

M-WiMAX 网络中预测 LWDF 调度算法的稳定性分析

胡永东

(南京林业大学信息科学技术学院 南京 210037)

摘要 移动无线城域网作为 4G 标准无线移动网络,其无线信道具有用户依赖和时变信道的特性,具有服务质量保证机制,分组调度算法是系统保证服务质量的核心要素之一。建立一个多用户泊松到达业务流,用 Markov 链建模一个无线时变信道,Pre-LWDF 调度算法在各个用户间调度实时业务流,这样,移动无线城域网在 PMP 模式下形成了一个 M/G/1 的排队系统。根据队列理论计算并推导出无线城域网的信道容量域和系统的稳定域,在此基础上,用李雅普诺夫漂移稳定性理论分析证明 Pre-LWDF 调度算法具有分组级稳定性。进一步在 NS2 仿真平台上搭建一个移动无线城域网仿真环境,验证 Pre-LWDF 调度算法的稳定性。仿真结果表明,该算法在移动无线城域网中具有分组级稳定性。

关键词 移动无线城域网,预测 LWDF,李雅普诺夫漂移,稳定性

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.7.021

Stability Analysis for Predicting LWDF Scheduling Algorithm in M-WiMAX

HU Yong-dong

(College of Information Science and Technology, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract As a standard 4G mobile wireless network, mobile worldwide interoperability for microwave access (M-WiMAX) has a perfect service quality guarantee mechanism, and a packet scheduling algorithm is one of the core mechanisms of the service quality guarantee. There is a poisson's arrival stream of multiple users. Markov chain was used to model a wireless time-varying channel. Thus the M-WiMAX network in PMP mode was modeled as a M/G/1 queuing system. And then, the channel capacity region was derived. The stable region was calculated, as well as that the Pre-LWDF scheduling algorithm has the packet level stability was proved with Lyapunov drift stability theory. Finally, M-WiMAX network simulation environment was built on NS2 simulation platform to verify the stability of Pre-LWDF scheduling algorithm. The simulation results show that the Pre-LWDF algorithm has the packet level stability in M-WiMAX network.

Keywords M-WiMAX, Pre-LWDF, Lyapunov drift, Stability

移动互联网用户规模的迅猛发展,以及各种各样的移动多媒体、新业务、新技术不断涌现,给移动通信网络的设计和实现提出了更高的服务质量要求,仅依赖提高传输速率的设计目标很难适应这一形势的发展需要。无线移动信道的用户依赖和时变特性使得在无线移动网络中保证服务质量富有极大的挑战性。移动无线城域网^[1]作为未来 4G 标准无线移动网络,在 MAC 层定义了比较完善的服务质量保证机制,其中的分组调度算法是保证服务质量的核心要素之一。调度算法的优劣直接影响整个系统的性能,一个性能卓越的调度算法要求在保证服务质量的同时,还要兼顾用户间的公平性、系统稳定性和最大化系统的吞吐量。尤其在时变的无线移动信道系统中,调度算法的稳定性以及稳定域的大小显得尤其重要。

根据队列理论,如果队列的到达过程和服务过程联合起来是平稳的,那么队列稳定的充分必要条件是平均服务率大于平均到达率。如果网络中所有单个队列是强稳定的,则队

列网络是强稳定的。调度算法对平均服务率的影响在研究队列稳定性中起着至关重要的作用,研究者建立分组级或流级模型来研究分组调度算法的稳定性。在分组级模型中,假设用户数目是固定不变的,调度算法关注的是每个用户队列中的分组数目,Markov 链的状态空间为队列长度或者是缓存中分组的数目;在流级模型中,用户随机到达,用户被系统服务完后离开,用户数目是动态变化的,Markov 链的状态空间为网络中用户的数目。这样,如果一个调度算法在任何情况下能使队列长度有界,那么该调度算法具有分组级稳定性;如果一个调度算法在任何情况下使得网络中的用户数目有界,那么该调度算法具有流级稳定性。调度算法的流级稳定性是高层次的、宏观的、端到端的;而分组级稳定性是低层次的、微观的、点对点的。证明调度算法稳定性的方法主要有两种:李雅普诺夫漂移和流体极限理论。本文建立一个多用户泊松到达的实时业务流,用 Markov 链建模时变无线信道,在移动无线城域网的 PMP 工作模式下对不同用户之间的上行实时业务

采用预测 LWDF (Pre-LWDF)^[2] 调度算法进行调度, 形成了一个 M/G/1 的排队系统。在此基础上, 分析推导该系统中的信道容量域和系统稳定域。当到达率处于稳定域范围内时, 用李雅普诺夫漂移理论证明, 在泊松到达的情况下, Pre-LWDF 在该网络环境中具有分组级稳定性。最后, 在 NS2 仿真平台上建立仿真环境来模拟该网络实时业务流, 分析队列长度性能指标, 验证 Pre-LWDF 算法的稳定性。

