

具有低复杂度和 QoS 敏感的 LTE 调度算法

赵飞龙

(福州大学 数学与计算机科学学院, 福建 福州 350002)

摘要: 基于线性松弛原理和贪心法, 设计并实现了一种适用于 LTE 网络、具有全 QoS 保证能力的低复杂度 QPF 调度算法。该算法分为时域和频域 2 个部分, 对 GBR 业务和 Non-GBR 业务可一次性实现全部资源的分配, 将算法复杂度从 $O(M^N)$ 下降到 $O(M \ln N)$ 。仿真表明, 该调度算法各项性能较为均衡, 在高负荷时部分性能较参考算法有 10% 的提升, 较好地解决了调度的性能和复杂度之间的矛盾。

关键词: 长期系统演进; 业务质量; 调度算法; 优化

中图分类号: TN929.532

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2013)12-0178-07

Low-complexity and QoS-awared scheduling algorithm for LTE

ZHAO Fei-long

(College of Mathematics and Computer Science, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Based on the relaxation based linearization principle and the greedy algorithm, a scheduling algorithm named QPF was designed with low complexity and full QoS-awared. It is divided into two parts: time and frequency domain, which can allocate all resources at once according to two service types: GBR and Non-GBR service. By this way the computation complexity decreases from $O(M^N)$ to $O(M \ln N)$. The proposed algorithm has a balanced performance in simulation, which can get 10% improvement in some dimensions compared with the references with high load and provide a nice trade-off between the performance and complexity.

Key words: LTE; quality of service; scheduling algorithms; optimization

1 引言

3GPP 为 LTE 网络定义了全新的无线资源和 QoS 保证机制^[1], 而位于 MAC 层的分组调度器主要负责物理资源的动态分配, 决定了整个无线分组业务系统提供业务的质量和效率, 因此分组调度器的设计及其相关算法一直都是热点研究内容^[2]。除一般文献讨论的分组调度器的效率和公平性要求之外, LTE 的分组调度器还应满足以下 2 个要求。

1) 满足 LTE 的 QoS 保证要求

LTE 的 QoS 控制参数有 QoS 等级指示(QCI)、保证比特率(GBR)/最大比特率(MBR)和聚合最大比特率(AMBR), 其中 QCI 又包含了资源类型(RT)、分组处理优先级(PL)、分组延迟预算(PDB)和分组丢

失率(PELR), 有关 LTE 的 QoS 参数可参见文献[3], 也就是说 LTE 的调度器应当能够区分 GBR (guaranteed bit rate)和 Non-GBR 业务, 同时提供对各业务的速率、时延和误比特率的 QoS 保证。

2) 满足 LTE 的资源管理要求

LTE 要求 MAC 层分组调度器能在一个 TTI(1 ms) 内完成对超过 200 个用户和 100 个 RB 资源(resource block)的分配^[4], 这要求分组调度器的计算复杂度应足够小, 使 DSP 能够快速完成计算以实现实时调度。

为实现一个具有全面 QoS 保证能力的低复杂度分组调度器, 诸多学者开展了相关研究工作。文献[5]提出了一种分时域和频域做两步调度的分组调度器实现结构, 并给出了时域和频域的调度算

收稿日期: 2013-04-14; 修回日期: 2013-07-25

基金项目: 基于压缩感知的无线传感器网络信息获取与传输机制研究基金资助项目 (2013J01235)

Foundation Item: Data Acquisition and Transmission in Wireless Sensor Networks Based on Compressive Sensing (2013J01235)

法，能有效降低调度复杂度，但调度算法仅在 PF 调度的基础略做了一些改进，不能提供对时延和速率的保证。文献[6]给出一个改进的 PF 分组调度器的实现过程，能够支持 GBR 业务和 Non-GBR 业务，但同样不能提供对时延的保证。文献[7]对具有时延保证能力的 LTE 分组调度算法中的参数敏感性做了仿真分析，指出了存在一组稳定的参数取值能在各种条件下取得接近最优化的网络性能，但算法复杂度高，不能区分 GBR 和 Non-GBR 业务，与实际需求相距甚远。

