

基于软件定义无线网络的云业务上行调度方案

潘甦, 肖榜, 陈宇青, 刘胜美

(南京邮电大学宽带无线通信与传感网技术教育部重点实验室, 江苏 南京 210003)

摘要: 针对无线云计算的业务特点, 基于软件定义无线网络(SDWN, software-defined wireless network), 提出了一种新的能适配云业务特点的 LTE 上行调度方案, 该方案首先将资源分配问题归纳成二进制整数规划问题进行求解, 然后利用动态规划计算出每个调度时隙内云业务的最佳发送速率, 最后通过 SDWN 框架下的 QoS 控制方法动态调节云业务的发送速率, 使云业务的发送速率与当前信道条件成正比, 从而在保障多业务速率需求的同时, 满足云业务能量消耗最小的需求, 通过仿真验证算法的性能。

关键词: SDWN; 无线云; LTE 调度; 最优化

中图分类号: TN915.04

文献标识码: A

Uplink scheduling scheme for cloud service based on software-defined wireless network

PAN Su, XIAO Bang, CHEN Yu-qing, LIU Sheng-mei

(Key Lab of Broadband Wireless Communication and Sensor Network Technology of Ministry of Education, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: A LTE uplink scheduling scheme matching the features of wireless cloud services was proposed for the SDWN (software-defined wireless network). The scheme first solved the resource allocation problem by using the binary integer programming method, and then calculated the optimal transmission rate of cloud services in each time slot using the method of dynamic programming, finally adjusted the transmission rate of cloud services proportional to the current channel status using QoS control method in the framework of SDWN. The proposed scheme minimizes the energy consumption of cloud services while ensuring the transmission rate demand of multiple services. The performance of the algorithm is verified by simulation.

Key words: SDWN, wireless cloud, LTE scheduling, optimization

1 引言

近年来, 无线应用呈现爆炸式增长趋势, 然而, 目前的网络并不能非常有效地适配每一种应用, 如 LTE (long term evolution) 系统根据 QoS (quality of service) 把业务归为 9 种服务类别 (QCI, QoS class identifier)^[1], 每类 QCI 中的所有业务都采用同样的调度转发策略。由于 3GPP 并未指定标准的 LTE 上行调度方案, 针对这 9 类 QCI, 业界广泛采用了 3 种典型的上行调度方案^[2], 即最大化系统吞吐量的

调度方案、优先保障 QoS 的调度方案和保障 QoS 并优化功率的调度方案。然而, 这 3 种调度方案都不能很好地适配层出不穷的新业务。特别地, 云计算作为一种新业务大量出现在无线通信网络中, 如虚拟云办公、云图像处理等, 通过将本地需要复杂运算的大量数据上传到云端处理, 用户可以摆脱移动终端硬件资源的限制, 获得云端强大的运算和存储性能, 完成所需要的服务。例如, 在移动云图像处理中, 由于终端性能的限制, 移动用户往往需要在数秒时间内将本地数十兆比特的图像数据上传

收稿日期: 2015-10-24; 修回日期: 2016-10-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61271235); 江苏高校优势学科建设工程基金资助项目

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61271235), Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institution

到云端,由云端的复杂算法进行快速处理,然后获取运算结果。值得注意的是,在获取云端便捷服务的同时,云业务高吞吐量的数据上传导致的能量消耗,对于电池容量十分有限的无线终端来说是个不可忽略的影响,因此,云业务数据上传与一般业务有不同的要求,即对实时的速率并没有严格要求,而是需要在限定时间内将本地待处理的数据上传到云端,同时,要求传输花费的总能量消耗最小,以延长手机电池的使用时间。因此,无线云业务的 QoS 需求被定义为在一定的截止时间 T 内以最小的能量消耗完成数据量为 L 的数据传送^[3,4]。根据文献[3,4]对这类问题的研究,要使能量消耗最小(即功率在时间上的和最小),需满足传送的速率与当前的信道状态的好坏成正比,以获得功率在时间上的累积最小,这与每个调度时隙内功率最小是不同的优化目标。因此,在现有的 LTE 系统中,无论将云业务归入哪一类的 QCI,采用上述哪一种调度方案,都只能将其和同类 QCI 的其他业务做同样处理,采用同样的、预定义的资源分配方案,因而不能满足其能量消耗最小的需求。由此可见,LTE 中将多种业务归为一类 QoS 的调度方法(CBQC, class-based QoS control)不能灵活地针对某一种具体的业务进行 QoS 保障,究其原因,现有网络结构中相互隔离的节点各有自己的控制系统,它们需要相同的预先定义的配置来保障整个网络的 QoS 性能,所以把所有数据流分成固定的几类业务进行处理。

