数据广播进行了研究,FLAT^[20]是多信道中最简单的静态广播调度方法,它以均等的机会将数据分配到多信道中,因此,访问热度高的数据同访问热度较低的数据需要花费相同的时间,算法简单但效率不高.Yee 和 Navathe^[21]提出一种近似算法 GREEDY,该算法在缩短 MCAED(multi-channel average expected delay)问题上取得了接近最优的表现.该算法先将数据按照访问热度排序,然后在序列中找到最优分割点以降低 MCAED,找到足够的分割点以将队列分割成信道数相等的子队列.Waluyo 等人^[22]研究多信道广播环境中多数据项请求的调度机制,他们关注服务器端的广播顺序以最小化查询访问时间.他们同时提出一个全局的索引策略,以最小化调谐时间和能量消耗.Lee 等人^[23]基于系统负载提出动态的信道分配方法,该方法根据已知的随机模型动态分配信道.Gao 等人^[24]提出一种基于多信道的全局优化调度算法,利用动态规划结构的 AH-Tree(alphabetical huffman tree)索引方案,在数据请求频率倾斜的情况下,能最大限度地缩短调谐时间.Lim 等人^[25]针对多信道广播系统中普遍存在的数据重叠问题,提出一种新的用于重叠峰(各信道边界共享的频率范围)信号处理机制 SOB(signal vai overlapped band),能够有效地减少多信道中广播数据的重叠,大大提高系统效率.Ali 等人^[26]考虑多信道下多数据项请求的情况,提出了一种新的接纳控制算法 ILAC(item level admission control).ILAC 将一个带有截止期的多数据项请求看作是多多个带有相同截止期的虚拟单数据请求,可以及时通知用户请求是否能够被满足;同时,其还提出一种多信道数据匹配调度算法 MBA(matching based allocation),能够最大化地实现请求之间的数据共享,同时减小信道切换的可能性.Hu 等人^[27]研究了多信道广播环境中混合数据传输的问题,提出了自适应平衡方法 ABS(adaptive balanced scheme)来执行确定性的搜索.Zheng 等人^[28]同时考虑了数据优先级、数据大小和信道带宽这 3 个因素,提出了近似算法

TOSA(两层优化调度算法)来获取接近最优的多信道平均延迟 MCAED:第 1 层调度策略将数据群集到信道中,第 2 层调度在各个信道中进行以保证平均的最优表现.虽然固定多信道数据广播解决了单一信道数据广播存在的一些问题,但随着用户请求多样性的提高,固定信道数据广播无法自适应当前广播环境,从而提供更灵活多变的服务.

尽管有大量学者对单一信道数据广播以及固定多信道数据广播进行了研究,但仍缺乏一种有效的自适应信道划分算法.本文试图通过对数据请求分布、截止期分布、数据项大小分布进行分析和挖掘,在广播之前对待广播数据项进行聚类,根据聚类结果自适应划分信道,提高数据广播调度的服务质量.

2 系统模型

在按需数据广播调度模型^[29,30]中,我们假设广播系统包括一个服务器以及多个用户.服务器维护一个请求队列 RQ(request queue)、一个准备队列 PQ(pending queue)以及多个广播队列 BQ_i,0<i<n(broadcast queue),其中,n 为系统广播队列个数.RQ 负责收集用户请求,服务器根据 RQ 从数据库中获取数据生成 PQ.服务器周期性地运用 OCSM 方法从 PQ 提取数据组织广播.每当用户需要一个数据时,通过上行信道上传一个请求至服务器.本文假设每个用户一次只产生一个请求,并且同一用户前后两次请求的数据不具有关联性.上传请求后,用户侦听下行信道获取数据,数据项大小是不唯一的.系统包含一个上行信道、若干个下行信道,上行信道带宽远小于下行信道,本文假设用户可同时侦听多个下行信道.具体的,基于 OCSM 的数据广播调度模型如图 1 所示.

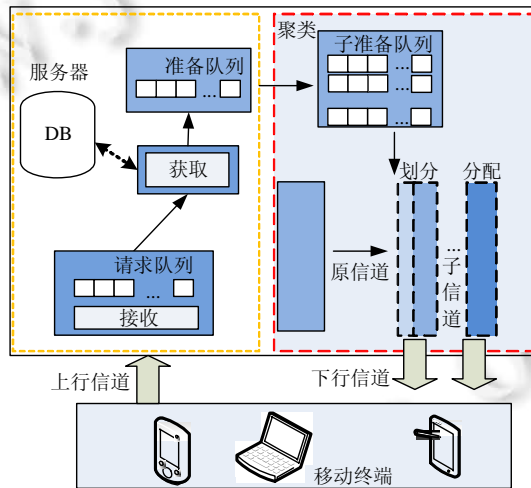


Fig.1 System architecture

图 1 系统结构示意图

系统由 4 部分组成.

- (1) 接收(接收移动客户端的请求).移动客户端通过上行信道提交自己的请求,每个请求包括请求的数据项标签、请求截止期等信息.服务器接收请求,先检查对应数据项是否存在于广播队列或准备队列中:如果在,则直接将请求加入相应数据项的请求列表中;如果不在,则将请求按时序加入请求队列中;
- (2) 获取(从数据库获取请求数据).服务器从请求队列中取出当前时间的请求,从因特网、数据库或服务器的缓存中查找满足请求的数据项,获取数据项组织成数据项信息.本文不考虑服务器获取数据的时间和服务器的缓存策略;
- (3) 划分(将原信道划分成多个子信道).服务器根据 OCSM 方法依据获取的准备队列数据将原信道进行划分,OCSM 方法首先利用 $R \times W/SL$ 算法确定 PQ 中每一个数据项 d_i 的权重值,为下一步提供聚类指标;然后,利用 WASC 算法根据数据项权重值以及数据项大小将 PQ 划分成 n 个子集合;最后,利用算法

- CSA 依据 WASC 生成的 n 个子集合对原信道进行划分以及分配;
- (4) 调度(调度广播队列进行数据广播).服务器周期地将广播队列发送到卫星或者基站,卫星或基站通过下行信道将广播队列中的数据项广播出去.基于 OCSM 方法的数据广播调度流程见表 1.

Table 1 Data broadcast scheduling process based on OCSM
表 1 基于 OCSM 的数据广播调度流程

过程:基于 OCSM 的数据广播调度.	
1.	初始化;
2.	移动客户端通过上行信道发送请求 Req_i ;
3.	if 当前有请求 Req_i ,取出 Req_i ,对于该请求的数据项 d_i ;
4.	if d_i 存在于广播队列 BQ_i 中
5.	then 将 Req_i 添加到该 d_i 的请求列表中;
6.	else if d_i 存在于 RQ 中
7.	then 则将该 Req_i 添加到该 d_i 的请求列表中;
8.	else
9.	获取该 d_i 加入到 RQ 中;
10.	end if
11.	end if
12.	If 广播周期未结束, then goto 步骤 2;
13.	else
14.	依据 OCSM 组织广播(详见 3 节 OCSM 方法);
15.	广播完 d_i ,则将该 d_i 的成功请求信息写入文件,删除该广播项所有请求,删除该广播项,前进一个时间点;
16.	if 没有超过运行时间 T , goto 步骤 2; end if
17.	end if
18.	end if
19.	统计成功请求信息.

