

doi:10.3969/j.issn.1001-2400.2013.02.002

# 异构多接入网并发传输的时延界分析及分流策略

马 骁, 盛 敏, 张 琰

(西安电子科技大学 综合业务网理论及关键技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 针对异构网络并发传输时分流策略如何使系统性能最大化的问题,建立了分析异构多接入网络并发传输端到端时延的等效排队论模型,并由此模型获得了并发传输系统的理论时延界.在此基础上,提出了多接入网间资源联合调度的分流策略,包括最短等待时延分流策略和统一队列管理分流策略.在两异构网络并发传输系统中,通过二维马尔科夫链对最短等待时延分流策略和统一队列管理分流策略的时延性能进行了分析.仿真结果表明,这两种分流策略在保证最优吞吐量不变的前提下有效地降低了系统的平均时延,在高负载情况下可逼近理论时延界.同时,最短等待时延分流算法可显著地降低并发传输的时延抖动.

**关键词:** 异构网络;并发传输;分流策略

**中图分类号:** TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2013)02-0005-08

## Delay bound analysis and splitting strategies of concurrent transmission in heterogeneous networks

MA Xiao, SEHGN Min, ZHANG Yan

(State Key Lab. of Integrated Service Networks, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

**Abstract:** We focus our attention on how to get optimal performance of concurrent transmission in heterogeneous networks. An equivalent queuing model is used to analyze the end-to-end delay performance of perfect splitting strategy with the theoretical delay bound found. Furthermore, two splitting algorithms, Minimum Queuing Delay based splitting strategy (MQD) and Unified Queuing Management Based Splitting Strategy (UQM), are presented based on the joint resources scheduled in different RATs (Radio Access Technology). In the two-RAT scenario, the two-dimensional discrete-state continuous-time Markov process is used to analyze our schemes with close-formed solutions found. Simulation results demonstrate that our proposed flow splitting strategies utilize the system resources efficiently and outperform current strategies, getting close to the theoretical delay bound especially in the heavy load region.

**Key Words:** heterogeneous network; concurrent transmission; flow splitting strategy

随着无线网络不断地发展,各种无线接入技术(Radio Access Technology, RAT)的传输速率都逐渐逼近了香农容量,通过单个接入网络的优化来提高用户传输速率变得越来越困难<sup>[1]</sup>.如何高效地管理和调度不同无线接入技术的资源就成为下一代无线网络传输速率突破的关键.目前,异构网络融合<sup>[2-3]</sup>已成为通信领域的研究热点,特别是如何应用多无线接入技术并行传输来提高网络的性能得到了广泛的重视<sup>[4]</sup>.所谓多无线接入技术并行传输,就是将多种异构的无线接入技术视为多个并行的传输信道,将业务分组在多个无线接入技术上并行传输,即同时使用多种无线接入技术对用户进行服务(如数据下载业务,即从多个无线接入技术同时下载数据).图1所示为多无线接入技术并行传输的系统模型,处于RAT<sub>1</sub>和RAT<sub>2</sub>重叠覆盖区域的

收稿日期:2011-11-14

网络出版时间:2012-11-16

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(60972048,61172079);国家重点基础研究发展计划(973计划)课题资助项目(2009CB320404);教育部创新团队111资助项目(B08038);国家重大专项资助项目(2010ZX03003-001,2011ZX03003-002-02);国家重点实验室专项基金资助项目(ISN01080301)

**作者简介:**马 骁(1984-),男,西安电子科技大学博士研究生,E-mail: xiaoma@mail.xidian.edu.cn.

**网络出版地址:**http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1076.TN.20121116.0924.201302.8.008.html

多模终端(Multimode User Equipment, MUE)能够同时接入到这两个网络中.一旦该多模终端产生单个网络无法承载的高速数据传输业务时,就会同时申请多个无线接入技术的资源进行并行业务传输.为了实现多无线接入技术并行传输,需要在现有网络架构中引入一个新的功能实体——MRRM(Multi-Radio Resource Management)<sup>[5]</sup>,其位置处于核心网(Core Network, CN)和多个无线接入技术之间,一方面管理每个无线接入技术的资源状态,另一方面执行分流策略(将下行的数据流分配至各个无线接入技术中).显然,在 MRRM 中采用何种数据分流管理策略是多无线接入技术并发传输能否提高系统性能的关键.