分组调度是一个 NP 完全问题，本文通过线性化处理将其转化为整数规划问题，受线性规划问题的最优松弛解过程的启发，本文将分组调度器分解为时域调度和频域调度 2 个次序执行的步骤，进而结合业务 QoS 保证的要求对算法做了进一步优化，从而实现一种低复杂度的调度器(QPF)，最后对调度器主要性能进行仿真分析。

2 调度算法数学模型

MAC 层分组调度器用于动态分配 LTE 网络的资源块(RB)——由频域 12 个子载波和时域 0.5 ms (时隙长度)的二维资源定义。参考文献[8]，在一个调度时间片内为 M 个用户分配 N 个子载波，根据公平比例算法，最优的 RB 分配可以建模为

$$\max \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \frac{C_{m,n} R_{m,n}(t)}{R_m(t)} \quad (1)$$

s. t.

$$C_{m,n} \in \{0,1\} \quad (2)$$

$$\sum_{m=1}^M C_{m,n} = 1, n = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

$$\sum_{n=1}^N C_{m,n} R_{m,n} \geq R_{m,\min}, m = 1, 2, \dots, M \quad (4)$$

式(2)和式(3)用于满足资源分配的约束，式(2)中 $C_{m,n}$ 取 1 说明 t 时刻第 n 个 RB 被分配给 m 用户；式(3)说明某个时刻一个 RB 只能被分配给一个用户；式(4)用于满足速率 QoS 保证的约束， t 时刻内 m 用户的速率应大于下门限(GBR)。

$R_{m,n}(t)$ 为 t 时刻用户 m 在第 n 个 RB 上可以获得的瞬时数据速率。根据文献[9]，瞬时数据速率和 SINR 呈对数关系，即香农修正截短公式为

$$R_{m,n}(t) = w_n \ln(1 + b \cdot \text{SINR}_{m,n}(t)) \quad (5)$$

其中， w_n 为第 n 个 RB 占用的带宽； β 为常数衰减因子； $\text{SINR}_{m,n,k}$ 为当前 k 时刻用户 m 在第 n 个 RB 上可以获得的信号干扰噪声比，与用户与基站的距离、移动速度和无线信道有关。

由于式(1)是非线性函数，因此由式(1)~式(4)构成的是一个非线性规划问题，最优解可以通过穷举 M^N 个可能的分配方案获得，算法复杂度为 $O(M^N)$ ，且只能提供对速率的 QoS 保证，不能满足 LTE 的分组调度需求。

3 分组调度器设计

3.1 线性化降低复杂度

相对而言，人们对线性规划问题的研究更为充分，对于其中的 P 类问题可以直接得到解的显性表达式，对于 NP 和 NPC 问题也提出了多种高效率的解或最优解迭代算法，因此通过将非线性规划问题线性化，可以极大降低解最优化问题的计算复杂度。参考文献[10]，将二维资源分配映射表 $C_{m,n}$ 改写成一维的 x 列向量，如下

$$\begin{aligned} x &= [x_M^{1T} \ x_M^{2T} \ \dots \ x_M^{MT}]^T \in \{0,1\}^{MN \times 1} \\ x_M^m &= [x_{m,1} \ x_{m,2} \ \dots \ x_{m,N}]^T \in \{0,1\}^{N \times 1} \\ x_{m,n} &= C_{m,n} \end{aligned}$$

其中， x_K^k 代表 k 时刻被选中的用户， $x_{k,m}$ 代表 k 时刻 m 被分配的 RB。

同理，

$$\begin{aligned} r &= [r_M^{1T} \ r_M^{2T} \ \dots \ r_M^{MT}]^T \in \mathbf{R}^{MN \times 1} \\ r_M^m &= [r_{m,1} \ r_{m,2} \ \dots \ r_{m,N}]^T \in \mathbf{R}^{N \times 1} \\ r_{m,n} &= C_{m,n} R_{m,n}(t) / R_m(t) \end{aligned}$$

这样式(1)可以改写成 $r^T x$ 。

采用下面的处理方式可以对式(3)~式(4)做类似的改写。

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} a_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & a_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & a_M \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{M \times MN} \\ a_m &= [R_{m,1} \ R_{m,2} \ \dots \ R_{m,N}] \in \mathbf{R}^{1 \times N} \\ R_{\min} &= [R_{1,\min} \ R_{2,\min} \ \dots \ R_{M,\min}]^T \in \mathbf{R}^{M \times 1} \end{aligned}$$