3 OCSM 方法

数据项优先级 P_{d_i} 、数据项大小 $Size_{d_i}$ 能够很好地刻画数据项的特征.通过将 PQ 数据项按 $P_{d_i}, Size_{d_i}$ 这两个指标进行聚类,将聚类的结果作为划分信道的依据,能够找到最适合广播的子信道个数以及大小.最后,将数据置于对应的子信道中进行广播,这就是 OCSM 方法的基本思想.本节详细介绍 OCSM 框架,如图 2 所示.

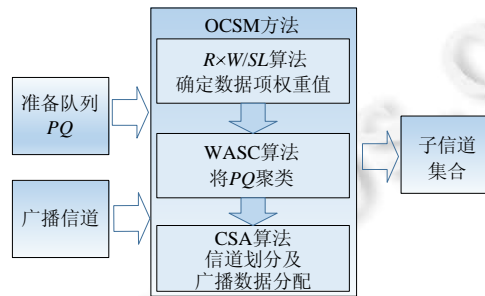


Fig.2 OCSM model

图 2 自适应信道划分方法

OCSM 方法包含 $R \times W/SL$ 算法、WASC 算法和 CSA 算法.

- $R \times W/SL$ 确定 PQ 中每一个数据项 d_i 的权重值,为下一步提供聚类指标;
- WASC 根据 P_{d_i} 以及数据项大小 $Size_{d_i}$ 将 PQ 划分成 n 个类别 $FG = \{g_1, \dots, g_i, \dots, g_n\}$, 其中, g_i 表示第 i 个分组;
- CSA 根据 FG 将信道 C 划分成对应的相应的 n 子信道集合 $SC = \{c_1, \dots, c_i, \dots, c_n\}$, 并将 g_i 分组的数据项置于子信道 c_i 进行广播.

3.1 算法R×W/SL

请求失效率 LR(request lost rate)、平均等待时间 AAT(average access time)是衡量实时数据广播系统服务质量的指标.为了提高系统的服务质量,通常采用的策略是:通过算法确定数据项优先级 P_{d_i} ,选取 P_{d_i} 最大的数据项进行广播.在不考虑数据项大小的情况下,SIN- α 算法以及 $L \times R \times W$ 算法采用权重值 Wf_{d_i} 来衡量数据项,根据 Wf_{d_i} 调度广播,实验证明这两种算法的有效性.如何在考虑数据项大小的情况下准确地衡量数据项的 P_{d_i} ,是本节致力解决的问题.

本文针对数据项大小不一的情况,在 $L \times R \times W$ 算法的基础上做出改进,提出 $R \times W/SL$ 算法.由于我们无法预知 $Size_{d_i}$,故我们假设下一时刻广播数据项 d_i ,得出广播结束时间,由此计算出广播 d_i 将导致系统其他请求总的失效数 SL_{d_i} ,选取使 SL_{d_i} 最小的 d_i 优先广播.同时,考虑数据项请求数(R_{d_i})、最长等待时间(W_{d_i})两个因素.通过公式(1)计算 Wf_{d_i} 值衡量数据项的紧急度,以此确定数据项的优先级 P_{d_i} :

$$Wf_{d_i} = \frac{R_{d_i} \times W_{d_i}}{SL_{d_i}} \quad (1)$$

其中, R_{d_i} 表示数据项 d_i 请求数, W_{d_i} 表示数据项 d_i 对应请求的最长等待时间, SL_{d_i} 为广播 d_i 将导致系统其他请求总的失效数.

Wf_{d_i} 的值越大,数据项优先级 P_{d_i} 越高.在公式(1)中, SL_{d_i} 可能为 0,此时就用 $R_{d_i} \times W_{d_i}$ 衡量 d_i 的优先级.因此,公式(1)修改为公式(2):

$$Wf_{d_i} = \begin{cases} \frac{R_{d_i} \times W_{d_i}}{SL_{d_i}}, & \text{if } SL_{d_i} \neq 0 \\ R_{d_i} \times W_{d_i}, & \text{if } SL_{d_i} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

3.2 算法WASC

本节介绍均衡聚类算法 WASC,WASC 用于聚类 PQ ,生成 n 个类别的集合 FG .第 3.2.1 节对数据聚类进行分析,提出两个聚类指标.第 3.2.2 节详细介绍了 WASC 算法的实现,将 PQ 中数据项根据第 3.2.1 小节提出的聚类指标 $Size_{d_i}, Wf_{d_i}$ 自聚类生成 FG ,为信道划分提供依据.

3.2.1 数据聚类分析

在按需数据广播调度算法中,需要考虑的 3 个主要因素是数据项大小 $Size_{d_i}$ 、数据项的权重值 Wf_{d_i} 以及信道大小 Bw .下面分析以上 3 个因素之间的关系.为了便于分析,本文做出如下符号定义:信道 C 划分成 n 个子信道, $SC = \{c_1, \dots, c_i, \dots, c_n\}$,子信道 c_i 的带宽为 Bw_{c_i} ,即 $Bw = \sum_{i=1}^n Bw_{c_i}$;广播周期 k 子信道 c_i 的广播价值定义为 $V_{c_i,k}$,求解公式如公式(3)所示:

$$V_{c_i,k} = Wf_{d_1,c_i,k} + Wf_{d_2,c_i,k} + \dots + Wf_{d_i,c_i,k} = \sum_{d_i \in c_i} Wf_{d_i,c_i,k} \quad (3)$$

其中, $Wf_{d_i,c_i,k}$ 为广播周期 k 子信道 c_i 中第 i 个数据项的权重值.故信道 C 总的广播价值 $SumV_k$ 求解如公式(4):

$$SumV_k = V_{c_1,k} + V_{c_2,k} + \dots + V_{c_n,k} = \sum_{j=1}^{j=n} V_{c_j,k} = \sum_{j=1}^{j=n} \sum_{d_i \in c_j} Wf_{d_i,c_j,k} \quad (4)$$

直观上认为,一个周期内广播价值 $SumV_k$ 越高,广播系统的效率越高.

(1) 数据大小:分析数据大小对广播调度的影响.

假定将信道划分成两个子信道 $Bw_1=3, Bw_2=1$,数据项 d_1, \dots, d_5 大小为 3, d_6, \dots, d_{10} 大小为 1,各数据项权重值均为 1,广播周期为 5s.按照数据项大小聚类如图 3(a)、图 3(b)所示.从图 3(a)结合公式(4)可以计算出 $SumV_k=10$,而若不将数据项放置于与其大小相对应的信道中广播,会存在较大的信道浪费;图 3(b)展示了一种较极端的情况,信道存在 3 个单位的带宽浪费,同时 $SumV_k=9$,小于按数据项大小聚类广播.同时,通过图 3(a)、图 3(b)的对比可发现,周期性数据广播调度在待广播数据饱和的情况下存在的带宽浪费主要来自于每个周期间隙带宽浪费.

依据数据项大小进行聚类,以聚类结果对信道进行划分,能找到最适合当前待广播数据集的信道带宽,从而大大减小周期间隙带宽浪费,提高信道利用率.