1 相关工作

根据研究的网络层次, 分组调度算法的稳定性分为分组级稳定性和流级稳定性。分组级稳定性研究仅限于数据链路层; 流级稳定性要结合传输层的控制算法和网络层的路由算法来研究。1992 年, Tassiuals 和 Ephremides^[3] 在无线网络中时间不变信道环境下提出了最大权调度算法, 并且证明了该算法是吞吐最优和分组级稳定的, 同时推导出了调度算法的稳定域, 证明了稳定域的相关性质。接着, 他们在文献[4]研究了时变信道下该调度算法的分组级稳定性, 但信道变化比较简单, 只有 ON 和 OFF 两种状态。随后文献[5-8]推广到更一般的信道情况和功率分配情况下的调度分组级稳定性研究。流级调度算法的稳定性始于 Kelly, Maulloo 和 Tan^[9] 的研究, 他们假设系统模型具有时间尺度分离的特性, 网络流可以随机到达和离开, 应用流极限的方法证明了比例公平调度算法具有流级稳定性。而在现实网络中, 流的到达和离开以及服务率控制发生在同一时间尺度, 许多研究者^[10-16] 为了适应这一特性, 提出了无时间尺度分离的流级调度算法的稳定性。Walton^[17,18] 提出了一个联合流级和分组级的动态的调度稳定性分析模型, 但流级和分组级相结合的动态稳定性分析模型与有效的控制策略结合在一起的研究效果还不够理想。

Andrew^[19] 提出了 LWDF 和 M-LWDF 分组调度算法, 建模了时变信道, 推导出了该调度算法的稳定域, 并用流极限的方法证明了这两个调度算法的分组级稳定性。它是 Pre-LWDF 算法的理论基础, 由于 Pre-LWDF 使用了 Markov 预测理论来改进 M-LWDF, 调度算法的时间尺度是一个时隙, 如果使用流极限的方法来证明 Pre-LWDF 的分组级稳定性, 就忽略了预测值的影响, 本文采用李雅普诺夫漂移技术来证明 Pre-LWDF 的稳定性。

以上文献在研究调度算法的稳定性时都将到达过程建模为泊松流。而文献[20,21]指出, 无线网络的业务流具有重尾分布的特点, 尤其是随着多媒体应用和自媒体的出现, 这个现象更加明显; 同时, 他们在重尾分布业务流到达的环境下研究了相关调度算法的稳定性。重尾分布业务流的引入为调度算法的稳定性研究增加了难度和挑战。

2 调度算法的稳定性

2.1 调度算法稳定性的相关概念

在无线网络中, 调度算法是在每个时隙根据当前的服务器状态和队列状态, 按一定的规则选取相应的用户或业务流进行服务的规则, 它决定服务器服务的先后顺序。若平均到达率在系统的最大稳定域范围内, 调度算法能保证队列是稳定的, 则称这个调度算法是稳定的, 也就是调度算法具有稳定性。直观上讲, 调度算法的稳定性就是它使得系统队列长度

不会增长到无穷大。

文献[3]把队列系统建模成一个 Markov 链。Markov 链的稳定性有 3 种级别的定义: 不可约、正常返和遍历性。如果马尔可夫链不可约且是遍历的, 则队列系统是稳定的; 或者, 如果队列长度过程的每个状态的首达时间有界且是正常返, 则系统是稳定的。文献[22]把单个服务器离散时间队列建构成一个队列长度的随机过程, 给出系统强稳定性的相关定义。系统队列模型如图 1 所示, $t = \{0, 1, 2, \dots\}$ 表示离散时间, $A(t)$ 表示到达随机过程, $\mu(t)$ 表示在时隙 t 的传输率, $U(t)$ 表示在时隙 t 的队列积压(未完成的工作), 系统变化的动态方程为:

$$U(t+1) = \max[U(t) - \mu(t), 0] + A(t)$$

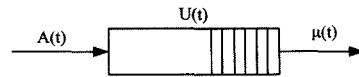


图 1 系统队列模型

定义 1(队列的强稳定性, Strongly Stable) 一个离散时间队列过程 $U(t)$ 是强稳定的, 如果满足:

$$\limsup_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{\tau=0}^{t-1} E\{U(\tau)\} < \infty$$

定义 2(队列网的稳定性) 如果队列网中的所有单个队列是强稳定的, 则队列网是稳定的。

定义 3(稳定域) 在调度算法的作用下, 使得队列系统稳定的所有到达率的集合叫做这个调度算法的稳定域。

定义 4(容量域) 存在一个调度算法, 使得队列系统稳定的所有到达率的闭包叫做这个系统的容量域。

假设有 N 个用户的到达系统, 系统容量域等于所有满足下列条件的所有到达率 $\vec{\lambda} = (\lambda_1, \dots, \lambda_N)$ 的集合。即存在一个平稳随机调度算法, 该算法根据当前信道状态向量来选取一个可行的传输率向量 $\vec{\mu}(t) = (\mu_1(t), \dots, \mu_N(t))$, 使得 $\lambda_i = E\{\mu_i(t)\}$, $i \in \{1, 2, \dots, N\}$, 其中期望是根据随机信道向量和暗含在随机信道状态向量的平稳随机调度决策决定的。

队列系统稳定性的必要条件是平均到达率小于或等于平均服务率, 充分必要条件是平均到达率小于平均服务率。这就说明了稳定域是容量域的子集, 每个调度算法都有相应的稳定域, 稳定域大的算法优于稳定域小的算法。