式(4)可以改写成 $Ax \geq R_{\min}$ 。

$$B_{MN} = \begin{bmatrix} b_N^1 & b_N^1 & L & b_N^1 \\ b_N^2 & b_N^2 & L & b_N^2 \\ \parallel & \parallel & O & \parallel \\ b_N^N & b_N^N & L & b_N^N \end{bmatrix} \in \{0,1\}^{N \times MN}$$

$$\begin{cases} b_N^1 = [10L0] \in \{0,1\}^{1 \times N} \\ b_N^2 = [01L0] \in \{0,1\}^{1 \times N} \\ \parallel \\ b_N^N = [00L1] \in \{0,1\}^{1 \times N} \end{cases}$$

$$E = [11L1] \in \{1\}^{N \times 1}$$

式(3)可以改写成 $Bx \leq E$ 。

最后，式(1)~式(4)可以表达为

$$\max r^T x \tag{6}$$

$$\text{s.t. } x_i \in \{0,1\}, i=1, L, MN \tag{7}$$

$$Bx \leq E \tag{8}$$

$$Ax \geq R_{\min} \tag{9}$$

根据上述方法首先为 t 时刻确定需要调度的第 m 个用户，其次为该用户调度最佳的子载波，从而将一个复杂的二维资源调度问题，转化为一维的资源调度问题，二者完全等价，但调度复杂度明显降低。根据线性规划定理^[11]最优解必定在可行域的一个顶点取得，而式(6)~式(9)的最优解一定在离散的点上取得，因此只要将这些离散点设置为线性规划问题的可行域顶点，就可以采用已有的线性规划算法寻找最优解。根据文献[12]，采用典型的 Branch & Bound 迭代算法计算复杂为 $O(M^2N^2 \cdot (M+N))$ 已经有了明显的下降，即通过分步调度可以明显降低复杂度。

3.2 多维 QoS 保证能力

LTE 网络的 MAC 层主要包含 3 个子模块，即分组调度器(PS)、混合自动重传(HARQ)控制器和链路自适应(LA)控制器，其中 LA 控制器主要对 PELR 提供保证，而调度器主要对 GBR/MBR 和 PDB 提供保证^[13]。

为实现对速率和时延的 QoS 保证，需对式(1)中的 $R_{m,n}(t)$ 进行修正，考虑到 GBR 业务和 Non-GBR 业务对速率保证的不同要求，需分开处理。对于 GBR 业务，有

$$R_{m,n}(t) = e^{a_m(GBR_m - \bar{R}_m(t))} \left(\frac{T_m}{T_m - W_m(t)} \right)^2 R_m(t) \tag{10}$$

其中，第 1 部分提供满足 GBR 保证，与优先级呈

指数关系；第 2 部分提供满足最大时延保证，与优先级呈根号关系；第 3 部分提供多用户分集增益，与优先级成线性关系。因此该算法优先提供速率保证，其次考虑多用户增益，最后提供时延保证。

对于 Non-GBR 业务，有

$$R_{m,n}(t) = \left(\frac{T_m}{T_m - W_m(t)} \right)^2 R_m(t) \tag{11}$$

式(10)和式(11)中的参数如表 1 所示。

对于下行调度，调度是基于无线接入承载 (RAB)，可以按不同业务分别计算优先级；对于上行调度，调度是基于 UE，因此 UE 的优先级可以是与该 UE 相关的所有业务优先级的累加。

表 1 调度优先级计算主要参数及其含义

参数	含义
a_m	可调的调度参数，取值范围[0,1]，增大该值速率因子的重要性提供
GBR_m	第 m 个业务的保证比特率(k-bit/s)
$\bar{R}_m(t)$	第 m 个业务 t 时刻(第 t 个 TTI)的指数滑动平均比特率(k-bit/s)
$R_m(t)$	第 m 个业务 t 时刻的瞬时平均比特率(k-bit/s)，需将分配给 m 用户的多个 RB 对应的比特率累加得到
$W_m(t)$	第 m 个业务 t 时刻缓冲区对头分组的等待时延，等于当前时间减去到达时间。对于实时业务，若 $W_m(t) > T_m$ 则丢弃该分组
T_m	第 m 个业务容许的最大时延。对于非实时业务，为无穷大
?	可调的调度参数，取值范围[0,1]，增大该值分组时延因子的重要性提高
a	指数滑动平均参数， $a=1/(? \cdot TTI)$ ，取值范围[0,1]，增大该值平滑效果越好，但对衰落响应越不敏感