(2) 数据权重值:分析数据项权重值对调度的影响.

假定将信道划分成两个子信道 $Bw_1=2, Bw_2=2$,被请求的数据项 d_1, \dots, d_8 大小均为 2,其中, d_1, \dots, d_4 权重值为 5, d_5, \dots, d_8 权重值为 1,广播周期为 3s.按照数据项权重值均衡化广播如图 3(c)、图 3(d)所示.在图 3(c)中,权重值为 5 的数据项分散到两个信道中广播.广播周期结束后,数据项 d_7, d_8 未能及时广播,可以计算出总信道广播价值 $SumV_k=22$.若不将权重值大的数据项均匀分散于各个广播队列,将可能出现如图 3(d)所示的情形.权重值大的数据项拥挤与一个信道内,导致总信道广播价值为 $SumV_k=18$,大大影响了广播效率.

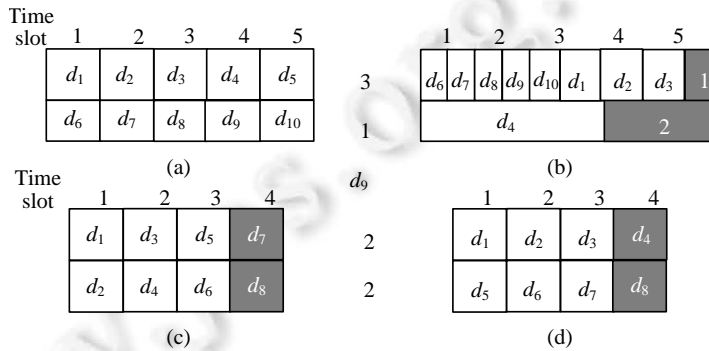


Fig.3 Data clustering analysis

图 3 数据聚类分析图

通过上面的分析发现:将数据项大小相接近的数据项聚集在一起广播,能够充分利用信道带宽,减少周期间隙带宽的浪费;将权重值大的数据项均匀分散至各个信道广播,将有利于提高单位时间内信道所广播的总价值,从而大大提高信道利用率.

3.2.2 WASC 实现

通过上一小节的分析,得出 $Size_{d_i}, Wf_{d_i}$ 两个聚类指标对聚类的影响.将数据项集合按照 $Size_{d_i}$ 聚类,有利于带宽的充分利用;将数据项集合按照 Wf_{d_i} 分散广播,有利于提高单位时间内信道广播价值.本文提出 WASC 算法,将数据项集合按 $Size_{d_i}$ 进行聚类,然后依据 Wf_{d_i} 将聚类子集合 G 分散成 FG .

下面将具体介绍均衡聚类算法的实现.WASC 算法主要分为 3 步.

(1) $Size_{d_i}$ 聚类.

运用改进的 KODAMA(knowledge discovery by accuracy maximization)^[31]算法,将数据按大小聚类.

- (i) 初始化:将 N 个数据项分成 N 类,定义数组 $T=\{t_1, \dots, t_i, \dots, t_N\}$ 作为分类器,其中, t_i 为 d_i 的类标签.运用 KNN 算法对样本进行 10 倍交叉验证,得出预分类标签 $Z_T=\{z_1, \dots, z_i, \dots, z_N\}$,其中, z_i 为 d_i 的预分类标签.计算分类精准度值 A_T ;
- (ii) 随机交换 T 与 Z 中错误分类样本标签,生成新的分类标签数组 $V=\{v_1, \dots, v_i, \dots, v_N\}$.对 V 运用 KNN 算法进行 10 倍交叉验证,得出预分类标签 $Z_V=\{z_1, \dots, z_i, \dots, z_N\}$,计算分类精准度值 A_V ,若 $A_V > A_T$,用 V 取代 T ,将 Z_V 取代 Z_T, A_T 等于 A_V .

循环执行步骤(ii),直到 A_T 等于 1 或者达到最大循环次数.

(2) 分类标签调整.

经过步骤(1)产生的 T 中各个类别的类标签并非连续的数列,为方便信道的划分,需要步骤(2)对 T 中类标签进行调整.采用分类标签调整策略 TRS(tag rank strategy),将数据项集合 D 分成 $n/2$ 个子集合 $G=\{g_1, \dots, g_i, \dots, g_{n/2}\}$.具体的调整策略见表 2.

Table 2 Tag rank strategy

表 2 TRS 策略

策略:TRS.
输入: T ;
输出: $G, categorieN$.
1. 定义包含 N 个元素的数组 $Tag\{-1,-1,\dots,-1\}, categorieN=0$;
2. for $i=1$ to N
3. if $Tag[i]=-1$,即分类标签未进行调整 then
4. $n=t_i; categorieN++; t_i=categorieN$
5. for $j=i+1$ to N
6. if $t_j=n \ \&\& \ Tag[j]=-1$ then $t_j=categorieN, Tag[j]=0$; end
7. end for
8. $Tag[i]=0$;
9. end for
10. 将 T 类标赋值给 G ,输出 $G, categorieN=n/2$

(3) Wf_{d_i} 均衡化处理

将数据项权重值均匀的分散各个子集合,对应于 G 中的每一个子集合 g_i 生成 fg_{2i-1}, fg_{2i} 两个子集合,如果 $SW_{fg_{2i-1}} > SW_{fg_{2i}}$,将 g_i 中数据项 d_j 添加到子集合 fg_{2i} 中;否则,添加到 fg_{2i-1} 中.其中, $SW_g = \sum_{d_i \in g} wf_{d_i}$.通过 Wf_{d_i} 的均衡化处理,生成最终的分类子集合 FG .

综上 3 步,WASC 算法实现见表 3.

Table 3 Implementation of WASC

表 3 WASC 算法实现

算法:WASC.
输入: PQ ;
输出: FG .
1. 将 PQ 中数据项大小 $Size_{d_i}$ 保存于向量 S 中;
2. 将 N 个数据项样本 d_i 分成 N 类,数据项 d_i 对应第 i 类,类标为 i ,存储于向量 T 中;
3. do
4. 对样本进行 10 倍交叉验证,将样本分成 10 份,对每一份样本进行 10 轮次 KNN 算法分类
得到 9 个初始预分类标签,采用投票法决定该样本的最终预分类标签 z_i ;
6. 将其余的 9 份样本步骤 4 中方法进行同样处理,将所有样本的预分类标签汇总生成预测分类样本 Z_T ;
7. 计算样本分类精准度值 A_T ,其求解公式为 $A_T=r/N$;
8. 随机挑选一部分分类错误的样本,将其分类标签 t_i 与其预测分类标签 z_i 交换,生成新的分类标签 V ;
9. 将 V 代替 T ,对样本进行第 4 步~第 6 步,得到 A_V ;
10. 若 $A_V \geq A_T$,则 $T=V, Z_T=Z_V, A_T=A_V, R=R-1$;
11. loop until $A_T=1$ 达到最大循环轮次
12. 调整分类标签 T 中分类标签数值,使其按序递增,生成 G ;
13. For $i=1$ to $n/2$
14. 针对于 g_i ,初始化数据项集合 fg_{2i-1}, fg_{2i} ;
15. Wf_{d_i} 均衡化处理生成 FG ;
16. $i++$;
17. end for
18. 输出 FG ;

3.3 算法CSA

算法 CSA 根据分类子集合 FG 将信道进行划分,随后将数据项分配至对应的子信道进行广播.其主要包含信道划分以及数据项分配两个部分.