2.2 调度算法稳定性分析方法

根据建模方式不同, 调度算法的稳定性分析分为流级稳定性分析和分组级稳定性分析。目前, 分析这两种稳定性的常见方法有两种: 李雅普诺夫漂移和流体极限。第一种方法可以用来对随机系统模型的稳定性进行分析优化, 但在复杂环境下可能难以求解; 第二种方法通过建立尺度方程, 把一个随机问题转化为确定性问题, 然后利用李雅普诺夫漂移来证明确定性问题的稳定性, 从而达到证明随机问题稳定性的目的。这两种方法的核心就是李雅普诺夫漂移稳定性定理, 在此理论分析中, 选取一个适当的李雅普诺夫函数是分析问题的关键。

对于一个多队列系统, 假设 $\vec{U}(t) = (U_1(t), U_2(t), \dots, U_N(t))$ 是每个队列积压 $U_i(t)$ 的向量, 李雅普诺夫函数是 $\vec{U}(t)$ 的一个非负的实值函数 $L(\vec{U}(t))$, 此函数是衡量网络系统是否发生拥塞的一个标量指标。一个二阶的李雅普诺夫函数定义如下:

$$L(\vec{U}(t)) = \sum_{i=1}^N U_i^2(t)$$

该函数有几个有用的特性:

(1) $L(\vec{U}(t))=0$, 当且仅当网络中的每个队列积压为空;

(2) $L(\vec{U}(t))$ 的值如果很大, 则至少有一个队列的积压是很大的, 表明网络发生严重拥塞;

(3) $L(\vec{U}(t))$ 的值如果很小, 则表明网络中的所有队列积压都很小, 网络没有发生拥塞现象。

李雅普诺夫函数值表明了系统的拥塞程度。如果不断使李雅普诺夫函数值变小, 则系统朝着更低的拥塞状态发展, 这样就保持了系统的稳定性。为了方便掌握李雅普诺夫函数的变化情况, 定义李雅普诺夫漂移变量。

定义 5(一步李雅普诺夫漂移)

$$\Delta(\vec{U}(t)) = E\{(L(\vec{U}(t+1)) - L(\vec{U}(t))) | \vec{U}(t)\}$$

它是李雅普诺夫函数在当前队列条件下一个时隙上随机过程 $\vec{U}(t)$ 变化的期望。当一步李雅普诺夫漂移是负漂移时, 系统朝着更低的拥塞状态发展。

定理 1(李雅普诺夫漂移稳定性定理) $L(\vec{U}(t))$ 是 $\vec{U}(t)$ 的李雅普诺夫函数, 假设存在正常数 $B > 0$ 和 $\epsilon > 0$ 使得对于所有 $t, \vec{U}(t)$:

$$\Delta(\vec{U}(t)) \leq B - \epsilon \sum_{i=1}^k U_i(t) \quad (1)$$

则网络系统中所有队列是稳定的, 并且有:

$$\limsup_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{\tau=0}^t \sum_{i=1}^k E\{U_i(\tau)\} \leq \frac{B}{\epsilon}$$

如果式(1)保持成立, 那么对任意 $\delta > 0$, 只要 $\sum_{i=1}^N U_i \geq \frac{B+\delta}{\epsilon}$, 都有 $\Delta(\vec{U}(t)) < -\delta$ 。说明一旦队列长度大于 $\frac{B}{\epsilon}$, 一步李雅普诺夫漂移就会负漂移, 系统就会向拥塞程度低的方向发展, 从而保证了系统的稳定。所以, 定理表明, 要证明队列系统的稳定性, 只须证明一步李雅普诺夫漂移是负漂移, 即证明: 存在一个 $B > 0$ 和 $\epsilon > 0$, 只要 $\sum_{i=1}^N U_i(t) > B$, 都有 $\Delta(\vec{U}(t)) \leq -\epsilon \sum_{i=1}^N U_i(t)$ 。

在此稳定性定理的基础上, 用李雅普诺夫漂移理论分析调度算法稳定性的基本步骤如下:

Step1 定义一个李雅普诺夫函数: $L(\vec{U}(t)) = \sum_{i=1}^k U_i^2(t)$;

Step2 计算李雅普诺夫漂移 $\Delta(\vec{U}(t)) \leq B + RHS$, B 表示正的常量部分, RHS 表示变量部分;

Step3 设计一个调度算法来最小化 RHS ;

Step4 证明 $RHS \leq RHS^*$, RHS^* 为静态平稳调度算法处于稳定状态下的李雅普诺夫漂移右边表达式变量部分的价值。

3 Pre-LWDF 的稳定性分析

3.1 系统建模

移动无线城域网有两种网络拓扑结构: PMP 和 Mesh 模式。这里考虑 PMP 模式的上行链路的调度算法, 对不同用户的实时业务采用 Pre-LWDF 算法。假设有 N 个移动站 MS_1 个基站 BS , 如图 2 所示, 每个 MS 与 BS 建立一条上行链路, 这样就形成了 N 条上行链路 $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ 。系统按

时隙进行调度, 时隙 $t \in \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ 。在时隙 t , 链路 i 的到达随机过程为 $A_i(t)$, 假设 $A_i(t)$ 是泊松过程, 每个链路之间是相互独立的, 并且同一链路每个时隙之间是独立同分布的, 平均到达率为 $\lambda_i = E\{A_i(t)\}$ 。每条链路 i 维护一个独立的队列, 每个队列的积压分组数为一个随机过程 $U_i(t)$ 。