3.3 算法实现过程

根据 3.1 节的线性化原理，本文调度器(QPF)分为时域和频域 2 个部分，时域调度器(TDPS)和频域调度器(FDPS)，分别完成用户调度和载波调度。在 FDPS 中又充分考虑 GBR 和 Non-GBR 业务的差异性，利用了 3.2 节的速率修正算法，对 GBR 业务采用贪婪法优先分配，对 Non-GBR 业务则以减少掉线为原则采用“尽力而为”方式分配。

首先 TDPS 根据测量到的 CQI(SINR)、缓冲区状态报告(BSR，缓冲区长度、队头分组等待时延)、业务历史吞吐量、NACK(SDU 误块率)和业务的 QoS 最低要求计算用户优先级确定下一个 TTI 将被调度的用户，实现 QoS 保证。为进一步降低复杂度，可根据 LTE 的控制信道的容量、可用 RB 数和系统设定的每用户最少 RB 数，将 TDPS 输出的用户数限制为 N_{mux} 个。

然后 FDPS 基于优先满足 GBR 业务和尽量满足 Non-GBR 接入的原则完成向被选中的用户分配 RB,为用户分配质量好的信道,避免经历深度衰落,实现多用户分集增益,具体如下。

1) 对 GBR 业务按业务优先级进行排序,然后依次为每个业务按最大速率准则分配 RB,使各业务获得的速率不低于 GBR 值。

2) 对于剩余的 RB 资源,以标准的比例公平(PF)调度算法 $m^* = \arg \max \frac{R_{m,n}(t)}{\bar{R}_m(t)}$ 分配给 Non-GBR 业务。

$\bar{R}_m(t)$ 为当前 t 时刻用户 m 的平均数据速率,其更新公式为

$$\bar{R}_m(t) = (1-a)\bar{R}_m(t-1) + a \cdot \sum_{n=1}^N C_{m,n} R_{m,n}(t) \quad (12)$$

其中, a 为指数滑动平均参数,取调度周期自然整数倍的倒数。

具体算法如下。

1) 初始化

(a) 设置待调度业务集合 $M=\{1,2,\dots,M\}$,可用子载波集合 $N=\{1,2,\dots,N\}$,保证速率集合 $GBR=\{g_1, g_2, \dots, g_M\}$,分配矩阵 $Y=\{0\}$,子载波发射功率相等且 $p_n=P_t/N$ 。业务初始速率 $R(0)=\{(S r_n)/M\}$ 。

(b) 设置 FDPS 可同时调度的业务数为 M_{mux} 个,应略大于 HARQ 进程数 8,通常设置为 10 个。

2) 调度检查

(a) 要求至少存在一个空闲的 HARQ 进程或者当前需要 HARQ 重传。

(b) 要求缓冲区数据长度大于预设值 B_b (避免调度过小的数据块,增加调度信令负荷,可设置 B_b 为采用最高编码和码率时单用户可调度数据总量的一半)或者分组时延大于预设值 T_b (避免过于频繁的调度,增加信令负荷,可设置为最大可容许时延的一半)。

(c) 按上述要求将通过检查的业务送入 TDPS 等待调度,个数为 M_{present} ;否则,空转等待下一个调度周期。

3) TDPS 调度

(a) If $M_{\text{present}} \geq M_{\text{mux}}$, 直接送入 FDPS 等待调度。

(b) Else 根据业务属性(GBR 或 Non-GBR)分别按式(10)和式(11)进行用户优先级计算。选择最多 M_{mux} 个业务送入 FDPS 等待调度。

