

# 基于变周期数据广播的缓存一致性维护

邵雄凯<sup>1</sup>, 郭卫华<sup>1</sup>, 李莉<sup>2</sup>

(1. 湖北工业大学 计算机学院, 湖北 武汉 430068;

2. 湖北工业大学 电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430068)

**摘要:** 为了提高移动计算环境中缓存数据效率, 在分析现有成果的基础上, 提出了基于变周期数据广播的缓存一致性维护的策略。该策略根据数据的访问用户数目以及数据更新的频率等方法来动态调整服务器广播数据更新报告的频率及内容, 在客户端接收服务器广播的数据更新报告后将缓存中已被更新过数据项的值用新值替换掉, 而不直接将该数据项立即移出缓存。通过对该方法进行性能的分析, 表明该方法能良好地适应数据更新频率不断变化的移动数据计算环境。

**关键词:** 数据缓存; 数据广播; 更新报告

**中图分类号:** TP311

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-629X(2007)03-0077-04

## Cache Consistency Maintenance Based on Aperiodic Broadcast

SHAO Xiong-kai<sup>1</sup>, GUO Wei-hua<sup>1</sup>, LI Li<sup>2</sup>

(1. School of Computer Science and Technology, Hubei University of Tech., Wuhan 430068, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei University of Tech., Wuhan 430068, China)

**Abstract:** In order to improve the efficiency of cache data in mobile environment, technology of related work are analyzed, and a strategy is proposed to maintain the cache consistency based on aperiodic broadcast. The strategy can adjust dynamically the frequency and content of data updating record according to the MC number and the data updating frequency, and the MCs will replace the data with its new value instead of clearing invalidated data item in the cache when they receive the updating record. Through performance analysis of the approach, it can perfectly adapt to the mobile computing environment which data updating frequency changes continuously.

**Key words:** data cache; data broadcast; updating record

## 0 引言

移动计算环境为移动客户机(MC)随时随地访问数据提供了基础, 它的应用前景已越来越广阔。与基于固定网络的传统分布式计算环境相比较, 移动计算环境有许多不同之处, 如: 移动性、频繁断接性、网络条件的多样性和非对称性等。由于这些特性的存在, 使得传统的数据库管理与访问技术在移动数据库中不能适用或不能完全适用, 因此必须针对移动计算的特点对这些技术展开进一步研究。移动客户机为了提高平均响应速度, 提高数据的可用性, 减少对网络带宽的争用, 通常在本地缓存部分经常使用数据。但是, 移动客户机中缓存的数据如何同固定服务器中的数据保持一致的问题又摆在了人们的面前。关于缓存一致性的维护问题, 国内外已经进行了广泛深入的研究。在这方

面的主要研究成果有:

1) 文献[1]中提出了基于广播失效报告的方法来维护移动客户机中缓存的一致性, 称为广播时间印方法(TS)。服务器把最后一次报告后又持续一定的时间内发生了改变的数据项, 按更新的时间组合成一个失效报告 IR(Invalidation Report), 移动客户机收听失效报告, 修改缓存的状态。对每一个缓存项, MC 要么把它从缓存中清除掉; 要么就把缓存项的时间印修改为失效报告的时间印。为了节省电能, MC 可能经常处于休眠状态, 仅在 IR 广播时才处于活动状态。但移动客户机可能长时间处于断连状态而错失了失效报告 IR。由于 IR 中包含了过去  $\omega$  个广播间隔中的历史更新情况, 只要 MC 断连的时间不超过  $\omega \times L$  (IR 的广播周期为  $L$  秒, 失效报告时间窗口的大小包括  $\omega$  个广播周期), 它仍然能够使本地 Cache 与服务器保持一致性。但该方法的缺点是对数据请求的回答需要较长时间, 平均延迟达到  $L/2$ 。