- (1) 信道划分:广播信道带宽由其待广播数据项特征决定.广播信道与广播数据项相适应,可以进一步提高算法效率.通过均衡聚类挖掘待广播数据项数据特征.数据项大小聚类,充分利用信道带宽,数据项依据权重值分散,提高了信道周期广播价值.将广播信道根据其待广播数据进行自适应划分,划分子信道情况由聚类结果决定;

- (2) 信道分配:将数据项分配至对应子信道内进行广播.根据每个待广播数据项的分类标签,将其分配至对应的子信道组成子广播队列.然后,根据算法确定的权重值将子广播队列进行排序,权重值大的数据项优先于权重值小的数据项广播.具体 CSA 算法见表 4.

Table 4 Implementation of WASC

表 4 CSA 算法实现

算法:CSA.	
输入项:	信道 C 、待广播队列 D ;
输出:	子信道 SC 、子广播队列 BQ .
1.	初始化数组; $Sumdata[n]$;
2.	for $i=1$ to N
3.	if $t_i=j$ then $Sumdata[j]=Sumdata[j]+ Siz_{e_{d_i}}$; tend
4.	end for
5.	for $i=1$ to n
6.	子信道 c_i 的带宽大小 $Bw_{c_i} = \frac{Sumdata[i]}{\sum_{j=0}^{j=n-1} Sumdata[i]} \times Bw$;
7.	end for
8.	输出子信道
9.	初始化 n 个子广播队列
10.	for $i=1$ to N
11.	扫描待广播数据项集合 D 中数据项,若 d_i 的分类标签为 t_i ,则将数据项 d_i 加入到子广播队列 bd_i 中;
12.	end for
13.	for $i=1$ to n
	将子广播队列 bd_i 按数据项权重值 W_{d_i} 排序
14.	end for
15.	输出子广播队列 BQ

4 实验分析

为了验证多信道数据广播 OCSM 方法相对于单一信道数据广播的优势,本文选取 $R \times W$ 算法来进行对比性实验.OCSM 是基于按需的多信道单请求数据广播调度算法,为了验证其在固定多信道按需广播调度中的有效性,本文试图选取多种当前文献中最新最优的按需多信道单数据项调度算法进行对比,但经过文献查阅,未发现服从该约束条件的对应算法.因此,本文选取两种高效的静态广播调度算法 GREEDY 和 TOSA,并依据本文研究对象和环境的不同进行适当改进,编写算法程序与 OCSM 进行对比性实验.第 4.1 节介绍实验相关环境,包括基本参数设定及仿真实验评价体系.第 4.2 节验证了 OCSM 中参数 K 在不同数据请求情况下的最佳取值集合.第 4.3 节在数据请求服从不同分布情况下,对比了算法 OCSM 与 $R \times W$,GREEDY 以及 TOSA 的表现.第 4.4 节在数据请求截止期服从不同分布情况下,对比了算法 OCSM 与 $R \times W$,GREEDY 以及 TOSA 的表现.第 4.5 节对比了不同数据项大小对算法 OCSM,GREEDY 以及 TOSA 算法的影响程度.

4.1 实验环境

(1) 实验数据

本文的对比实验采用了 1998 年世界杯期间官方网站每天的数据访问集^[32],该数据集中,平均每天有超过 700 000 个请求,平均请求速率为 83 条/s,包括近 22 000 个不同的 Web 页面和图片对象.为了便于进行对比实验,在进行实验前,我们对数据项大小、带宽进行了归一化处理,数据项平均大小为 1 个单位,广播带宽为 10 单位/秒.为了模拟请求的时间限制,每个请求被赋予一个随机生成的截止期,平均截止期为 60s.系统请求速率默认值设定为 100 条/s,仿真运行时间设定为 3 600s,一个仿真周期共产生 360 000 个请求,数据集中包含 20 000 个数据项可被请求.OCSM 方法划分形成的子信道数设定在 4 个~6 个之间浮动.为了保证对比实验的开展,设定其余对比算法的默认广播信道数为 5.第 4.2 节~第 4.4 节将在不同请求速率、截止期、数据项大小情况下进行对比实验,具体的实验参数将在对应章节中详细说明,公共实验参数设定见表 5.

Table 5 Experiment parameter settings

表 5 实验参数设置

参数名称	分布	参数值	可调参数
周期	-	20	Y
广播带宽	-	10	Y
运行时间	-	3 600	N
平均截止期	-	60	Y
数据项平均大小	-	1	Y
平均请求速率	-	100	Y
用户数	-	10 000	N
初始化请求个数	-	10 000	N
总请求数	-	360 000	N
数据项个数	-	20 000	N
截止期分布	均匀分布	60	Y
数据项大小分布	均匀分布	1	Y
默认广播信道数	-	5	Y

(2) 评价指标

实时按需数据广播系统中,LR,AAT 是衡量服务质量的两个重要指标.有效地降低请求失效率等同于有效地缩短平均访问时间.为简化对比实验,省去重复工作,同时更直接地展示算法的效果,本文选取请求失效率作为衡量算法有效性的评价指标.用户请求失效数总和与所有请求总和的比值被称为请求失效率. M 个周期总请求失效数为 $L_M = \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N Led_{d_i,k}$, $Led_{d_i,k}$ 为数据项 d_i 在第 k 个周期的请求失效数; M 个周期总请求成功数为

$SC_M = \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N SC_{d_i,k}$, $SC_{d_i,k}$ 为数据项 d_i 在第 k 个周期的成功请求数.则请求失效率见公式(5):

$$LR = \frac{L_{k < M}}{L_{k < M} + SC_{k < M}} = \frac{\sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N Led_{d_i,k}}{\sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N Led_{d_i,k} + \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N SC_{d_i,k}} \tag{5}$$

4.2 OCSM中最佳参数K的确定

OCSM 方法中,采用 K 最近邻(k -nearest neighbor,简称 KNN)分类算法作为有监督的分类器^[33],KNN 中, K 值的选取对聚类效果产生重要的影响:若 K 值较小,则只有与预测样本较近的训练样本才会对预测结果起作用,但容易发生过拟合;若 K 值较大,优点是可以减少学习的估计误差,但缺点是学习的近似误差增大,这时与预测样本较远的训练样本也会对预测起作用,使预测准确率降低.在算法实际运行过程中,聚类样本的数据特征随着截止期和请求数据分布的变化而变化.只有依据样本数据特征选取对应的最佳 K 值,才能够使算法达到精准的聚类效果,为 CSA 算法提供准确划分依据,从而有效地利用信道.由于本文主要研究不同截止期分布和请求数据分布下算法的有效性,所以在请求数据特征和请求截止期分布不同时,本节验证不同的 K 值对数据广播调度的影响.