4) FDPS 调度

(a) 将业务按属性分为 GBR 集合 F_{gbr} 和 Non-

GBR 集合 $F_{\text{non-gbr}}$

(b) While $F_{\text{gbr}} \neq \{\}$

按业务优先级从高到低排序

从对头取一个业务 m

While $R_m < g_m$ 且 $N \neq \{\}$

将 $n^* = \arg \max \{r_{m,n}\}$ 的子载波分配给 m 业务

$$R_m = R_m + r_{m,n^*}$$

标记分配矩阵 $y_{n^*} = 1$, 并从集合 N 中删除 n^*

If $R_m \geq g_m$

从集合 F_{gbr} 中删除 m

从集合 GBR 中删除 g_m

(c) While $F_{\text{non-gbr}} \neq \{\}$ and $N \neq \{\}$

对载波 $\%$, 按传统的比例公平 $m^* = \arg \max \{r_{m,\%} / R_m\}$, 将载波分配给 m^* 用户

$$R_{m^*} = R_{m^*} + r_{m^*,\%}$$

标记分配矩阵 $y_{\%} = 1$, 并从集合 N 中删除 $\%$

5) 调度后处理

(a) 按式(12)更新各业务的平均速率;

(b) 循环执行 2)~5) 直至完成所有数据的发送。

3.4 复杂度分析

为降低复杂度,该调度器采用时域调度和频域调度相分离的技术,通过时域调度将频域调度的用户数限制在 N_{mux} 个之内,有效控制了频域调度的复杂性,同时在频域调度中又使用了贪心算法可在一次运算之内完成分组调度,进一步降低了调度器的计算复杂度。

TDPS 调度需要计算 M 个业务的优先级,并排序,算法复杂度为 $O(M+M \lg M)$ 。FDPS 的第 1 部分为 $M_{\text{mux}1}$ 个业务做排序,且最多需要做 $M_{\text{mux}1} \times N$ 次比较,算法复杂度为 $O(M_{\text{mux}1} \lg M_{\text{mux}1} + M_{\text{mux}1} \times N)$ 。FDPS 第 2 部分为剩余的 N_2 个子载波分配用户,需要做 $M_{\text{mux}2} \times N_2$ 次比较,算法复杂度为 $O(M_{\text{mux}2} \times N_2)$ 。因此整个算法的复杂度为 $O(M \lg M + 2 \times M_{\text{mux}} \times N)$ 。考虑到实际网络中 $M \sim N$, 且 $M \sim M_{\text{mux}}$ 时, $O(M \lg M + 2 \times M_{\text{mux}} \times N) \sim O(M \lg 2M) \sim O(M \lg N)$ 。

4 仿真与性能分析

4.1 仿真器与参数

仿真场景为具有固定发射功率的单个全向小区,有关仿真器及其参数的说明见文献[9]。小区只承载 2 种业务:文件传输和视频电话,其业务参数如表 2 所示。

表 2 业务模型及其参数

典型业务	业务类型	保证速率/(kbit·s ⁻¹)	延迟预算/ms	Object 大小/kbit	Session 长度/Object 数量	平均会话大小/kbit
视频电话	GBR	110	150	Exponential, mean=1 100, min=55, max=5 500	1	1 100
文件传输	Non-GBR	BE	8	log-normal, mu=500, sigma=1, min=20, max=7 500	1	500

有关业务的模型及其参数的说明见文献[14]。对于视频电话,当分组时延超过 150 ms 做分组丢失处理。其他仿真参数如表 3 所示。

为仿真系统在不同业务负荷下 3 种不同算法的性能差异,设定 2 种业务的呼叫数占比为 50%和 50%,呼叫以相同的泊松过程到达。表 4 为不同到达率的小区负荷。

表 3 仿真系统主要参数

参数名称	取值	参数名称	取值
eNodeB 发射功率	46 dBm	a_m	6.25×10^{-5}
系统带宽	20 MHz	a	0.01
小区覆盖距离	1.5 km	?	0.75

表 4 不同业务达到率对应的呼叫数(业务占比 50%:50%)

业务	Vo11	Vo12	Vo13	Vo14	Vo15	Vo16
平均达到间隔/s	0.4	0.2	0.1	0.08	0.06	0.03
呼叫数	6 250	12 500	25 000	31 250	41 667	83 333
总业务量/(Mbit·s ⁻¹)	19.88	39.75	79.50	99.38	132.50	265.00