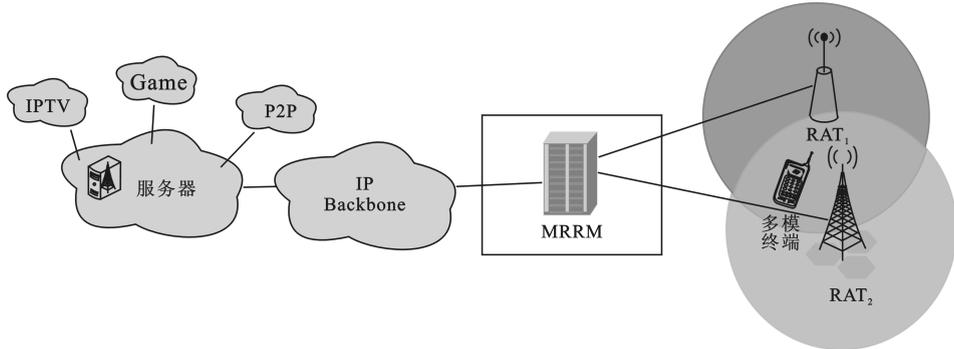


图 1 异构网络中并发传输系统模型

目前,在异构网络融合场景下的多无线接入技术并行传输已经取得了初步的研究成果.文献[6]通过引入通用链路层(Generic Link Layer, GLL)提出了一种多网并发传输的网络融合构架,从网络结构的角度说明了多网并发传输的可行性.文献[7]描述了一种基于并发传输的多网资源分配方法,通过修改固定的分流比例来优化并发传输性能.文献[8]引入了一个非合作的博弈模型来解决多个网络向同一用户分配资源的问题,并通过解纳什均衡点求出最优分配策略.这些文章只研究了多网并发时的资源分配问题,并没有给出具体的数据分流策略.文献[5]一方面证明了并发传输能提高总吞吐量,另一方面应用注水模型提出了一种按网络传输速率的比例进行分流的分流策略,并证明这种按比例分流的策略能得到最大吞吐量.文献[9]将并发传输的问题扩展到多用户情况下,即一个并发传输用户和多个普通单路传输用户共存时的数据传输问题,并用 PS(Processor Sharing)队列模型分析了系统性能.这种按固定比例分流的策略虽然能在保证系统稳定的前提下达到最大吞吐量,但是这种策略将多个无线接入技术独立开来,成为多个互不相关的独立网络,从而无法得到真正的多无线接入技术联合调度增益(MultiRadio Transmission Diversity, MRTD).尤为值得注意的是,上述研究成果均将分组缓存在各个无线接入技术中,即 MRRM 仅负责根据某种策略进行分流,而忽略了队列管理和 MRRM 分流策略之间的内在联系.

针对上述问题,笔者首先通过排队论对异构网络并发传输场景进行建模,分析并得出使用理想分流策略时并发传输系统的等效排队模型,计算出了使用理想分流策略时的理论时延界.然后,提出了联合队列管理的、综合考虑各无线接入技术传输能力和实时状态的分流策略,实现了多无线接入技术间的联合调度,包括最短等待时延分流策略(Minimum Queuing Delay based splitting strategy, MQD)和统一队列管理分流策略(Unified Queuing Management based splitting strategy, UQM).

## 1 并发传输端到端时延理论界

定义由  $n(n \geq 2)$  个重叠覆盖且互不干扰的无线接入技术组成的异构网络 HN 为  $\{RAT_1, RAT_2, \dots, RAT_n\}$ ,其中  $RAT_i$  为 HN 中第  $i$  个无线接入技术,其服务过程为服从参数为  $\mu_i$  的泊松过程.假设一个进行并发传输的多模终端的分组到达过程为泊松过程,到达率为  $n\lambda$ .由于并发传输是指用户可以同时将数据在  $n$  个无线接入技术并行传输,因此,可以将每个无线接入技术看做一个单独的服务员.多个无线接入技术对应的多服务员共同为一个多模终端用户服务.此时,异构多接入网络并传场景就可以被等效为一个  $M/M/n$  排队系统,如图 2(a)所示.

对于这种并发传输网络,每个无线接入技术无法得知整个网络数据到达情况和其他无线接入技术的服务能力,只能传输 MRRM 分流至自己的数据分组.即使存在一些处于空闲状态的无线接入技术,也无法服