在本组实验中,选取平均截止期为 60s,数据项平均大小为 1,数据请求速率为 100 条/s.一般认为:具有 N 个样本的分类中将 K 取值为 \sqrt{N} 能取得较好的分类效果,每个广播周期约有 200 个样本.本文设定 K 的取值范围为 10~100.图 4 是截止期服从不同分布(固定分布、均匀分布、指数分布)和请求数据服从不同分布(正态分布、均匀分布、Zipf 分布)的情况,分别展现了请求失效率 LR、平均访问时见 AAT、划分子信道个数 NSC(number of sub-channel)三者在不同的 K 值时算法的效率比较,其中,请求失效率 LR、平均访问时间 AAT 最能反映调度算法的有效性以及系统的信道利用率.

图 4 描述了在不同请求截止期分布和不同数据请求分布的组合情况下,有监督分类器 KNN 中 K 值对数据广播调度效率的影响.

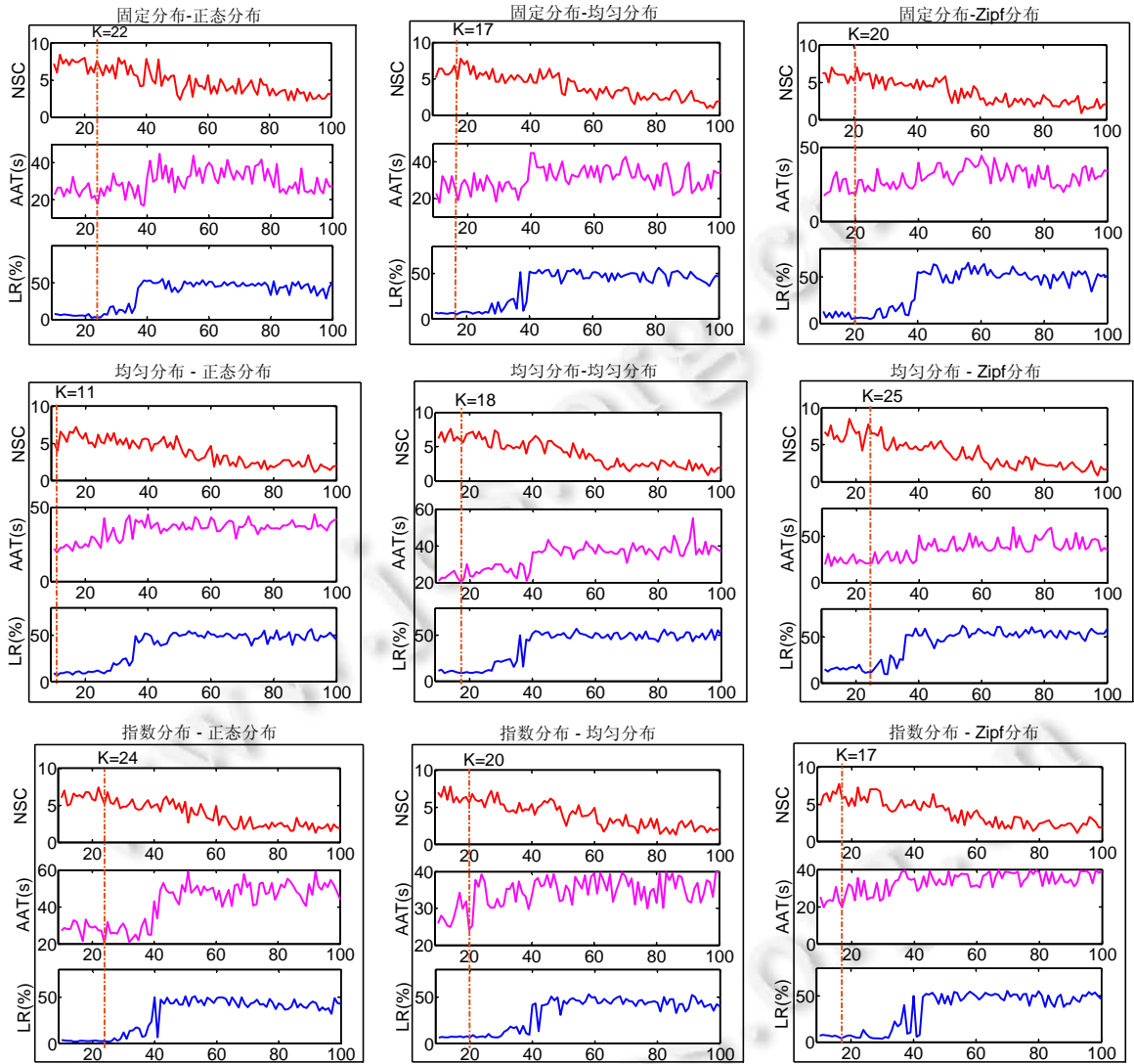


Fig.4 Performance of OCSM with varying K

图4 不同 K 值对 OCSM 的影响

通过图4的实验结果,本文得出如下结论.

- (1) 随着 K 值的不断增加,数据项样本聚类生成的子类类别数呈下降趋势;
- (2) 在所有请求截止期和数据请求分布组合下,AAT随 K 值的增大先保持稳定,随后呈现上升趋势,最后逐渐趋于稳定.这是因为随着 K 值的增大,样本的聚类精度变差,系统广播调度效果受到聚类精度的影响,从而导致平均等待时间变长;
- (3) 当 K 值处于 10~30 区间时,请求失效率呈现轻微下降趋势;当 K 值处于 35~45 区间时,请求失效率迅速增大,然后随着 K 值的增大,失效率基本保持在较高的服务水平状态.

通过上面的分析,本文得出最优 K 值以及对应信道划分 N 值见表 6.

Table 6 Optimal K and number of sub-channels

表 6 最优 K 值与对应信道划分 N 值

截止期分布	数据请求分布	最佳 K 值	信道个数 N
固定分布	正态分布	22	6
固定分布	均匀分布	17	4
固定分布	Zipf 分布	20	6
均匀分布	正态分布	11	4
均匀分布	均匀分布	18	6
均匀分布	Zipf 分布	25	7
指数分布	正态分布	24	5
指数分布	均匀分布	20	6
指数分布	Zipf 分布	17	6

4.3 不同数据请求分布下OCSM有效性验证

本组实验对比在数据请求服从不同分布(Zipf分布、均匀分布、正态分布)下,OCSM,RxW,GREEDY 和 TOSA 算法的效率,评价指标采用 LR.理论上数据请求越集中,广播效率越高.因为请求越集中,广播单个数据项所满足

的用户请求数越多.数据请求在 Zipf 分布下的概率密度为 $P_i = \frac{(1/i)^\theta}{\sum_{i=1}^{20000} (1/i)^\theta}$,其中, P_i 为数据项 d_i 被访问的概率,设定

参数 $\theta=1$.数据请求均匀分布设定平均值为 10 000,数据正态分布为标准正态分布,即 $\mu=0,\sigma^2=1$.对于不考虑数据项大小的算法 RxW,GREEDY,数据项大小设定为 1 个单位,其他对比算法设定数据项大小服从均匀分布,平均大小为 1 个单位.请求截止期服从均匀分布,平均大小为 60 秒.数据请求服从 Zipf 分布、均匀分布、正态分布时对应的 K 值分别设定为 25,18,11.