4.2 参考调度算法

参考调度算法 1(PS_REF1)采用简单的 PF 调度算法,通过遍历各个 RB(子载波),将资源分配给具有最大速率比值的业务 m^* 。

$$m^* = \arg \max_{1 \leq m \leq M} \{r_{m,n}(t) / \overline{R}_m(t)\} \quad (13)$$

参考调度算法 2(PS_REF2)在 PS_REF1 的基础上,进一步考虑了时延的 QoS 保证,但与本文的方法相比缺少对保证速率的 QoS 保证的考虑。

$$m^* = \arg \max_{1 \leq m \leq M} \{r_{m,n}(t) / \overline{R}_m(t) (1 + \frac{W_m(t)}{T_m - W_m(t)})^\zeta\} \quad (14)$$

其中, $\overline{R}_m(t)$ 在第 t 帧调度结束后更新,更新方法同式(12),该方法的时间复杂度为 $O(M^N)$ 。

4.3 仿真结果分析

1) 小区平均吞吐量对比

小区平均吞吐量定义为各业务平均吞吐量的总和,单位为 Mbit/s。从图 1 可以看到,在低业务

负荷时 REF1 由于更加注重对信道条件的考虑,因此有更大的小区总吞吐量。随着业务负荷的增加,QPF 算法的优势得到了体现,特别在接近接近满负荷(100 Mbit/s),性能较 REF1 提升了 7.5%。REF2 算法在负荷不是很高的情况时延因素尚未作用,整体性能与 REF1 相当。当小区进入超负荷状态时,REF1 的视频电话由于存在大量的超时分组被丢弃,因此小区总吞吐量快速下降。而 REF2 也由于对视频电话的保证比特率未加考虑,也存在分组超时丢弃的问题,小区总吞吐量较 QPF 略有下降。

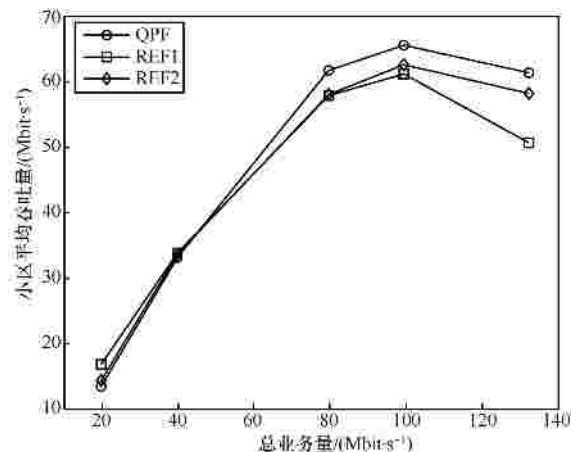


图 1 总业务量与小区平均吞吐量的关系

2) 小区覆盖能力对比

覆盖能力即小区覆盖边缘速率定义为 95% 分组速率可以达到的最小速率,单位为 kbit/s。从图 2 可以看到,在低负荷时,3 种算法都随着小区内的负荷增加而增加,但 REF1 性能好于 REF2 和 QPF。当系统超负荷后,QPF 的性能下降较慢,并较好地保证视频电话的 GBR 要求。REF2 则由于对时延权重的增加,致使高负荷状态下边缘覆盖能力较 REF1 有所下降。

3) 小区容量对比

小区容量定义为速率大于边缘覆盖速率的分组比例,单位为%。从图 3 可以看到,在低负荷时,3 种算法都考虑了速率的因素,因此,都能实现高的分组速率,表现为分组速率接近于 100%,超过边缘覆盖速率。随着小区负荷进入超负荷状态,QPF