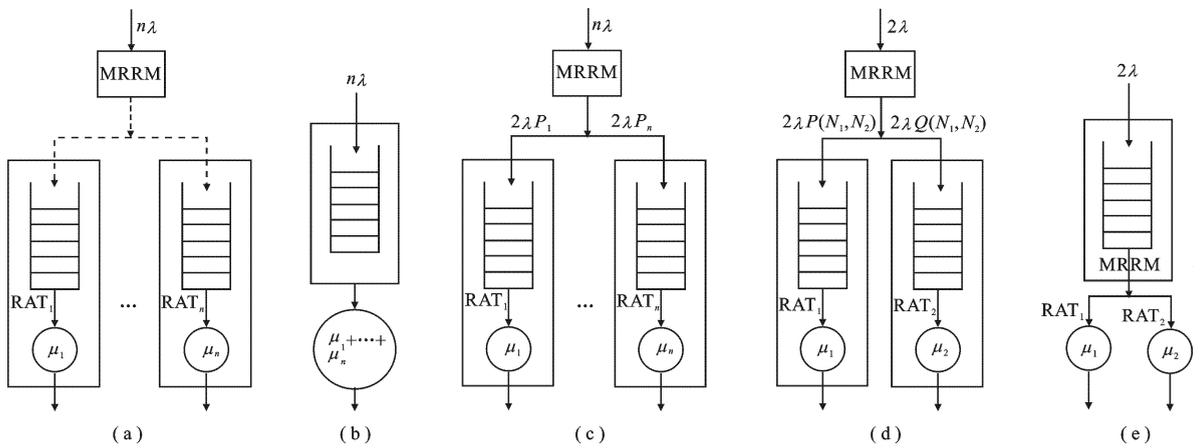


图 2 各种分流策略对应系统的模型

务其他无线接入技术的分组,所以并发传输性能的好坏主要由分流策略的优劣所决定.在理想情况下,如果所有的无线接入技术(对应为  $n$  个服务员)可以共同为一个多模终端的业务分组服务,则能够避免由于随机性导致的某些无线接入技术过载而另一些无线接入技术出现空闲的情况,从而达到资源的最大化利用.此时,整个网络可等效为将多个无线接入技术的传输能力统计复接为一个拥有多无线接入技术传输能力之和的高速网络,并将到达的分组通过这一高速网络进行传输.在这种情况下,  $n$  个异构网络的资源被完全统一管理,达到最理想的状态,对应的模型为一个服务能力为  $\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n$  的  $M/M/1$  排队模型.由排队理论可知<sup>[10]</sup>,在相同系统业务到达率和相同的总服务能力的条件下,高速复接的  $M/M/1$  排队系统具有最小的平均时延.高速复接  $M/M/1$  排队系统的时延值为

$$D_{opt} = 1 / \left( \sum_{i=1}^n \mu_i - n\lambda \right) \quad (1)$$

在相同系统到达率和系统总的服务能力的前提下,不论何种分流策略,其系统的平均时延都将大于式(1).所以式(1)给出了异构网络多无线接入技术并发分流传输时的时延下界.

现有的并发传输中,性能较好、研究较充分的分流策略都是根据无线接入技术的传输能力按照某种固定比例进行分流(Fixed Probability strategy, FP)<sup>[5,7,9]</sup>的.根据固定比例分流策略的分流原则,MRRM 将分组分配到  $RAT_i$  的概率  $P_i = \mu_i / \sum_{i=1}^n \mu_i$ ,且  $\sum_{i=1}^n P_i = 1$ .

根据泊松过程的性质,到达 MRRM 的分组按照一定的比例分流后形成  $n$  条数据流,为  $n$  条相互独立的且分别服从参数为  $n\lambda P_i$  的泊松过程,同时  $n$  个无线接入技术的服务能力相互独立,所以固定比例进行分流策略可以等效为图 2(c)所示的队列模型,即  $n$  个网络可以等效为  $n$  个独立的  $M/M/1$  队列模型.此时数据分组的平均时延为

$$D_{FP} = \sum_{i=1}^n (P_i D_i) = \sum_{i=1}^n \left( \frac{P_i}{\mu_i - (P_i n\lambda)} \right) = \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{\left( \frac{\mu_i}{P_i} \right) - n\lambda} \right) = \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{\sum_{j=1}^n \mu_j - n\lambda} \right) = \sum_{i=1}^n D_{opt} = n D_{opt} \quad (2)$$

其中,  $D_i$  为  $RAT_i$  所形成队列的分组平均时延.

根据式(2),可得  $D_{FP} = n D_{opt}$ . 又因为  $D_{opt} > 0$ ,所以  $D_{FP} > D_{opt}$ ,即固定比例分流策略在性能上与理论上限有很大的差距,而且异构网络中可用的无线接入技术数量越多,固定比例分流策略的性能与理论上限差别越大.可见固定比例分流策略并不是一种最优的分流策略,原因是按照固定比例分流只考虑了无线接入技术的传输能力,没有考虑实时的状态信息,所以将多个无线接入技术独立开来,无法获得多无线接入技术联合调度增益.另外,由于固定比例分流策略其自身的随机性,会导致这种分流策略无法解决系统达到率和服务能力随机性引起的系统性能的损失,即有可能出现某些无线接入技术较为空闲而另一些无线接入技术异常繁忙的情况.

正是由于上述的原因导致固定比例分流策略的性能与理论上限相差很大.针对这些问题,笔者提出了两种新的分流方法,分别考虑了无线接入技术的队列状态和新的数据分组管理构架,在时延性能上逐渐逼近分

流策略的端到端时延理论限.