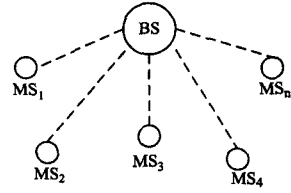


图 2 系统网络拓扑图

第 i 条链路在时隙 t 的信道状态为不可约离散平稳 Markov 链 $S_i(t)$, 状态空间为 M , 每条链路的平稳分布概率为 $\pi_i(s) = \Pr\{S_i(t) = s\}$, $s \in \{1, \dots, M\}$, 具体定义见文献[2]的第 2.1 节。当前状态下对应的传输率为 $s_i(t)$, 这样链路状态传输率向量 $\vec{s}(t) = (s_1(t), \dots, s_N(t))$ 。该网络采用正交频分复用(OFDM)方式, 在一个时隙内可以并行服务多个移动站。系统中一个时隙有多个子载波, 每个子载波可以分配给不同的移动站, 为了研究方便, 假设一个时隙中的子载波都分配给同一个移动站。这样, 在一定的调度策略下, 第 i 条链路在时隙 t 的服务传输率为 $\mu_i(t)$, 它与 $s_i(t)$ 的关系如下:

$$\mu_i(t) = \begin{cases} s_i(t), & \text{如果在时隙 } t \text{ 信道 } i \text{ 被调度} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

服务传输率向量 $\vec{\mu}(t) = (\mu_1(t), \dots, \mu_N(t))$ 。每条链路的队列动态方程如下:

$$U_i(t+1) = \max\{U_i(t) - \mu_i(t), 0\} + A_i(t) \quad (2)$$

调度算法可以看作是时隙 t 上的系统状态到一个用户队列的映射 F , 这个映射具有一定的概率分布。在系统平稳的状态下, 一个给定的调度算法在每个状态下的概率分布就形成了一个随机矩阵 $\phi = (\phi_{mi}, m \in M, i = 1, \dots, N)$, 其中, 对所有的 m 和 i , $\phi_{mi} > 0$, 并且对每个 m , $\sum_{i=1}^N \phi_{mi} = 1$ 。当基站在状态 m 时, 调度算法选择用户队列 i 服务的概率为 ϕ_{mi} 。链路 i 的平均服务率为 $\bar{\mu}_i = \sum_{m=1}^M \pi_m \phi_{mi} \mu_i(s)$, 系统在一定的调度算法下的平均服务率是 $\bar{\mu} = (\bar{\mu}_1, \dots, \bar{\mu}_N) = \mu(\phi)$ 。根据 2.1 节的定义可知, 该系统的容量域为 $\bar{\mu}$, 稳定域为 $\bar{\lambda} < \bar{\mu}$ 。

3.2 Pre-LWDF 算法的稳定性分析

先简单陈述 M-LWDF 算法和 Pre-LWDF 算法的主要思想, 具体内容见文献[2, 19]。M-LWDF^[19]的调度规则如下:

$$\gamma_j \mu_j(t) W_j(t) = \max_i \gamma_i \mu_i(t) W_i(t) \quad (3)$$

其中, $\gamma_i > 0$, $i = 1, \dots, N$, 信道 i 在时隙 t 的传输数据率为 $\mu_i(t)$, $W_i(t)$ 是队列 i 的分组在时隙 t 的最大时延。Pre-LWDF 算法^[2]的调度规则为:

$$j = \arg \max_i \gamma_i (\alpha \mu_i(t) + (1-\alpha) \hat{\mu}_i(t+1)) W_i(t) \quad (4)$$

其中, α 为平滑因子, $0 \leq \alpha \leq 1$, $\hat{\mu}_i(t+1)$ 为队列 i 在下一个调度时刻 $t+1$ 时的传输速率预测值。

文献[19]证明了 M-LWDF 算法是吞吐量最优算法, 也就是说, 只要平均到达率向量在系统的最大稳定域内, 队列系统就是稳定的。主要使用流极限技术证明系统的稳定性。采用流极限技术证明稳定性的主要任务是要建立流尺度方程。但

预测速率难以在尺度方程中体现,用流极限技术证明 Pre-LWDF 算法的稳定性比较困难,在此用李雅普诺夫漂移理论来证明它的稳定性。

假设 $\vec{U}(t) = (U_1(t), U_2(t), \dots, U_N(t))$ 是用户 i 在时隙 t 的队列积压 $U_i(t)$ 的向量,定义一个李雅普诺夫函数是 $\vec{U}(t)$ 的一个非负实值函数:

$$L(\vec{U}(t)) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N U_i^2(t), i \in (1, \dots, N) \quad (5)$$

由式(2)、式(5)可以得到:

$$\begin{aligned} L(\vec{U}(t+1)) - L(\vec{U}(t)) &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N [U_i(t+1)^2 - U_i(t)^2] \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N [(\max(U_i(t) - \mu_i(t), 0) + A_i(t))^2 - U_i(t)^2] \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N [\max(U_i(t) - \mu_i(t), 0)^2 + 2\max(U_i(t) - \mu_i(t), 0) \\ &\quad A_i(t) + A_i(t)^2 - U_i(t)^2] \end{aligned}$$