因为增加了对基本速率的要求，性能明显要好于 REF2 和 REF1。

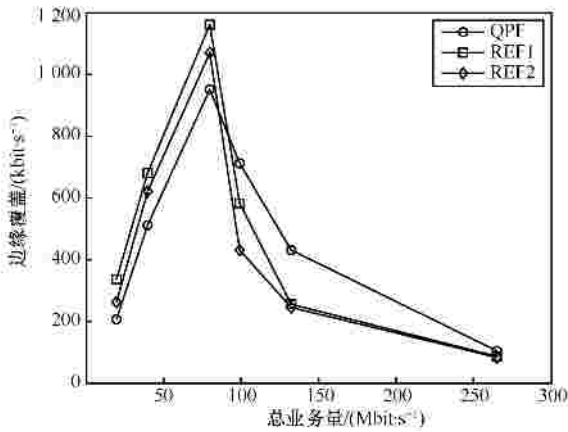


图 2 总业务量与边缘覆盖速率的关系

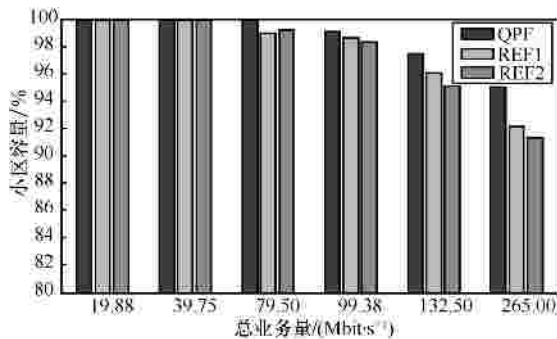


图 3 总业务量与小区容量的关系

4) 小区分组平均时延对比

分组时延定义为分组得到调度的时间与分组到达缓冲区的时间差。从图 4 可以看到 QPF 和 REF2 都较好地实现了视频电话时延的保证，而 REF1 的 2 种业务则完全没有体现出时延上的差别。对于不保证时延的业务，在低负荷状态时，REF2 和 REF1 相当，好于 QPF；在高负荷状态时，QPF 和 REF2 相当，好于 REF1。

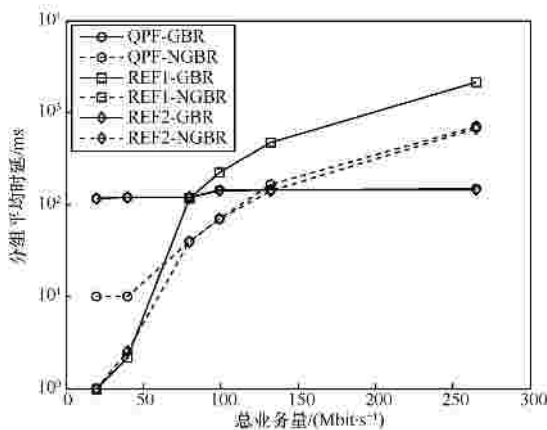


图 4 总业务量与分组平均时延的关系

5) 小区各业务平均吞吐率

图 5 为 3 种不同算法下小区内 2 种业务平均吞吐率的总和。可以看到，QPF 较好地实现了对 GBR 的保证，随着业务负荷的增加，视频电话的吞吐量呈线性增加。正是通过对视频电话业务的速率和时延的同步考虑，QPF 才在高负荷状态下，获得比 REF1 和 REF2 更好的性能。