## 2 多无线接入技术并发分流策略

为了有效地实现多无线接入技术间的联合调度,笔者首先提出了在无线接入技术侧进行队列管理的基于最短排队时延的分流策略,综合考虑了信道的传输能力和业务的到达情况,选择最优的无线接入技术进行分流.同时,针对在 MRRM 里同时实现队列管理和分流的场景,提出了统一队列管理的分流策略,进一步提升了系统性能.

### 2.1 最短等待时延分流策略

最短等待时延分流策略的基本思想是将到达 MRRM 的分组分配到等待时延最短的无线接入技术中.假设网络在  $t$  时刻缓存的数据分组的个数  $N(t) \triangleq \{N_{\text{RAT}_1}(t), N_{\text{RAT}_2}(t), \dots, N_{\text{RAT}_n}(t) \mid t \geq 0, n \geq 2\}$ , 其中  $N_{\text{RAT}_i}(t)$  为  $\text{RAT}_i$  在  $t$  时刻缓存的数据分组个数.由于网络的到达和离开过程都是泊松过程,即系统具有无记忆性,所以  $N(t)$  可以表示成一个离散状态连续时间马尔科夫链,其稳态概率可以表示为  $\pi = [\pi_{N(t)}]$ .令  $W_{\text{RAT}_i}(t) = N_{\text{RAT}_i}(t) / \mu_i$ , 为  $t$  时刻到达  $\text{RAT}_i$  的数据包的等待时延,则根据最短等待时延分流策略, $t$  时刻到达系统的数据包将根据以下的结果被分配到相应的无线接入技术中:

$$S_{\text{RAT}_{\text{opt}}} = \arg \min_{\text{RAT}_i \in \text{HN}} \{W_{\text{RAT}_i}(t)\} . \quad (3)$$

为简单起见,下面以两个独立无线接入技术的异构网络为例对系统性能进行分析.当  $n=2$  时, $N(t)$  可以描述成如图 3 所示的二维马尔科夫链.图中  $k$  和  $l$  分别表示两个无线接入技术的缓存大小.假设  $k$  和  $l$  足够大,即不考虑由于缓存溢出导致的丢包. $P_{i+1,j}$  和  $Q_{i,j+1}$  分别表示从状态  $(i,j)$  转移到  $(i+1,j)$  和  $(i,j+1)$  的概率,可表示为

$$\begin{cases} P_{i+1,j} = 1 & , & Q_{i,j+1} = 0 & , & \text{当 } W_{\text{RAT}_1} \leq W_{\text{RAT}_2} & , \\ P_{i+1,j} = 0 & , & Q_{i,j+1} = 1 & , & \text{当 } W_{\text{RAT}_1} > W_{\text{RAT}_2} & . \end{cases} \quad (4)$$

从图 3 可以看出,状态  $(i,j)$  只能转移至状态  $(i-1,j)$ 、 $(i+1,j)$ 、 $(i,j-1)$  和  $(i,j+1)$ , 即该二维马尔科夫过程是一个生灭过程,所以该过程的稳态转移概率可以由矩阵几何法<sup>[10]</sup> (Matrix-Geometric Method, MGM)解得,即

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{0,0} & \mathbf{C}_{0,1} & 0 & \cdots & 0 \\ \mathbf{B}_{1,0} & \mathbf{A}_{1,1} & \mathbf{C}_{1,2} & \cdots & 0 \\ 0 & \mathbf{B}_{2,1} & \mathbf{A}_{2,2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{B}_{k,k-1} & \mathbf{A}_{k,k} \end{pmatrix} , \quad (5)$$

$$\mathbf{A}_{i,i} = \begin{pmatrix} a_{i,0} & 2Q_{i,1}\lambda & 0 & \cdots & 0 \\ \mu_2 & a_{i,1} & 2Q_{i,2}\lambda & \cdots & 0 \\ 0 & \mu_2 & a_{i,2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & a_{i,l} \end{pmatrix} , \quad (6)$$

$$\mathbf{B}_{i,i-1} = \begin{pmatrix} \mu_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mu_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \mu_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \mu_1 \end{pmatrix} , \quad (7)$$