根据 $[\max(U_i(t) - \mu_i(t), 0)]^2 \leq (U_i(t) - \mu_i(t))^2$ 得到:

$$\begin{aligned} L(U(t+1)) - L(U(t)) &\leq \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N [(U_i(t) - \mu_i(t))^2 + 2\max(U_i(t) - \mu_i(t), 0)A_i(t) \\ &\quad + A_i(t)^2 - U_i(t)^2] \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N [U_i(t)^2 + \mu_i(t)^2 - 2U_i(t)\mu_i(t) + 2\max(U_i(t) - \mu_i(t), 0)A_i(t) \\ &\quad + A_i(t)^2 - U_i(t)^2] \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N [A_i(t)^2 + \mu_i(t)^2 - 2U_i(t)\mu_i(t) + 2\max(U_i(t) - \mu_i(t), 0)A_i(t)] \end{aligned}$$

在 $U_i(t) \geq 0, \mu_i(t) \geq 0$ 时, $\max(U_i(t) - \mu_i(t), 0) \leq \max(U_i(t), 0) = U_i(t)$

这样可以得到:

$$\begin{aligned} L(U(t+1)) - L(U(t)) &\leq \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N [A_i(t)^2 + \mu_i(t)^2 - 2U_i(t)\mu_i(t) + 2U_i(t)A_i(t)] \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N [A_i(t)^2 + \mu_i(t)^2] + \sum_{i=1}^N U_i(t)A_i(t) - \sum_{i=1}^N U_i(t)\mu_i(t) \quad (6) \end{aligned}$$

定义一步李雅普诺夫漂移:

$$\Delta(\vec{U}(t)) = E\{L(\vec{U}(t+1)) - L(\vec{U}(t))\} | \vec{U}(t) \quad (7)$$

将式(6)代入式(7),得:

$$\begin{aligned} \Delta(\vec{U}(t)) &\leq E\left\{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N [A_i(t)^2 + \mu_i(t)^2] | \vec{U}(t)\right\} + E\left\{\left(\sum_{i=1}^N U_i(t)A_i(t) - \sum_{i=1}^N U_i(t)\mu_i(t)\right) | \vec{U}(t)\right\} \\ &= E\left\{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N [A_i(t)^2 + \mu_i(t)^2] | \vec{U}(t)\right\} + E\left[\sum_{i=1}^N U_i(t)A_i(t) | \vec{U}(t)\right] - E\left[\sum_{i=1}^N U_i(t)\mu_i(t) | \vec{U}(t)\right] \end{aligned}$$

当到达过程 $A_i(t)$ 是独立同分布的,并且与当前的队列积压过程 $U_i(t)$ 相互独立时,则:

$$\begin{aligned} E\left\{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N [A_i(t)^2 + \mu_i(t)^2] | \vec{U}(t)\right\} &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \lambda_i(t)^2 + \frac{1}{2} E\left(\sum_{i=1}^N \mu_i(t)^2 | \vec{U}(t)\right) E\left[\sum_{i=1}^N U_i(t)A_i(t) | \vec{U}(t)\right] \\ &= \sum_{i=1}^N U_i(t)\lambda_i(t) \end{aligned}$$

令 $RHS = -E\left[\sum_{i=1}^N U_i(t)\mu_i(t) | \vec{U}(t)\right]$, 接下来证明 Pre-LWDF 算法使得 RHS 最小,这样就证明了该算法是稳定的。

在排队系统中, Little 基本定理: $W\lambda = U$, 其中 W 表示系统平均时延, λ 是业务流的平均到达速率, U 是队列平均队列积压。当到达率 λ 趋于平稳时,时延最小准则可转化为队列长度最小准则。由于 RHS 表达式求的是随机变量的期望值,因此这里可以将 $W_i\lambda_i = U_i$ 代入 RHS 表达式中,得到:

$$RHS = -E\left[\sum_{i=1}^N \bar{\lambda}_i W_i(t)\mu_i(t) | \vec{U}(t)\right]$$

M-LWDF 调度算法的调度规则即式(3)保证了 RHS 取最小值,这样就证明了 M-LWDF 调度算法是稳定的,与文献[19]结论一致。

由 Pre-LWDF 的调度规则即式(4)可知,当 $\gamma_i(\alpha u_i(t) + (1-\alpha)\hat{u}_i(t+1))W_i(t)$ 取最大值时,它的期望 $E\{(\gamma_i(\alpha u_i(t) + (1-\alpha)\hat{u}_i(t+1))W_i(t)) | \vec{U}(t)\}$ 能取最大值。而,

$$\begin{aligned} E\{(\gamma_i(\alpha u_i(t) + (1-\alpha)\hat{u}_i(t+1))W_i(t)) | \vec{U}(t)\} &= E\{(\gamma_i \alpha u_i(t) W_i(t) + (1-\alpha)\hat{u}_i(t+1)W_i(t)) | \vec{U}(t)\} \\ &= E\{\gamma_i \alpha u_i(t) W_i(t) | \vec{U}(t)\} + E\{(1-\alpha)\hat{u}_i(t+1)W_i(t) | \vec{U}(t)\} \\ &= E\{\gamma_i \alpha u_i(t) W_i(t) | \vec{U}(t)\} + (1-\alpha)E\{\hat{u}_i(t+1) | \vec{U}(t)\} W_i(t) \end{aligned}$$