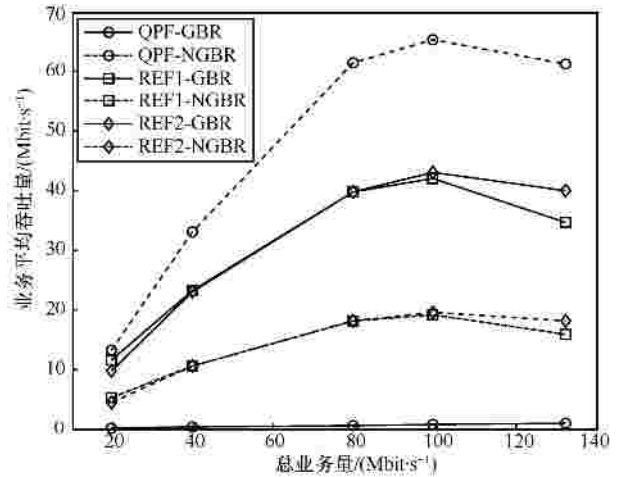


图 5 总业务量与各业务吞吐量的关系

5 结束语

MAC 层的分组调度决定了 LTE 网络提供业务的质量和效率，在移动通信系统中处于核心的支配地位。为实现了一个低复杂度的、具有全面业务支持能力和 QoS 控制能力的分组调度器，本文给出了相应的算法的原理及其实现过程。理论分析不但证明线性化处理可以有效降低实现复杂度，而且为调度器的实现提供了设计依据——调度器 QPF 算法分为时域和频域 2 个调度步骤。在频域调度部分充分利用 GBR 和 Non-GBR 业务的特点，通过对实时速率采用历史速率和时延进行校正，既实现了业务 QoS 保证，又实现了多用户分集增益，该调度器具有性能均衡和复杂度低的特点。分析和仿真表明，该算法复杂度从 $O(M^N)$ 降低为 $O(M \ln N)$ ，比文献[15]算法的复杂 $O(MN)$ 还要好一些；同时各项性能较为均衡，且在高负荷时部分性能较参考算法有 10% 的提升，即复杂度的下降并未导致性能的下降，较好地解决了二者之间的矛盾。

参考文献：

[1] 3GPP TS 36.300 V9.3.0. Overall Description; Stage 2 (Release 9)[S].

2010.

[2] 李方伟, 王可, 朱江等. TD-HSUPA 的自适应调度算法[J]. 通信学报, 2012, 33(5): 177-182.

LI F W, WANG K, ZHU J, *et al.* Novel adapting packet scheduling of TD-HSUPA[J]. Journal on Communications, 2012, 33(5): 177-182.

[3] 3GPP TS 23.203 V10.2.0. Policy and Charging Control Architecture (Release 10)[S]. 2010.

[4] 沈嘉, 索士强, 全海洋等. 3GPP 长期演进(LTE)技术原理与系统设计[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008.

SHEN J, SUO S Q, QUAN H Y, *et al.* 3GPP Long Term Evolution: Principle and System Design[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2008.

[5] PEDERSEN K I, KOVACS I Z, MOGENSEN P E. QoS oriented time and frequency domain packet schedulers for the UTRAN long term evolution[A]. IEEE-VTC[C]. Singapore, 2008. 2532-2536.

[6] FRAIMIS I G, KOTSOPOULOS S A. QoS-based proportional fair allocation algorithm for OFDMA wireless cellular systems[J]. Communications Letters, IEEE, 2011,15(10):1091-1093.

[7] DIAZ I F, DIMITROVA D C, SPAEY K, *et al.* Sensitivity analysis of the optimal parameter settings of an LTE packet scheduler[A]. IEEE-VTC[C]. Taipei, Taiwan, 2010. 1-6.

[8] AL-RAWI M, JANTTI R, TORSNER J, *et al.* On the performance of heuristic opportunistic scheduling in the Uplink of 3G LTE networks[A]. IEEE-PIMRC[C]. Cannes, 2008.1-6.

[9] 3GPP TR36.942 v10.0.0. Radio Frequency(RF) System Scenarios (Release 10)[S]. 2010.

[10] CAN T, CENK T. A low complexity resource allocation algorithm for OFDMA systems[A]. IEEE-SSP[C]. Caidiff, 2009.689-692.

[11] 黄红选, 韩继业. 数学规划[M]. 北京:清华大学出版社, 2006.

HUANG H X, HAN J Y. Mathematical Programming[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.

[12] ZHANG Y J, BEN L H. Multiuser adaptive subcarrier-and-bit allocation with adaptive cell selection for OFDM systems[J]. IEEE Trans Wireless Communications, 2004, 3(5):1566-1575.

[13] PEDERSEN K I, KOLDING T E, FREDERIKSEN F, *et al.* An overview of downlink radio resource management for UTRAN long-term evolution[J]. Communications Magazine, IEEE, 2009,47(7): 6-93.

[14] NGMN Radio Access Performance Evaluation Methodology[R]. 2008.

[15] YAACOUB E, AL-ASADI H, DAWY Z. Low complexity scheduling algorithms for the LTE uplink[A]. IEEE-ISCC[C]. Sousse, 2009. 266-270.

作者简介：



赵飞龙 (1977-) 男, 福建莆田人, 福州大学博士生, 主要研究方向为移动通信网络的规划与优化技术。

更正说明

本刊 2013 年 11 期《基于 ORB 的镜头边界检测算法》一文作者“唐剑琪, 谢林江, 袁庆生, 张冬明, 包秀国, 郭薇”中的“袁庆生”更改为“袁庆升”。
特此说明！