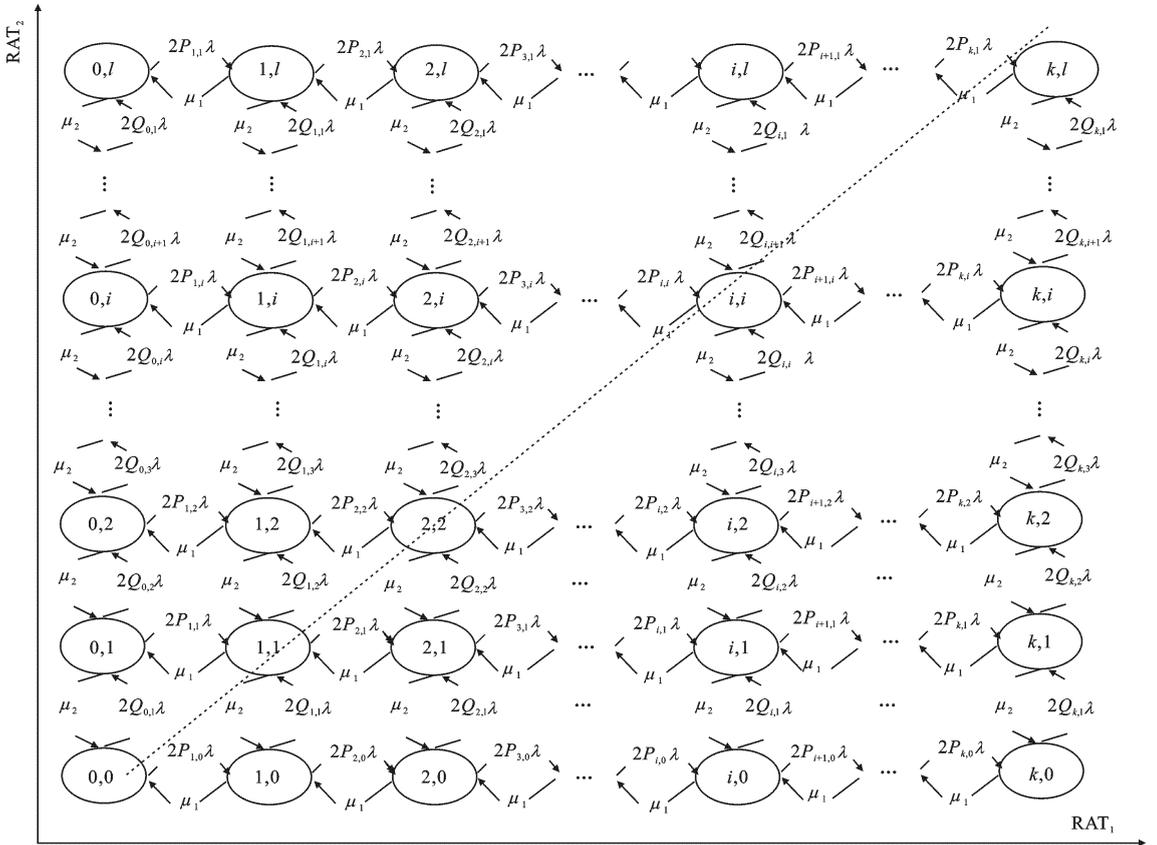


图 3 两个无线接入技术场景下使用最短等待时延分流策略的状态转移图

$$C_{i,i+1} = \begin{pmatrix} 2P_{i+1,0}\lambda & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 2P_{i+1,1}\lambda & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 2P_{i+1,2}\lambda & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 2P_{i+1,i}\lambda \end{pmatrix}, \quad (8)$$

$$G(i,i) = - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{k \times l} G(i,j), \quad (9)$$

$$\pi G = 0, \quad \pi \mathbf{1} = 1, \quad (10)$$

$$\begin{cases} D = \sum_{i=0, j=0}^{i=k, j=l} \pi_{i,j} D_{i,j}, \\ D_{i,j} = \begin{cases} (i/\mu_1) + 1/(2\mu_1), & \text{当 } P_{i,j} = 1, Q_{i,j} = 0, \\ (j/\mu_2) + 1/(2\mu_2), & \text{当 } P_{i,j} = 0, Q_{i,j} = 1. \end{cases} \end{cases} \quad (11)$$

式(5)~(9)表示了该过程对应的生灭矩阵,其中式(6)中主对角线上元素(即生灭矩阵主对角线上的元素)的值由式(9)得出.通过式(10)可解出稳态概率  $\pi$ ,进一步通过方程组(11)求出最短等待时延分流策略的分组平均时延.

最短等待时延分流策略同时考虑了不同无线接入技术的实时传输能力和队列状态,即根据系统的实时状态将到达的数据分组分流至某个确定的无线接入技术,而不是按照固定的比例进行分流,所以最短等待时延分流策略可以等效为图 2(d)所示的独立缓存服务员不能共享的 M/M/n 排队模型.这种队列模型与 n 个独立的 M/M/1 排队模型相比实现了将 n 个队列联合起来调度,所以获得了多队列联合调度的增益,因此最短等待时延分流策略在性能上会优于固定比例分流策略.

## 2.2 统一队列管理分流策略

现有的分流策略都是将数据分组直接分流到不同的无线接入技术中,并在无线接入技术中进行缓存管理.由于无线接入技术服务过程的随机性,就会导致整个系统中某些无线接入技术非常繁忙,而另一些无线接入技术较为空闲的情况.针对这一问题,笔者提出了一种全新的数据分组缓存管理架构,将数据分组缓存在 MRRM 处,即在分流之前缓存数据.当某个无线接入技术出现空闲时,MRRM 从缓存中取出与空闲无线接入技术资源量对应的数据分配给该无线接入技术,剩余的数据依然缓存在 MRRM 中.这种数据缓存管理体制能够最大程度地利用空闲的资源,将多个无线接入技术资源当做一个资源池来统一调用,从而获得最大的资源间联合调度增益.