根据马尔可夫信道状态的状态转换矩阵 P (具体 P 的定义见文献[2])可知: $E\{\hat{u}_i(t+1) | \vec{U}(t)\} = \bar{\mu}_i$ 为常数,从而保证了 $E\{\gamma_i \alpha u_i(t) W_i(t) | \vec{U}(t)\}$ 取最大值。这样就得到了 Pre-LWDF 的调度规则使得 RHS 取最小值,所以该调度算法是稳定的。

4 Pre-LWDF 稳定性验证

4.1 参数设置

在 NS2 仿真平台中进行 Pre-LWDF 算法稳定性验证实验,设计一个 $1100m \times 1100m$ 的移动无线城域网仿真场景,其中有一个基站 BS、一个 Sink 节点和若干个移动站 MS。基站 BS 与节点 Sink 之间通过有线链路连接,与移动站 $MS_i (i=1, 2, \dots, N)$ 之间通过无线链路连接,如图 3 所示。移动站 $MS_i (i=1, 2, \dots, N)$ 和节点 Sink 之间建立 UDP 连接和 VBR 数据流。每个移动站 $MS_i (i=1, 2, \dots, N)$ 向基站 BS 发送数据,基站 BS 接收并转发。基站 BS 的带宽为 8Mbps,缓存大小为 1MB,分组丢失率为 0.001,为了研究方便,在仿真系统中不考虑传播延迟。移动站 MS_i 分别设置 rtPS 和 ertPS 两种业务源。

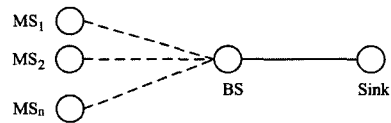


图 3 仿真系统网络拓扑图

在此网络中,无线节点的主要参数设置如下:无线传输模型是 TwoRayGround,网络接口类型是无线物理层,MAC 层采用 802.16 协议,接口队列类型是 IFQ 队列,逻辑链路层为 LL 层,天线模型是全向天线,网络接口队列的大小是 50,无线路由协议是 DSDV 协议,详见文献[2]。

4.2 仿真结果分析

1) 系统容量及稳定域

假设系统的带宽为 $BW(\text{Hz})$, 则系统的取样频率 $F_s = \frac{\lfloor 8000 \cdot n \cdot BW \rfloor}{8000}$, 其中, n 表示取样因子。由取样频率 F_s 可以得到每个子载波间隔 $\Delta f = \frac{F_s}{N_{\text{FFT}}}$, 其中, N_{FFT} 表示系统 FFT 的大小。从而可以求得有效符号时间 $T_b = \frac{1}{\Delta f}$, 而守卫信道持续时间 $T_g = G * T_b$, 这样, 一个符号的持续时间 T_s 可以通过计算得到: $T_s = T_g + T_b = (G + 1) T_b$, 最后求得系统的最大传输率 $\mu = \frac{N_{\text{used}} \cdot b_m \cdot c_r}{T_s}$ 。系统在各状态下的传输速率 (Mbps) 见表 1。

表 1 系统传输速率

带宽	1.75MHz					
调制方法	BPSK	QPSK	16-QAM	3/4	2/3	3/4
编码速度	1/2	3/4	1/2	3/4	2/3	3/4
系统状态	1	2	3	4	5	6
传输速率	0.71	1.41	2.12	2.82	4.24	5.65

假设系统中的移动用户数 $N=2$, 这样就形成两个队列的时变信道服务系统, 两个信道状态过程 $S_1(t)$ 和 $S_2(t)$ 相互独立, 同一信道状态过程在每个时隙是独立同分布的, 并且分布列如表 2 所列。

表 2 单个信道的状态概率分布

$S_i(t)$	0	1	2	3	4	5	6	7
P_k	0.26	0.19	0.12	0.11	0.09	0.07	0.04	0.12

系统服务器的状态向量为 $\vec{S}(s_1, s_2)$, 且 s_1, s_2 都属于 $0 \sim 7$ 。服务器共有 64 种不同的状态, 其形成一个状态向量集 S , 每个状态的概率 $P(s_1, s_2)$ 是两个信道的联合分布, 由于两个信道独立, 根据独立分布的性质就可以很容易地得到联合分布概率。由 3.1 节的建模分析可知:

$$\lambda_i + \epsilon \leq \sum_{(s_1, s_2) \in S} P[s_1, s_2] \mu_i q_i(s_1, s_2), i=1, 2$$

$$q_1(s_1, s_2) + q_2(s_1, s_2) \leq 1, \forall (s_1, s_2) \in S$$

$$q_1(s_1, s_2) \geq 0, q_2(s_1, s_2) \geq 0, \forall (s_1, s_2) \in S$$

其中, $q_i(s_1, s_2)$ 为系统在状态 (s_1, s_2) 调度队列 i 时的概率。由上面的约束条件可以得到系统的容量域 Λ , 具体如图 4 所示。在容量域 Λ 内部的到达率向量 $\vec{\lambda}(\lambda_1, \lambda_2)$ 就是稳定域。