2) 文献[2]针对上述查询延迟时间长的缺点, 提

收稿日期: 2006-06-05

基金项目: 湖北省自然科学基金资助项目(2006ADA029)

作者简介: 邵雄凯(1963-), 男, 湖北武汉人, 博士, 副教授, 研究方向为分布式及移动数据库。



出了在 IR 的间隔期内重复传播  $m$  次 IR 的方法(简称为 UIR 方法),因此,MC 的平均延迟时间仅为  $L/m$  就可以得到查询响应。由于 IR 中包含了大量的更新历史信息, $m$  次重复完整的 IR 可能会消耗大量的广播带宽。为了节省广播带宽,在一个 IR 之后, $m-1$  个被更新的失效报告 UIR 被插入到 IR 的间隔之中,每个 UIR 中仅包含最后一次 IR 之后被更新的数据项。采用该方法,UIR 中的数据量就大大减少了,只要 MC 每次都下载最新的 IR,它就能够使用 UIR 来校验它的缓存。

3) 文献[3,4] 提出了立即读模式,前述的广播时间印方法实质上是延迟存取模式,在失效报告广播期间,MC 中任何的读操作将被推迟,即在  $[t_{i-1}, t_i]$  之间的读操作要在  $t_i$  时间的 IR 到来之后才能进行读,该方法能够始终保证读到最新的数据项,但它也很明显地失去了移动客户机缓存可用性的优点。失效报告可能产生的是一个“假警报”,但事实上本地缓存是有效的,于是就产生了一个不必要的读延时。立即读模式就是在  $[t_{i-1}, t_i]$  间隔期间的任何读操作将立即从本地 Cache 中读取数据项,MC 不必再等到下一个间隔。该模式的优点就是充分利用了客户机缓存的可用性。虽然有可能读取失效的数据,但在随后的一致性检查中将会被发现。校验可串行化的模式是比较事务读集合各数据项的时标与服务器上对应的数据项的最后更新时标,称该模式为“带更新时标的优化并发控制”。并且许多校验工作由 MC 来完成,因此校验是一个纯分布式处理,减轻了服务器的负担。

4) 文献[5] 中提出了基于节约电能的缓存一致性方法。在广播缓存失效报告开始之后,首先广播数据的 ID 列表  $L_{\text{list}}$ ,然后再广播数据,用户只需要在  $L_{\text{list}}$  保持期间保持工作,再在需要的数据广播时工作,这样节省了许多电能,同时请求回答的延时时间也因为  $m$  次重复 UIR 而降低了很多。

5) 文献[4] 提出了立即广播失效报告的方法,在该模式中,在提交请求到达后,失效报告被立即广播,因而在周期广播中可能会发生冲突的事务可以提前避免,于是该方法可以减少事务处理的夭折率,已经发送提交请求的事务的阻塞时间也被减少。但该方法有如下缺点:

① 立即广播失效报告几乎不能支持移动客户机 MC 的断连,MC 一旦有断连发生,因为它不知道在断连期间是否有失效报告产生,因而就不得不失效整个移动客户机的缓存。

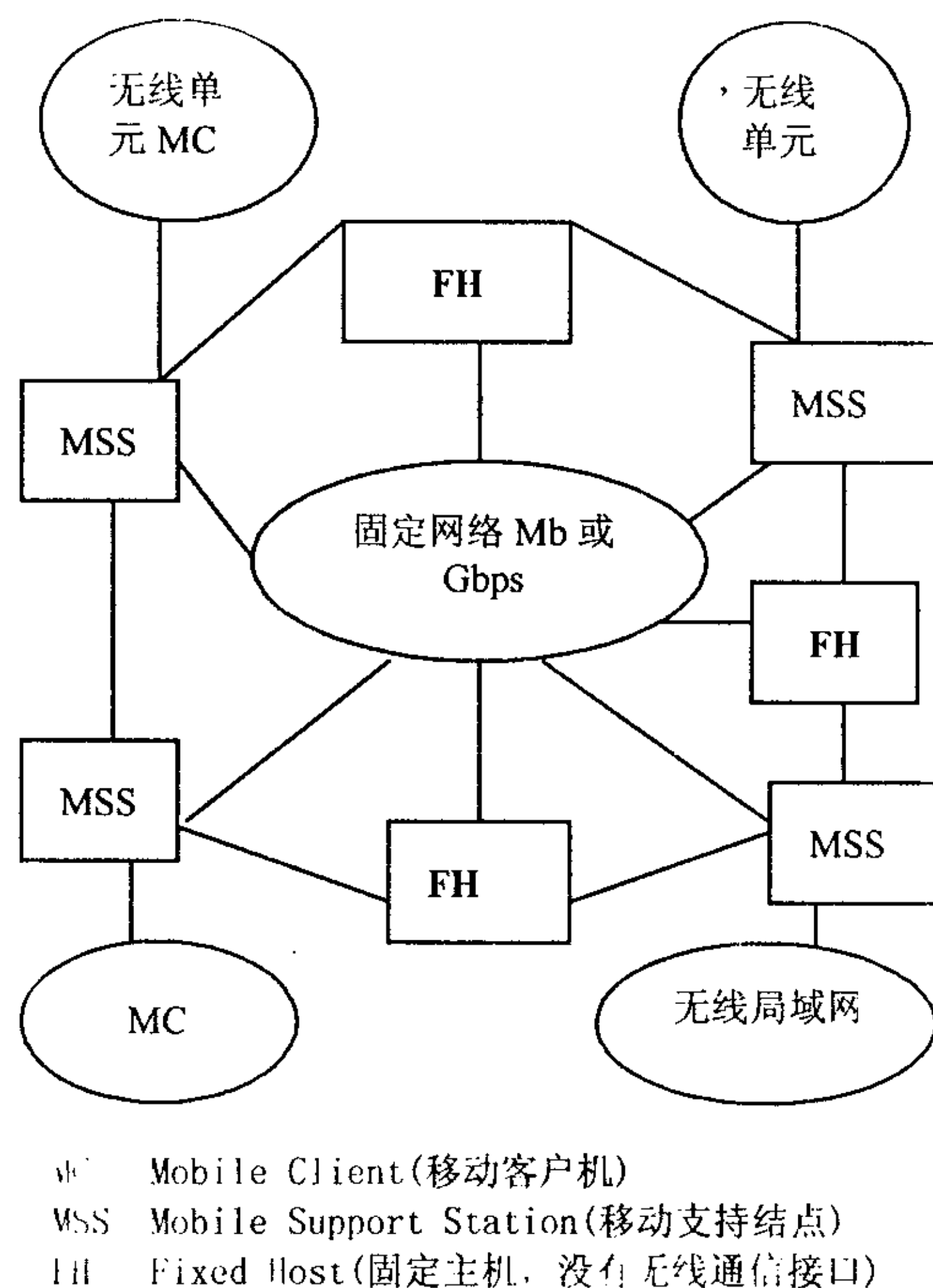
② 该方式也不利于节电,因为 MC 必须一直处于工作状态,不能处于休眠状态。

③ 当数据更新频率较高时,广播失效报告的频率

也就很频繁,MC 就需要频繁地收听失效报告,因而会降低事务处理的吞吐量,同时还会浪费有限的网络带宽。

## 1 移动计算环境典型模型

一般移动环境的结构包括两个不同的部分:移动主机(简称 MC)和固定服务器(简称 FH),固定服务器中的一部分带有无线通信接口,称之为移动支持基站(MSS)。MSS 通过无线网络与移动单元(Cell)中的移动主机 MC 进行通信<sup>[6]</sup>。固定服务器之间通过固定网络进行通信,它的通信网络比较可靠,且带宽可达到  $10 \sim 100 \text{ Mb/s}$ 。但无线网络的带宽只有  $10 \sim 20 \text{ kb/s}$ ,且可靠度不如固定网络。移动计算环境的一种典型结构如图 1 所示。