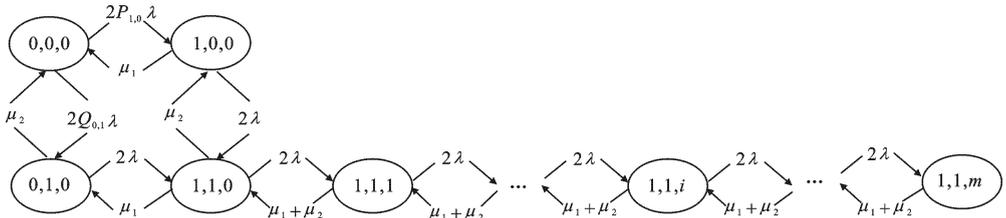


图 4 两个无线接入技术使用统一队列管理分流策略时的状态转移图

定义统一队列管理分流策略的系统状态  $N(t) \triangleq \{N_{\text{RAT}_1}(t), \dots, N_{\text{RAT}_n}(t), N_{\text{MRRM}}(t) \mid t \geq 0, n \geq 2\}$ ,其中  $N_{\text{RAT}_i}(t)$  为  $\text{RAT}_i$  中的数据分组数.由于  $\text{RAT}_i$  中至多有一个正在传输的分组,所以  $N_{\text{RAT}_i}(t)$  只能是 0 或者 1,  $N_{\text{MRRM}}(t)$  为缓存在 MRRM 的数据分组数.同样,  $N(t)$  可以用一个连续时间离散状态马尔科夫链来描述.依旧以  $n=2$  的异构网络为例,则统一队列管理分流策略可以描述为如图 4 所示的二维马氏链,图中每个状态  $(i, j, k)$  分别表示  $\text{RAT}_1$  中的分组数、 $\text{RAT}_2$  中的分组数和 MRRM 中未被分配的分组数,参数  $P_{1,0}$  和  $Q_{0,1}$  分别表示系统在  $(0, 0, 0)$  状态时数据分组的分流概率,即

$$\begin{cases} P_{1,0} = 1 & , & Q_{0,1} = 0 & , & \text{当 } \mu_1 > \mu_2 & , \\ P_{1,0} = 0 & , & Q_{0,1} = 1 & , & \text{当 } \mu_1 < \mu_2 & . \end{cases} \quad (12)$$

在这种场景下,统一队列管理分流策略可等效为图 2(e)所示的共用缓存的服务能力有差别的  $M/M/n$  排队系统<sup>[11]</sup>,通过下式可得出该系统的稳态状态转移概率  $\pi$ :

$$\pi_{1,1,i} = [2\lambda / (\mu_1 + \mu_2)]^i \pi_{1,1,0} \quad , \quad i \geq 0 \quad , \quad (13)$$

$$\pi_{0,1,0} = [\mu_1 / (2\lambda + \mu_2)] \pi_{1,1,0} \quad , \quad (14)$$

$$\pi_{1,0,0} = [\mu_2 / (2\lambda)] [1 + \mu_1 / (2\lambda + \mu_2)] \pi_{1,1,0} \quad , \quad (15)$$

$$\pi_{0,0,0} = [1 / (2\lambda)] \{ [\mu_1 \mu_2 / (2\lambda)] [1 + \mu_1 / (2\lambda + \mu_2)] + [\mu_1 \mu_2 / (2\lambda + \mu_2)] \} \pi_{1,1,0} \quad , \quad (16)$$

$$\pi_{1,1,0} = \left\{ \frac{1}{1 - 2\lambda / (\mu_1 + \mu_2)} + \frac{[1 + \mu_2 / (2\lambda)] \mu_1}{2\lambda + \mu_2} + \frac{[1 + \mu_1 / (2\lambda)] \mu_2}{2\lambda} \left( 1 + \frac{\mu_1}{2\lambda + \mu_2} \right) \right\}^{-1} \quad . \quad (17)$$

进一步通过以下各式可以算出系统平均时延  $D_{\text{UQM}}$ :

$$\begin{cases} D_{\text{UQM}} = \sum_{i=0, j=0, l=0}^{i=1, j=1, l=k} \pi_{i,j,l} D_{i,j,l} \quad , \\ D_{i,j,l} = l / (\mu_1 + \mu_2) + 1 / [2(\mu_1 + \mu_2)] \quad , & \text{当 } i=j=1 \quad , \\ D_{0,0,0} = \begin{cases} 1 / \mu_1 & , & \text{当 } \mu_1 > \mu_2 \quad , \\ 1 / \mu_2 & , & \text{当 } \mu_1 < \mu_2 \quad , \end{cases} \\ D_{1,0,0} = 1 / \mu_2 \quad , \\ D_{0,1,0} = 1 / \mu_1 \quad . \end{cases} \quad (18)$$

可以看出,由于统一队列管理分流策略使用了统一的缓存管理机制,最大化了传输资源的利用率,从而获得了较最短等待时延分流策略更优的性能.