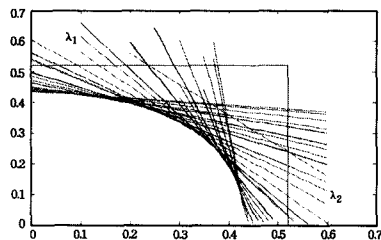


图 4 系统稳定域

2) 稳定性验证分析

在仿真实验中, 设置两个移动站点的分组到达率 λ_1, λ_2 相等, 且它们在稳定域内从小到大逐步增大, 两个队列的调度算法为 Pre-LWDF 算法。两个队列的积压 Q_1, Q_2 的和均值与系统利用率的关系如图 5 所示。从图 5 可以看出, 当到达率 λ_1, λ_2 在稳定域内变化时, 随着系统利用率的提高, 两个队列积压 Q_1, Q_2 的和均值也会增大, 而且开始增大得比较慢,

但随着系统的负载的增大, 系统的利用率提高了, 两个队列积压 Q_1, Q_2 的和均值增长得比较快, 不过此时队列的长度还是有限值, 系统是稳定的。当 λ_1, λ_2 的值超出稳定域时, 系统利用率接近 1, 系统两个队列积压 Q_1, Q_2 的和均值就会增大到一个很大的数, 甚至是达到无穷大, 系统就不稳定。所以从仿真结果可以得出, 当每个队列的到达率在稳定域内时, Pre-LWDF 算法是稳定的。

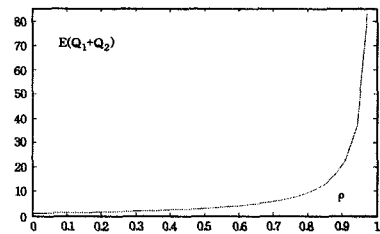


图 5 系统利用率与队列积压和均值

结束语 移动无线城域网作为 4G 标准无线移动网络, 无线信道具有用户依赖和时变信道的特性, 建立了一个 M/G/1 的排队系统模型, 模型的到达过程为泊松到达过程, 无线信道为多状态 Markov 链, 对上行实时业务流采用预测 LWDF 调度算法进行调度; 分析推导出该系统中的信道容量域为 $\vec{\mu} = (\bar{\mu}_1, \dots, \bar{\mu}_N) = \mu(\phi)$, 稳定域为 $\vec{\lambda} < \vec{\mu}$; 利用李雅普诺夫漂移稳定性定理详细推导证明了在泊松到达的情况下, Pre-LWDF 算法在该网络环境中, 一步李雅普诺夫漂移是负漂移的, 因此此算法具有分组级稳定性; 在 NS2 仿真平台上建立仿真环境来模拟该网络实时业务场景, 分析队列长度性能指标, 进一步验证了 Pre-LWDF 算法的分组级稳定性。

以上结论都是在泊松到达和网络的 PMP 模式下得到的, 在 Mesh 模式下能否成立也即队列网的稳定性有待进行进一步探讨, Pre-LWDF 算法在自相似业务流中是否仍然具有分组级稳定性也需要证明; 同时, Pre-LWDF 算法是否具有流级稳定性需要结合高层的相关控制算法作进一步分析, 随着研究环境的复杂化, 调度算法的稳定性研究具有更大的挑战。

参考文献

- [1] IEEE 802.16 WG. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems Amendment 3: Advanced Air Interface[S]. New York: IEEE, 2011
- [2] Hu Yong-dong, Wu Guo-xin, Xu Yi-qing. Study on Markov Predictive M-LWDF Scheduling Algorithm in M-WiMAX[J]. Computer Science, 2014, 41(4): 31-35 (in Chinese)
胡永东, 吴国新, 徐逸卿. M-WiMAX 中马尔可夫预测的 M-LWDF 调度算法研究[J]. 计算机科学, 2014, 41(4): 31-35
- [3] Tassiulas L, Ephremides A. Stability properties of constrained queueing systems and scheduling policies for maximum throughput in multihop radio networks[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1992, 37(12): 1936-1948
- [4] Tassiulas L, Ephremides A. Dynamic Server Allocation to Parallel Queues with Randomly Varying Connectivity [J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 1993, 39(2): 466-478
- [5] Neely M J, Modiano E, Rohrs C E. Power Allocation and Routing in Multi-Beam Satellites with Time Varying Channels[J]. IEEE Transactions on Networking, 2003, 11(1): 138-152

(下转第 130 页)