文中假定每个 MC 中能够按语义从 FH 中缓存数据,MC 有独立执行事务的能力,但事务可串行化的检查和对数据项的更新是在 FH 中实现,如果 MC 的本地缓存中不存在它请求的数据项,则它就向 FH 发送一个读请求信息并从中缓存数据项。还假定 MC 只能串行地产生和执行事务。

## 2 变周期广播策略

### 2.1 变周期广播

在实际应用中,有些数据可能同时被许多移动用户 MC 访问,数据的更新频率很高,而有些数据则只有一个或很少几个移动用户 MC 使用,更新的频率也相对低。根据用户的数量和更新频率的高低,将数据分



为热集(HotdataSet)和非热集(NormaldataSet)。

定义1(热集、非热集):同时被多个MC访问,且更新频率较高数据集合称之为热集(HotdataSet);被较少的用户访问,更新频率相对也较少的数据集合称之为非热集(NormaldataSet)。

由于HotdataSet中的数据可能同时被许多用户访问,因此,发生数据冲突的可能性较大。为了让更多的移动事务能够提交,对于这些数据的更新应该及时通知主机,从而使更多的事务能够尽快完成,文中采取的是立即广播更新报告。

而对于非热集中数据,由于访问的用户较少、更新的频率较低,所以,延迟对这些数据更新的广播并不会影响太多事务的提交,可以根据系统设定的时间进行周期性广播。但有时非热集中的数据更新频率也很高,此时如果服务器仍然按照固定的周期进行更新广播,就会使得较多的事务处于等待状态。笔者的策略是在固定服务器中对非热集数据设置一个数据更新频率计数器U\_Couter,每当有数据项更新时U\_Couter就加1。设C为数据项更新次数临界值,L为预定的广播时间间隔, $T_{i-1}$ 为上一次广播时间, $t_i$ 为当前时间。如果符合下列条件之一,服务器就立即广播更新报告。

① 当  $t_i - T_{i-1} \geq L$  时立即广播更新报告  $UR(T_i)$ , U\_Couter 清零,重新计数。

② 当  $t_i - T_{i-1} < L$  时,若  $U\_Couter \geq C$ ,就立即广播更新报告  $UR(T_i)$ , U\_Couter 清零,重新计数。

上述表明:当更新频率高时,则广播周期短;当更新频率低时,则广播周期长。因而称之为变周期广播。但在L周期内至少广播一次更新报告UR。

## 2.2 缓存一致性维护

文献[1]中,采用的办法是失效更新数据项的方法。即固定服务器中数据项j被更新,MC中对应的数据项j失效(清除MC中数据项j)。但该数据项j也许是MC中下一个事务就要请求的数据项,为了避免这种情况的发生,对该方法改进如下:Server更新—MC更新,即不是清除失效的数据项j,而是用更新值来替换数据项j。

定义2:在Server上保持一个更新列表 $U_i$ ,定义为:

$$U_i = \{[j, D_j] \mid j \in D, \text{其中 } D_j \text{ 是 } j \text{ 更新后的值}\}$$

定义3:更新报告  $UR(T_i)$  定义为:

$$UR(T_i) = \{T_{i-1}, T_i, U_i\}$$

定义4:在MC上保持一个请求列表 $Q_i$ ,定义为:

$$Q_i = \{j \mid \text{在 } [T_{i-1}, T_i] \text{ 两次广播之间的对 } j \text{ 的请求}\}$$

求}

在MC中应保持最后一次接收失效报告的时间 $T_{last}$ 。接收到更新报告  $UR(T_i)$  时,MC执行下列算法维护本地缓存的一致性:

if( $T_i - T_{last} \leq T_i - T_{i-1}$ ) {清除整个缓存数据}

else {

for(每个缓存中的数据项j) {

if(j在 $UR(T_i)$ 中){用j新值替换旧值}

}

for( $j \in Q_i$ ) {

if(j在缓存中){使用缓存中的j的值}

else {请求连结获取j的值}

$T_{last} := T_i$

}

长期使用Server更新—MC更新的方法会很容易造成存储空间的不足,此处仍旧采用LRU替换算法。

## 2.3 性能分析

文中提出的变周期更新报告广播方法同周期性广播和立即广播失效报告方法相比,主要是节省广播报告费用和减少MC上事务的平均延时。下面从这两个方面进行比较。

设各参数意义如下:

$m$ —MC的数量;

$\lambda$ —MC中单位时间平均事务发生率;

$b_j$ —平均每个数据项标号占用的位数;

$b_t$ —平均每个时标占用的位数;

$b_d$ —平均每项数据值占用的位数;

$W$ —广播网络的带宽;

$k$ —平均每个事务中更新数据项的数量;

$q$ —更新涉及热集中数据的平均发生率;

$f$ —更新涉及非热集中数据的频率高于C的发生率。

现在广播费用都是按时长计算,设1个最小计时单位费用为1。

在报告UR中,每个更新数据项的定义为:

周期广播  $U_i = [j, t_j]$ ,其中j为数据项, $t_j$ 为对该数据项操作的时间标号;

立即周期广播中  $U_i = [j]$ ,其中j为数据项;

变周期广播中  $U_i = [j, D_j]$ , $D_j$ 为j的数值。

下面以一个周期T为例来计算各种模式的广播报告费用和MC上事务的平均延时。

### 2.3.1 周期广播模式

广播的信息量为  $\lambda \cdot k \cdot (b_j + b_t) \cdot m \cdot T$  位,广播费用为



$$\text{Cost}_1 = \lceil \frac{\lambda \cdot k \cdot (b_j + b_t) \cdot mT}{w} \rceil = \lceil \frac{k \cdot (b_j + b_t)}{w} \cdot \lambda \cdot mT \rceil \leq \lambda \cdot mT$$

MC 中事务的平均延迟为  $\text{Delay}_1 = \frac{T}{2}$ 。

### 2.3.2 立即广播模式

在时间  $T$  内将有  $\lambda \cdot m \cdot T$  个事务提交,需要广播  $\lambda \cdot m \cdot T$  次,每次的广播时长为  $\frac{k \cdot b_j}{w} \leq 1$ ,按 1 个单位计费。

广播费用  $\text{Cost}_2 = \lambda \cdot m \cdot T$

MC 中事务的平均延迟为  $\text{Delay}_2 = \frac{1}{2m \cdot \lambda}$ 。

### 2.3.3 变周期广播模式

假设在时间  $T$  内,可产生  $\lambda \cdot m \cdot T$  个事务,为了便于说明在变周期广播模式下广播费用和 MC 中事务的平均延迟,特分如下两种情况:

1) 假设所有事务更新的数据都涉及到热集中的数据,即立即广播更新报告:

$$\text{Cost}_I = \lambda \cdot m \cdot T; \text{Delay}_I = \frac{1}{2m \cdot \lambda}$$

2) 假设所有的事务更新的数据都在非热集中:在这种情况下分两种情形:

(1) 当  $t_i - T_{i-1} \geq L$  时,则相当于服务器期广播数据更新报告,即有

$$\text{Cost}_{FP} = \lceil \frac{k \cdot (b_j + b_d)}{W} \cdot \lambda \cdot m \cdot T \rceil \leq \lambda \cdot m \cdot T;$$

$$\text{Delay}_{FP} = \frac{T}{2}$$

(2) 当  $t_i - T_{i-1} < L$  且  $U\_Couter \geq C$ ,需要广播  $\lceil \frac{\lambda \cdot m \cdot T}{C} \rceil$  次,每次的信息量为  $C \cdot k \cdot (b_j + b_d)$  位,每次广播时长为  $\frac{C \cdot k \cdot (b_j + b_d)}{w} \leq 1$ ,按 1 个单位计费。