### 3 仿真结果及分析

#### 3.1 参数设定

在前面分析的基础上,基于 OPNET 仿真软件对所提出的分流策略进行了仿真验证. 仿真选取了 WCDMA 和 LTE 的融合网络场景,其中处于 WCDMA 的 NodeB 和 LTE 的 eNodeB 重叠覆盖区域的多模终端可以同时接入到两个网络进行并行数据传输. 具体的仿真参数如表 1 所示. 定义业务强度为  $R_{\text{request}} / (T_{\text{WCDMA}} + T_{\text{LTE}})$ ,其中  $R_{\text{request}}$  为多模终端申请的业务速率,  $T_{\text{WCDMA}}$  和  $T_{\text{LTE}}$  分别为两个网络的等效传输速率. 由于蜂窝网可保证较为稳定的传输速率,所以当到达分组的长度服从指数分布时,服务过程即等效为泊松过程. 若分组的到达过程为一个泊松过程,此时可将 WCDMA 和 LTE 融合网络等效为上述排队模型.

表 1 仿真参数

参数	WCDMA	LTE
带宽	2×5 MHz	20 MHz
标准	Release 9(DC-HSPA+)	Release 9
等效传输速率	42 Mbit/s	100PRB×140 Kbit/s
信噪比/dB	[6,24]	<16.2(MCS 为 28)

#### 3.2 仿真结果及分析

当只有一个多模终端,即不存在多用户的竞争时,两个网络的资源都能被这个多模终端用来传输数据. 图 5(a)为各种分流策略与理论上限的平均时延对比图,其中虚线所示的曲线为上面分析中计算出的理论值,实线为仿真结果,可以看出理论值与仿真值非常接近. 同时从图中可以看出,笔者提出的最短等待时延分流策略和统一队列管理分流策略在性能上均优于传统的固定比例分流策略,  $D_{\text{FP}} > D_{\text{MQD}} > D_{\text{UQM}} > D_{\text{opt}}$ , 并且随着负载的加重,逐渐逼近最优分流策略的性能,在负载大于 0.8 时有将近 50% 的性能提升. 表 2 所示为不同负载情况下各种分流策略所对应的平均吞吐量,可以看出笔者所提出的分流策略在吞吐量上没有明显损失,即新的分流策略可以保证和固定比例分流策略同样的最高吞吐量.

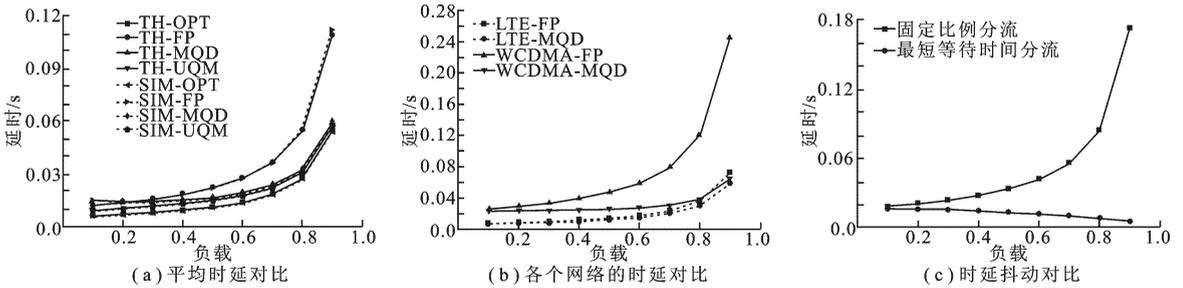


图 5 仿真结果图

表 2 吞吐量对比

负载	吞吐量/(Mbit · s <sup>-1</sup> )		
	固定比例分流策略	最短等待时延分流策略	统一队列管理分流策略
0.3	54.67	54.54	54.57
0.4	72.84	72.79	72.74
0.5	91.23	91.19	90.90
0.6	109.43	109.34	109.12
0.7	127.67	127.46	127.35
0.8	145.90	145.80	145.59
0.9	164.08	164.03	163.73

笔者提出的最短等待时延分流算法与传统的固定比例分流算法都是将数据分组缓存在无线接入技术中,所以这两种分流策略会导致不同网络的数据分组平均时延相差较大. 图 5(b)为这两种分流策略在不同网络的平均时延对比,虚线和实线分别为 LTE 和 WCDMA 网络的平均时延,可以看出在负载较轻时,LTE 网络由于传输能力较强,具有较低的平均时延;随着负载的增加,固定比例分流策略的平均时延迅速增加,而