图 5(a)~图 5(c)分别展示了数据请求服从 Zipf 分布、均匀分布、正态分布时,请求速率变化对各对比算法的影响.

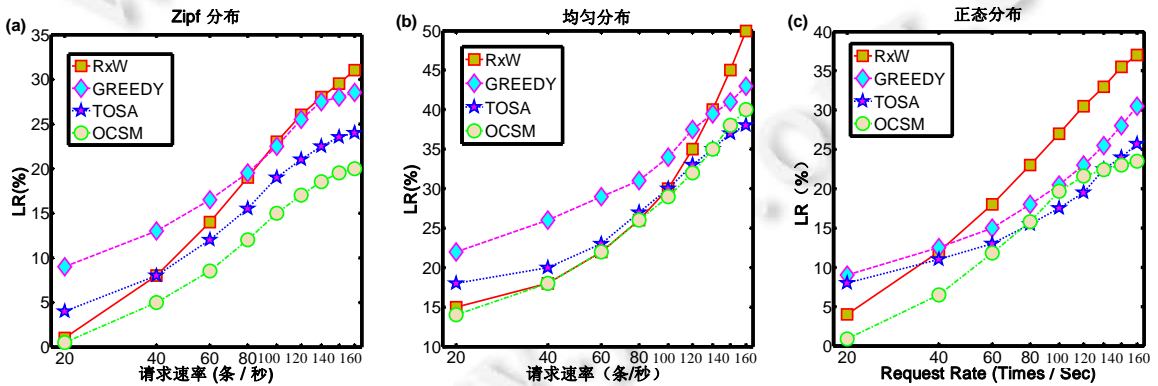


Fig.5 LR under different data request distributions

图 5 数据请求服从不同分布下各算法的失效率

从图中可以得出如下结论.

- (1) 4 种对比算法的失效率都随着请求速率的增大而升高.其中,两种静态调度算法 GREEDY 和 TOSA 在请求速率较低时失效率高于 RxW 和 OCSM.这是因为静态调度算法所广播的数据不是由当前用户请求决定,用户必须等待系统广播.当请求速率较高时,用户所请求的数据覆盖了大部分静态广播内容,此时,静态多信道广播算法优势明显;
- (2) 当请求服从 Zipf 分布情况下,请求热点相对于其余两种分布更集中,请求数据特征明显,4 种算法的表现都比较好.其中,OCSM 表现最好,这也证实了在数据特征明显的情况下,OCSM 中的聚类效果能够

较准确地找到适合广播的信道划分方式;

- (3) 当数据请求服从正态分布、请求速率大于 60 条/s 时,GREEDY 和 TOSA 失效率低于 $R \times W$ 算法.TOSA 失效率一直优于 GREEDY 算法,这得益于 TOSA 两层优化模式.同其余 3 种算法相比,OCSM 算法表现优于 $R \times W$ 和 GREEDY 算法,在请求速率较低时优于 TOSA;而随着请求速率的增大,具有与 TOSA 算法表现相近.这是因为当请求服从正态分布时,请求数据具有较大的偏向性,这种情况更能发挥 OCSM 自适应划分信道的优势,从而采用更适合的信道大小广播数据;
- (4) 当数据请求服从均匀分布时,可以看出,所有算法的失效率普遍偏高.当请求服从均匀分布时,请求数据相对分散,即热点数据不集中,这种情况对数据广播调度十分不利.同时也可以发现:静态广播算法由于受请求分布影响较小,随着请求速率增大,失效率增长速度低于按需调度算法.OCSM 在请求速率较低时同 TOSA, $R \times W$ 算法表现相近,而当请求速率较高时,其表现劣于 TOSA 算法.这是因为热点数据分散,聚类算法不能发挥作用;
- (5) 通过对比 3 种情况下各算法的表现可以发现,请求热点数据相对集中有利于数据广播调度.因为热点数据集中,广播一个热点数据所服务的用户量增多,从而提高系统调度效率.同时也可以发现,静态调度算法在请求速率较低时表现不如按需调度算法,但其受速率变化影响较小,在请求速率较高时仍能保持较低的失效率.在这 3 种请求分布下,OCSM 算法综合表现较好,尤其是在请求数据特征明显的 Zipf 分布时,请求失效率相对于 TOSA 低接近 5%;在其余两种情况下,也同 TOSA 算法保持相近的失效率.

4.4 不同截止期分布下OCSM有效性验证

截止期是影响调度算法效率的重要因素之一,截止期越短,满足该请求的可能性越小,请求失效率越高.OCSM 算法采用降低系统总即将失效请求的思路,充分考虑请求截止期这一因素.本组实验对比在截止期服从不同分布时,算法 OCSM, $R \times W$,GREEDY,TOSA 的 LR 变化情况.对比算法中:不考虑数据项大小的调度算法,数据项大小固定为 1 个单位;考虑数据项大小的调度算法,数据项大小服从均匀分布,平均大小设定为 1 个单位,并设定数据请求分布服从 Zipf 分布,请求速率为 100 条/秒.截止期服从均匀分布、指数分布、固定分布时 K 值分别设定为 18,17,17.

图 6(a)~图 6(c)分别展示了截止期服从均匀分布、指数分布和固定分布时,截止期大小变化对各对比调度算法的影响.

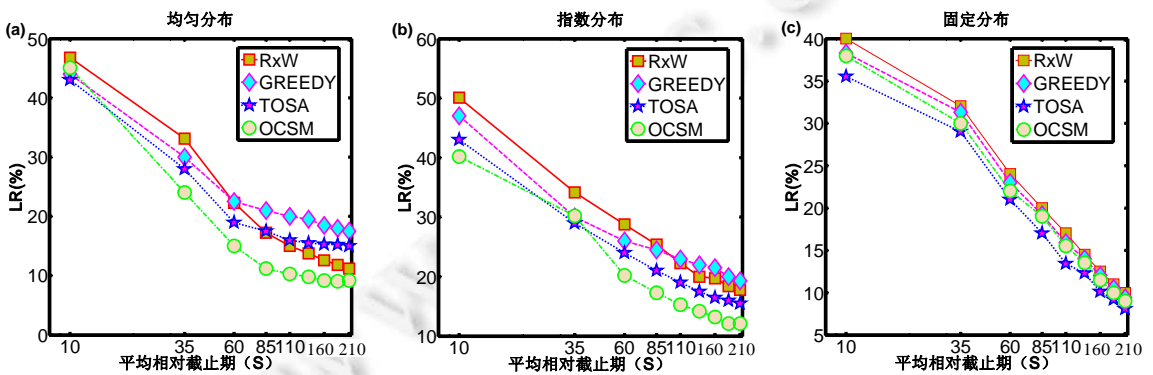


Fig.6 LR under different deadline distributions

图 6 截止期服从不同分布情况下各对比算法失效率

从图中可以得出如下结论.