- Nonuniform Node Distribution in Wireless Sensor Networks[J]. Chinese Journal of Computers, 2008, 31(2): 253-261 (in Chinese)
- 吴小兵,陈贵海. 无线传感器网络中节点非均匀分布的能量空洞问题[J]. 计算机学报, 2008, 31(2): 253-261
- [4] Song Chao, Liu Ming, Gong Hai-Gang, et al. ACO-Based Algorithm for Solving Energy Hole Problems in Wireless Sensor Networks[J]. Journal of Software, 2009, 20(10): 2729-2743 (in Chinese)
- 宋超,刘明,龚海刚,等. 基于蚁群优化解决传感器网络中的能量空洞问题[J]. 软件学报, 2009, 20(10): 2729-2743
- [5] Liu An-feng, Liu Zheng-hua, Nurudeen M, et al. An elaborate chronological and spatial analysis of energy hole for wireless sensor networks[J]. Computer Standards & Interfaces, 2013, 35(1): 132-149
- [6] Liu An-feng, Jin Xin, Cui Guo-hua, et al. Deployment guidelines for achieving maximum lifetime and avoiding energy holes in sensor network[J]. Information Sciences, 2013, 230(4): 197-226
- [7] Liu An-feng, Yang Guo-jun, Chen Zhi-gang. Energy hole avoid by alternately working with different cluster-radius for wireless sensor networks[J]. Journal on Communications, 2010, 31(1): 1-8 (in Chinese)
- 刘安丰, 阳国军, 陈志刚. 基于不等簇半径轮换工作的传感器网络能量空洞避免研究[J]. 通信学报, 2010, 31(1): 1-8
- [8] Liu An-Feng, Ren Ju, Xu Juan, et al. Analysis and Avoidance of Energy Hole Problem in Heterogeneous Wireless Sensor Networks[J]. Journal of Software, 2012, 23(9): 2438-2448 (in Chinese)
- 刘安丰, 任炬, 徐娟, 等. 异构传感器网络能量空洞分析与避免研究[J]. 软件学报, 2012, 23(9): 2438-2448
- [9] Ahmad A, Latif K, Javaid N, et al. Density controlled divide-and-rule scheme for energy efficient routing in Wireless Sensor Networks[C]//2013 26th Annual IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE). IEEE, 2013: 1-4
- [10] Saleem F, Moeen Y, Behzad M, et al. IDDR: Improved Density Controlled Divide-and-Rule Scheme for Energy Efficient Routing in Wireless Sensor Networks [J]. Procedia Computer Science, 2014, 34(7): 212-219
- [11] Xue Yu, Chang Xiang-mao, Zhong Shui-ming, et al. An efficient energy hole alleviating algorithm for wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2014, 60(3): 347-355
- [12] Liu Tao. Avoiding Energy Holes to Maximize Network Lifetime in Gradient Sinking Sensor Networks [J]. Wireless Personal Communications, 2013, 70(2): 581-600
- [13] Zhao Xiang-ning. A Signal Mechanism Based Energy-Aware Geographic Routing Algorithm[J]. Chinese Journal of Electronics, 2015, 43(5): 965-973 (in Chinese)
- 赵湘宁. 一种基于信号机制的能量感知地理路由算法[J]. 电子学报, 2015, 43(5): 965-973
-
- (上接第 124 页)
- [6] Andrews, Matthew. Instability of the Proportional Fair Scheduling Algorithm for HDR [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2004, 3(5): 1422-1426
- [7] Eryilmaz A, Srikant R, Perkins J. Stable scheduling policies for fading wireless channels [J]. IEEE/ACM Trans. On Networking, 2005, 13: 411-424
- [8] Georgiadis L, Neely M J, Tassiulas L. Resource Allocation and Cross-Layer Control in Wireless Networks [J]. Foundations and Trends in Networking, 2006, 1(1): 1-144
- [9] Kelly F P, Maulloo A K, Tan D K H. Rate Control in Communication Networks; Shadow Prices [J]. Proportional Fairness and Stability. J. Oper. Res. Soc. , 1998, 49: 237-252
- [10] Dai J G. On positive Harris recurrence of multiclass queueing networks; A unified approach via fluid limit models [J]. Ann. Appl. Probab. , 1995, 5: 49-77
- [11] Bonald T. A score-based opportunistic scheduler for fading radio channels [C]//Proc. Eur. Wireless. 2004: 283-292
- [12] Borst S C. User-level performance of channel-aware scheduling algorithms in wireless data networks [J]. IEEE/ACM Trans. Netw. , 2005, 13(3): 636-647
- [13] Borst S C, Jonckheere M. Flow-level stability of channel-aware-scheduling algorithms [C]//Proc. WiOpt. 2006: 1-6
- [14] Borst S C, Bonald T, Hegde N, et al. Flow-level performance and capacity of wireless networks with user mobility [J]. Queueing Syst. , 2009, 63(14): 131-164
- [15] Aalto S, Lassila P. Flow-level stability and performance of channel-aware priority-based schedulers [C]//Proc. 6th EURO-NF NGI. 2010: 1-8
- [16] Ayesta U, Erasquin M, Jonckheere M, et al. Scheduling in a Random Environment; Stability and Asymptotic Optimality [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2013, 21(1): 258-271
- [17] Walton N S. Proportional fairness and its relationship with multi-class queueing networks [J]. Annals of Applied Probability, 2008, 19(6): 2301-2333
- [18] Moallemi C C, Shah D. On the flow-level dynamics of a packet-switched network [C]//SIGMETRICS 2010. New York, USA, 2010: 14-18
- [19] Andrews D M, Kumaran K, Ramanan K, et al. Scheduling in a queueing system with asynchronously varying service rates [J]. Prob. Eng. Inf. Sc. , 2004, 18: 191-217
- [20] Jagannathan K, Markakis M, Modiano E, et al. Queue Length Asymptotics for Generalized Max-Weight Scheduling in the presence of Heavy-Tailed Traffic [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2010, 20(4): 1096-1111
- [21] Markakis M, Modiano E, Tsitsiklis J. Scheduling Policies for Single-Hop Networks with Heavy-Tailed Traffic [C]//Allerton Conference on Communication, Control, and Computing. 2010: 112-120
- [22] Neely M J. Stochastic Network Optimization with Application to Communication and Queueing Systems [M]. Morgan & Claypool, 2010