最短等待时延分流策略的平均时延增加较为缓慢,并均低于固定比例分流策略.造成这种现象的原因是由于最短等待时延分流策略不同于固定比例分流策略的随机分流方式.最短等待时延分流策略是一种确定性分流算法,当数据分组到达 MRRM 时,将根据当前队列和无线接入技术状态被分流至某一确定无线接入技术,这种分流方式避免了分组达到过程和无线接入技术服务能力的随机性对系统性能造成的影响,通过调整每个无线接入技术中数据分组的个数使得每个无线接入技术中分组等待时延趋于相等.所以,图 5(b)中当负载较高时,最短等待时延分流策略两网的平均时延均小于固定比例分流策略.

图 5(c)所示为最短等待时延分流策略和固定比例分流策略的时延抖动对比图.在并发传输中,数据分组的时延抖动主要来自于不同无线接入技术之间传输能力的差异,所以这里的时延抖动主要定义为两个网络的平均时延之差.从图中可以看出,固定比例分流策略在系统繁忙程度较高时时延抖动急剧恶化,而最短等待时延分流策略随着系统繁忙程度的增加,时延抖动反而减小.这是因为最短等待时延分流策略本身就是以等待时延最短为依据进行分流,所以当系统繁忙程度较高时,数据分组在两个网络的等待时延将趋于相同,进而出现随着系统繁忙程度增加,时延抖动反而减少的情况.

## 4 总 结

通过对异构网络中多网并发传输时数据分流问题的研究,提出了最短等待时延分流策略、统一队列管理分流策略两种新的分流算法和在 MRRM 进行数据缓存的新的缓存管理构架,实现了对传输资源合理高效的利用.同时,运用二维马尔科夫链对所提出的算法进行了性能分析,并且使用排队模型对各种分流策略进行了建模,分析出多网并发传输的理论上限.仿真结果表明,笔者提出的分流算法在保证最优吞吐量不变的前提下降低了平均时延,在高负载情况下逼近理论上限,同时最短等待时延分流算法显著地降低了并发传输的时延抖动.

### 参考文献:

- [1] Cox D. Fundamental Limitations on Increasing Data Rate in Wireless Systems [J]. Communications Magazine, IEEE, 2008, 46(12): 16-17.
- [2] 王亚楠,夏海轮,冯春燕.异构网络中多媒体业务的联合呼叫接纳控制[J].西安电子科技大学学报,2010,37(5): 953-959.  
Wang Ya'nan, Xia Hailun, Feng Chunyan. Joint Call Admission Control Algorithm for Multimedia Services in Heterogeneous Wireless Networks [J]. Journal of Xidian University, 2010, 37(5): 953-959.
- [3] Ferrus R, Sallent O, Agustí R. Interworking in Heterogeneous Wireless Networks: Comprehensive Framework and Future Trends [J]. Wireless Communications, IEEE, 2010, 17(2): 22-31.
- [4] Choi Y, Kim H, Han S, et al. Joint Resource Allocation for Parallel Multi-Radio Access in Heterogeneous Wireless Networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(11): 3324-3329.
- [5] Bazzi A, Pasolini G, Andrisano O. Multiradio Resource Management: Parallel Transmission for Higher Throughput? [DB/OL]. [2011-10-10]. <http://asp.eurasipjournals.com/content/2008/1/763264>.
- [6] Dimou K, Agero R, Bortnik M, et al. Generic Link Layer: a Solution for Multi-radio Transmission Diversity in Communication Networks Beyond 3G[C]//Vehicular Technology Conference. Dallas: IEEE Press, 2005: 1672-1676.
- [7] Prabhavat S, Nishiyama H, Ansari N, et al. Effective Delay-Controlled Load Distribution over Multipath Networks [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2011, 22(10): 1730-1741.
- [8] Niyato D, Hossain E. A Noncooperative Game-theoretic Framework for Radio Resource Management In 4G Heterogeneous Wireless Access Networks [J]. IEEE Trans on Mob Computing, 2008, 7(3): 332-345.
- [9] Hoekstra G, van der Mei R, Nazarathy Y, et al. Optimal File Splitting for Wireless Networks with Concurrent Access Network [C]//Control and Optimization Third Euro-NF Conference, NET-COOP. Eindhoven: Springer-Verlag, 2009.
- [10] Adan I J, Boxma O J, Resing J. Queuing Models with Multiple Waiting Lines [J]. Queuing Syst Theory Appl, 2001, 37(1-3): 65-98.
- [11] Bertsekas D, Gallager R. Data Networks [M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1987.

(编辑:郭 华)