- (1) 不同分布情况下,各对比算法请求失效率随着截止期增大的变化趋势基本相似,即:随着截止期不断增大,各算法的请求失效率降低.当截止期处于区间 10~85 时,请求失效率下降迅速;当截止期处于 85

到 210 区间时,所有算法的失效率逐渐趋于平缓.在请求截止期较短的情况下,4 种算法的表现相近,失效率都在 40% 以上;而随着截止期的延长,两种静态调度算法 GREEDY 和 TOSA 的失效率下降速度低于按需调度算法 $R \times W$ 和 OCSM.这是因为静态调度算法广播数据项是由系统根据广播之前得到的数据热度来决定的,其中有一部分数据并不会被广播,因此即使截止期继续延长,静态调度算法也会保持较高的失效率.OCSM 将截止期因素考虑进去,能够更加准确地衡量一个数据项的紧急度,因此能够在截止期服从不同分布的情况下都取得比 $R \times W$ 算法更优的失效率,后者仅考虑了数据请求数以及最长等待时间;

- (2) 当截止期服从均匀分布时, $R \times W$ 和 OCSM 在区间 10~60 内,LR 下降速度明显快于 GREEDY 和 TOSA.其中:OCSM 表现最好,一直处于请求失效率最低的状态;而 $R \times W$ 算法在截止期大于 85 以后表现仅次于 OCSM.两个静态调度算法 GREEDY,TOSA 则一直保持较高的失效率,其中,TOSA 算法略优于 GREEDY;
- (3) 当截止期服从指数分布时,请求截止出现的概率随着截止期长度的增大而减小,故截止期分布相对集中于较小的一端,4 种对比算法在这种情况下都表现最差.而由于截止期分布较集中,特征明显,有利于 OCSM 中聚类的准确性,OCSM 在这种情况下仍然能够取得很好的表现,请求失效率明显低于其余 3 种算法;
- (4) 当截止期服从固定分布时,OCSM 算法表现跟 $R \times W$ 算法相近,因为所有请求截止期都相同,这使得考虑了截止期因素的 OCSM 算法相对于不考虑截止期因素的 $R \times W$ 算法的优势不突出.然而,得益于 OCSM 算法的自适应多信道广播,其表现还是稍微优于 $R \times W$ 算法.因为截止期固定,使得在截止期较小的 10~60 区间内,各算法的失效率基本呈梯度下降趋势.这说明在截止期较小时,截止期是影响失效率的主要因素;但随着截止期的增大,各算法失效率降低速度逐渐放缓.在这种情况下,TOSA 算法的失效率略低于 OCSM 算法,说明固定截止期更适合静态调度算法.

综上,通过在截止期服从均匀分布、指数分布、固定分布时,4 种算法请求失效率的对比,验证了 OCSM 算法的具有较好的有效性.当截止期服从均匀分布以及指数分布时,OCSM 算法比 $R \times W$,GREEDY 和 TOSA 算法表现更优;当截止期服从固定分布时,OCSM 算法表现接近 TOSA.

4.5 数据项大小变化OCSM有效性验证

数据项大小是影响广播调度的另一个重要因素,数据项越大,单位时间广播的数据越少,所能满足的请求越少,请求失效率越高.OCSM 算法综合运用数据项大小决定广播信道大小的思想,自适应寻求更适合的信道大小.本组实验对比了 OCSM 同 $R \times W$,GREEDY,TOSA 算法在数据项大小服从固定分布下的算法效率.设定数据请求服从 Zipf 分布,请求速率为 100 条/秒,请求截止期服从均匀分布,截止期平均大小为 60 秒,K 值设定为 18(如图 7 所示).

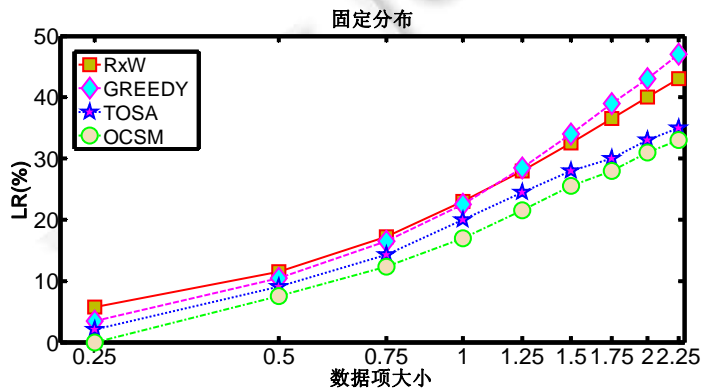


Fig.7 LR under a fixed distribution of data item size
图 7 数据项大小服从固定分布大小变化对调度的影响

从图 7 得出如下结论.

- (1) 由于 $R \times W$, GREEDY 算法没有考虑数据项大小的因素,其表现较差,LR 随着数据项的递增,几乎呈线性递增的趋势.其中, GREEDY 算法受数据项大小的影响最大,随着数据项的增大而广播周期变长,从而导致大量截止期较短的请求得不到满足而失效;
- (2) TOSA 和 OCSM 算法考虑到数据项单位大小的广播价值,优先广播单位价值高的数据,从而随着数据项大小的增加,仍能取得较低的失效率,其中, OCSM 算法表现一直优于 TOSA.

5 结论与展望

为了克服现有固定信道数据广播调度的不足,进一步提高实时按需数据广播的调度效率,本文提出了一种基于实时按需数据广播调度的信道划分与分配方法 OCSM. OCSM 首先通过 $R \times W/SL$ 算法确定数据项权重值;然后利用 WASC 算法根据数据项权重值以及数据项大小对数据进行均衡聚类;最后利用 CSA 算法划分信道,组织数据进行广播调度.为了验证 OCSM 的性能,本文模拟现实广播环境,进行了大量的对比实验,并得出以下结论.

- (1) 相对于单信道按需数据广播调度算法 $R \times W$, OCSM 提出的自适应信道划分策略能够充分利用多信道并行广播的特性,更好地降低失效率;
- (2) WASC 算法在请求数据倾斜程度较大时表现更好,因为此时的数据特征明显,使得 WASC 算法聚类更准确;
- (3) 相对于多信道数据广播调度算法 GREEDY 和 TOSA, OCSM 具有更强的自适应性,在不同的情况下都有较好的表现.

本文在如下几个方面需要进一步展开研究:(1) 在自适应信道划分与分配的基础上,研究索引策略,进一步缩短用户请求的调谐时间;(2) 考虑用户请求包含多个数据项的情况,研究相应的信道划分算法.

致谢 我们真诚地向对本文的工作给予支持和建议的审稿人、主编、编辑、同行、同学和老师表示感谢.

References:

- [1] Wang Q, Wu SJ, Li MS. Software defect prediction. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2008,19(7):1565–1580 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/1565.htm>
- [2] Li LJ, Liu HF, Yang ZY, Huang XY. Broadcasting methods in vehicular ad hoc networks. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2010,21(7):1620–1634 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3845.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03845]
- [3] Xuan P, Sen S, Gonzalez O, Fernandez J. Broadcast on demand: Efficient and timely dissemination of data in mobile environments. Real-Time Technology and Applications Symp., 1997,4(5):38–48.
- [4] Jung H, Chung Y, Liu L. Processing generalized k -nearest neighbor queries on a wireless broadcast stream. Information Sciences, 2012,188(4):64–79.
- [5] Yu C, Yao D, Li X, Zhang Y, Yang L, Xiong N, Jin H. Location-Aware private service discovery in pervasive computing environment. Information Sciences, 2012,230(5):78–93.
- [6] Simunic T, Boyd S, Glynn P. Managing power consumption in networks on chips. IEEE Trans. on Very Large Scale Integration Systems, 2004,12(1):96–107.
- [7] Sun W, Qin Y, Wu J, *et al.* Air indexing for on-demand XML data broadcast. IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems, 2014,25(6):1371–1381.
- [8] Zhao RQ, Liu ZJ, Wen AJ. An efficient energy-saving broadcast mechanism for wireless sensor networks. Chinese Journal of Electronics, 2009,37(11):2457–2462 (in Chinese with English abstract).