因此广播的费用  $\text{Cost}_3 = \lceil \frac{\lambda \cdot m \cdot T}{C} \rceil \leq \lambda \cdot m \cdot T$ ,

事务的平均延迟为  $\text{Delay}_3 = \frac{C}{2m \cdot \lambda}$ 。

上述模式的性能进行比较如下:

· 广播的费用:

$$\lceil \frac{k \cdot (b_j + b_t)}{w} \cdot \lambda \cdot m \cdot T \rceil \leq \lambda \cdot m \cdot T$$

$$\lceil \frac{\lambda \cdot m \cdot T}{C} \rceil \leq \lambda \cdot m \cdot T$$

即:  $\text{Cost}_1 \leq \text{Cost}_2; \text{Cost}_3 \leq \text{Cost}_2$

· 事务的平均延迟:

$$\frac{1}{2m \cdot \lambda} \leq \frac{C}{2m \cdot \lambda} \leq \frac{T}{2}$$

即:  $\text{Delay}_2 \leq \text{Delay}_3 \leq \text{Delay}_1$

所以变周期广播模式下的广播费用为:  $\text{Cost} = \text{Cost}_I \cdot q + [\text{Cost}_{FP} \cdot f + \text{Cost}_3 \cdot (1 - f)](1 - q)$

事务的平均延迟时间为:

$$\text{Delay} = \text{Delay}_I \cdot q + [\text{Delay}_{FP} \cdot f + \text{Delay}_3(1 - f)](1 - q)$$

如果  $q = 1$ ,变周期广播更新报告退化为立即广播更新报告,若  $q = 0$  且  $f = 1$ ,则变周期广播更新报告退化为定时广播更新报告,故变周期广播数据更新报告的兼有二者的优点,即是:  $\text{Cost} \leq \text{Cost}_2, \text{Delay}_2 \leq \text{Delay} \leq \text{Delay}_1$ 。

综上所述,动态变周期广播更新报告策略能够良好地适应数据更新频率不断变化的移动数据库环境,在平衡广播费用和平均延时这两个方面的性能有可取之处。

## 3 小 结

文中提出了用变周期广播缓存更新报告的方法维护缓存的一致性。充分利用了及时更新和定时更新模式的优点,经过分析和性能比较可知:该方法提高了移动环境中缓存数据的效率,可以适用各种无线网络环境。

### 参考文献:

- [1] Barbara D, Imielinski T. Sleepers and Workaholics: Caching Strategies in Mobile Environments[C]//In: Proceedings of ACM SIGMOD Int'l Conference. New York: ACM Press, 1994:1-12.
- [2] Cao G. A Scalable low-latency Cache Invalidation Strategy for Mobile Environments[C]//In: Proceedings of ACM Int'l Conf. Computing and Networking (MobiCom). New York: ACM Press, 2000:200-209.
- [3] Lee S K, Hwang C S, Yu H C. Caching and Concurrency Control in Mobile Client-Server Database Systems[C]//In: Proceedings of International Conference on Cooperative Databases and Applications. IEEE, NJ, USA: [s. n.], 1999:227-238.
- [4] Chung Y I I, Hwang C S. Transactional Cache Management with Aperiodic Invalidation Scheme in Mobile Environments [C]//In: Proceedings of the 5th Asian Computing Science Conference on Advances in Computing Science. London: Springer-Verlag, 1999:50-61.
- [5] Cao G H. Proactive Power-Aware Cache Management for Mobile Computing Systems[J]. IEEE Transactions on Computers, 2002, 51(6):608-621.
- [6] 贾 焰,王志英,韩伟红,等. 分布式数据库技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2000:180-209.