软件定义无线网络(SDWN, software-defined wireless network)为这个问题的解决提供了新的思路,它是 SDN(software-defined network)在无线领域的拓展,可以改变整个网络不能灵活地进行动态配置的现状,在这种新的网络结构中,网络控制层和转发层相互分离,允许通过软件定义网络节点的转发行为^[5],本文采用 SDWN 下的基于应用程序的 QoS 控制方法,将调度方案从业务分类的束缚中解放出来,本文以云业务为例,提出了一种能根据云业务的特点进行灵活适配的上行调度方案,能更好地满足云业务能量消耗最小的需求,据了解,目前还没有文献进行这方面的研究。

2 文献回顾

目前,国内外关于 SDWN 的研究主要集中在网络架构的探讨与南/北向接口的实现上,文献[6]提出了一种关于 SDWN 的网络架构,包括无线覆

盖、网关位置等细节,并展现了其按需配置网络节点的灵活性。文献[7]介绍了一种基于 SDWN 的 5G 网络架构,其中,主要从控制和数据 2 个平面讨论了具体逻辑结构、功能和接口的实现。文献[8]提出了一种在 SDWN 中分布式控制器的设计方案,并展示了该方案在控制平面的管理、性能维护上的优越性。文献[9]提出在北向接口中将网络的控制和管理功能剥离开来,并通过实验结果证实了方案的可行性。然而,正如文献[7]指出:“上述文献都是在业界标准尚未统一的基础上对 SDWN 做出的架构性尝试,研究内容比较宽泛,并未涉及针对 SDWN 网络特点的具体算法”。文献[10]首先尝试将 SDWN 的思想用在无线业务调度中,提出了基于不同业务的 QoS 控制(ABQC, application-based QoS control)框架,但没有给出针对 LTE 业务的具体调度方法。而目前对于 LTE 上行调度方案的研究主要集中在现有的网络结构下。文献[11~14]研究了最大化系统吞吐量和优先保障 QoS 这 2 种调度方案,它们都以最大化系统吞吐量为主要目的,在这 2 种调度方案下用户总是以最大的速率进行数据传送,显然,不满足云业务能量最小的条件。文献[15]介绍了一种保障 QoS 并优化功率的调度方案,即在满足子信道连续和多业务速率限制的前提下,优先选择功率最小的资源分配方案。该方案能在保障多业务速率需求的同时,最小化所有用户的功率消耗总和,能在一定程度上减小云业务在上行调度中的能量消耗,但仍不能根据信道的变化调整对云业务的资源分配策略;本文将新的网络结构 SDWN 和 ABQC 框架应用到实际的 LTE 系统中,并提出了一种 SDWN 下的上行调度方案,能在满足多业务速率需求的同时,动态地进行子信道的分配并根据当前信道质量状况为云业务进行速率调整,达到最优化其能量消耗的目的。

3 系统模型

考虑一个有 M 个用户、单一基站的蜂窝网络,假设每个用户只有一种业务,不失一般性,第 i 个用户使用无线云业务,该业务要求在时间 T 内以最小的能量消耗完成数据量为 L 的数据传送,以优化手机端的能量消耗。系统采用 SC-FDMA (single carrier FDMA) 为上行多址接入技术,为降低峰值平均功率比,该接入技术要求分配给每个用户的子载波都是连续的^[16],本文将一组连续的子载波称为