- [9] Xuan P, Sen S, Gonzalez O, Fernandez J, Ramamritham K. Broadcast on demand: Efficient and timely dissemination of data in mobile environments. In: Proc. of the 3rd IEEE Real-Time Technology and Applications Symp. Montreal: IEEE Real-Time Technology and Applications Symp., Vol.38. 1997. 38–48.
- [10] Lei M, Vrbsky SV, Xiao Y. Scheduling on-demand data broadcast in mixed-type request environments. *Computer Networks*, 2010, 54(5):811–825.
- [11] Kalyanasundaram B, Velauthapillai M. On-Demand broadcasting under deadline. In: Proc. of the 11th Annual European Symp. on Algorithms, Vol.2832. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2003. 313–324.
- [12] Ng J, Lee V, Hui C. Client-Side caching strategies and on-Demand broadcast algorithms for real-time information dispatch system. *IEEE Trans. on Broadcasting*, 2008,54(1):24–35.
- [13] Lu Z, Wu W, Li W W, *et al.* Efficient scheduling algorithms for on-demand wireless data broadcast. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Computer Communications. IEEE Infocom, 2016. 1–9.
- [14] Dewri R, Whitley D, Ray I, *et al.* Optimizing real-time ordered-data broadcasts in pervasive environments using evolution strategy. In: Proc. of the Parallel Problem Solving From Nature (PPSN X). LNCS, DBLP, 2008. 991–1000.
- [15] Liu CM, Su TC. Broadcasting on-demand data with time constraints using multiple channels in wireless broadcast environments. *Information Sciences*, 2013,242(2):76–91.
- [16] Aksoy D, Franklin M. $R \times W$: A scheduling approach for largescale on-demand data broadcast. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 1999,7(6):846–860.
- [17] Wu X, Lee VCS. Wireless real-time on-demand data broadcast scheduling with dual deadlines. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2005,65(6):714–728.
- [18] Hu W, Fan C, Luo J, *et al.* An on-demand data broadcasting scheduling algorithm based on dynamic index strategy. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2015,15(5):947–965.
- [19] Hu W, Xia C, Du B, *et al.* An on-demand data broadcasting scheduling considering the data item size. *Wireless Networks*, 2015, 21(1):35–56.
- [20] Saxena N, Pinotiti M. On-Line balanced k -channel data allocation with hybrid schedule per channel. In: Proc. of the 6th Int'l Conf. on Mobile Data Management. ACM Press, 2005. 239–246.
- [21] Yee WG, Navathe SB, Omiecinski E, Jermaine C. Efficient data allocation over multiple channels at broadcast servers. *IEEE Trans. on Computers*, 2002,52(10):1231–1236.
- [22] Waluyo A, Srinivasan B, Taniar D, Rahayu W. Incorporating global index with data placement scheme for multi channels mobile broadcast environment. In: Proc. of the Embedded and Ubiquitous Computing (EUC 2005). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. 755–764.
- [23] Lee W, Hu Q, Lee D. A study on channel allocation for data dissemination in mobile computing environments. *Mobile Networks and Applications*, 1999,4(2):117–129.
- [24] Gao X, Yang Y, Chen G, Lu X, Zhong HF. Global optimization for multi-channel wireless data broadcast with ah-tree indexing scheme. *IEEE Trans. on Computers*, 2015,65(7):2104–2117.
- [25] Lim JH, Naito K, Yun JH, Gerla M. Revisiting overlapped channels: Efficient broadcast in multi-channel wireless networks. In: Proc. of the 2015 IEEE Conf. on Computer Communications (INFOCOM). IEEE, 2015. 1984–1992.
- [26] Nawaz Ali GGM, Lee VCS, Chan E, Li M, Liu K, Lv JS, Chen J. Admission control-based multichannel data broadcasting for real-time multi-item queries. *IEEE Trans. on Broadcasting*, 2014,60(4):589–605.
- [27] Hu C, Chen M. Adaptive balanced hybrid data delivery for multi-channel data broadcast. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications 2002. IEEE, 2002. 960–964.
- [28] Zheng B, Wu X, Jin X, *et al.* TOSA: A near-optimal scheduling algorithm for multi-channel data broadcast. In: Proc. of the 6th Int'l Conf. on Mobile Data Management. ACM Press, 2005. 20–37.
- [29] Hu W, Qiu Z, Wang H, *et al.* A real-time scheduling algorithm for on-demand wireless XML data broadcasting. *Journal of Network and Computer Applications*, 2016,68:151–163.
- [30] He P, Shen H, Tian H. On-Demand data broadcast with deadlines for avoiding conflicts in wireless networks. *Journal of Systems and Software*, 2015,103(C):118–127.

- [31] Cacciatore S, Luchinat C, Leonardo T. Knowledge discovery by accuracy maximization. In: Proc. of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2014.
- [32] World Cup 98 Web site access logs. 1998. <http://ita.ee.lbl.gov/html/contrib/WorldCup.html>
- [33] Lu F, Du N, Wen CL. A fuzzy-evidential k nearest neighbor classification algorithm. Chinese Journal of Electronics, 2012,40(12): 2390–2395 (in Chinese with English abstract).

附中参考文献:

- [1] 王青,伍书剑,李明树.软件缺陷预测技术.软件学报,2008,19(7):1565–1580. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/1565.htm>
- [2] 李丽君,刘鸿飞,杨祖元,黄席樾.车用自组网信息广播.软件学报,2010,21(7):1620–1634. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3845.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03845]
- [8] 赵瑞琴,刘增基,文爱军.一种适用于无线传感器网络的高效节能广播机制.电子学报,2009,37(11):2457–2462.
- [33] 吕锋,杜妮,文成林.一种模糊-证据 k NN 分类方法.电子学报,2012,40(12):2390–2395.



胡文斌(1976—),男,湖北武汉人,博士,副教授,博士生导师,主要研究领域为人工智能与智能仿真优化,社会网络仿真与优化,大数据分析 with 优化理论,智能计算与智能决策,智能交通系统.



王欢(1989—),男,博士生,主要研究领域为社会网络仿真与优化,大数据分析 with 优化理论,智能交通系统.



邱振宇(1992—),男,硕士生,主要研究领域为社会网络仿真与优化,大数据分析 with 优化理论,智能交通系统.



严丽平(1980—),女,博士生,主要研究领域为社会网络仿真与优化,大数据分析 with 优化理论,智能交通系统.



聂聪(1993—),男,硕士生,主要研究领域为智能仿真与优化.



杜博(1983—),男,博士,副教授,博士生导师,CCF 专业会员,主要研究领域为人工智能,图像分析.