一个子信道，因此，系统带宽 W 被分成了 K 个带宽为 W_s 的正交子信道，用户 $m(m=1, \dots, M)$ 在子信道 $k(k=1, \dots, K)$ 上的信道增益表示为 $h_{m,k}(t)$ ，接收端的子信道噪声功率密度为 N_0 W/Hz，用户最大发射功率为 P^u ， K_m 为分配给用户 m 的子信道集， $|K_m|$ 为这个集合的势， P_m 为用户 m 的发射功率，用户 m 在 K_m 上的速率为

$$R_{m,K_m} = \sum_{k \in K_m} W_s \log \left(1 + \min \left(\frac{P_{m,K_m}}{|K_m|}, \frac{P^u}{|K_m|} \right) \frac{h_{m,k}(t)}{N_0 W_s} \right), \forall m \in M \quad (1)$$

用 $\overline{h_{i,K_i}}(t)$ 表示在子信道集 K_i 上信道增益的平均值，云用户 i 在子信道集 K_i 上的速率 R_{i,K_i} 可以近似地表示为^[17]

$$R_{i,K_i} = |K_i| W_s \log \left(1 + \min \left(\frac{P_{i,K_i}}{|K_i|}, \frac{P^u}{|K_i|} \right) \frac{\overline{h_{i,K_i}}(t)}{N_0 W_s} \right) \quad (2)$$

$$\text{其中，} \overline{h_{i,K_i}}(t) = \frac{\sum_{k \in K_i} h_{i,k}(t)}{|K_i|}.$$

假设调度器的调度周期 TTI 为 Δt ，调度器已知当前周期内的信道增益 $h_{m,k}(t)$ ，且信道增益在每个周期内为恒定值，不同时段内的信道状况是独立同分布的。将云业务的时间限制 t 等分为 T 个时段，每个时段对应一个调度周期，时段以逆序的形式表示，即 $t=T$ 表示云业务参与调度的第 1 个时段， $t=T-1$ 表示第 2 个时段，以此类推， $t=1$ 表示时间限制内的最后 1 个时段， $b(t)$ 表示 t 时段内传送的速率，为方便表示，本文令 Δt 为单位时间，则 $b(t)$ 等于 t 时段内传送的数据量， $\beta(t)$ 为在每时段传输之前剩余的数据量，有 $\beta(T)=L$ ， $\beta(t-1)=\beta(t)-b(t)$ 。 E_r 表示 t 时段内的能量消耗，将式(2)中 P_{i,K_i} 提出到等式右端，在 $P_{i,K_i} \leq P^u$ 时，有

$$P_{i,K_i}(t) = \frac{2^{\frac{b(t)}{|K_i|W_s}} - 1}{\overline{h_{i,K_i}}(t)} |K_i| N_0 W_s \quad (3)$$

相应的能量消耗为

$$E_r = P_{i,K_i}(t) \Delta t = \frac{2^{\frac{b(t)}{|K_i|W_s}} - 1}{\overline{h_{i,K_i}}(t)} |K_i| N_0 W_s \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可知，每时段内的能量消耗与时隙内的数据发送速率成正比，与当前时段内的信道增益成反比，因此，要满足云业务的能量消耗最小的特点，需要根据当前时段内云业务的信道增益 $\overline{h_{i,K_i}}(t)$ ，相应地调节该时段内的数据发送速率 $b(t)$ ，在满足 T 时段内完成数据量为 L 的数据传送和每时段内发送的数据量不大于剩余数据量 2 个限制条件下，最小化云用户总的能量消耗，因此，该业务的能量优化问题可表示为

$$\begin{aligned} \min_{b_1, \dots, b_T} E \left[\sum_{t=1}^T E_r(b(t), \overline{h_{i,K_i}}(t)) \right] \\ \text{s.t.} \quad \sum_{t=1}^T b(t) = L, 0 \leq b(t) \leq \beta(t), \forall t \end{aligned} \quad (5)$$

4 SDWN 下的 LTE 上行调度方案

首先，对本节涉及的主要符号进行统一定义和描述，如表 1 所示。

表 1 算法中主要符号定义与描述

符号	定义
R_i^0	云业务时段 t 的速率需求
R_m^0	用户 m 的速率需求
KA	所有满足连续性限制的分配方案集合
A_m	用户 m 的子信道分配矩阵
C	可能的分配方案数
r	速率矩阵
$r_{m,j}$	用户 m 在采用 A_m 中第 j 列对应的分配方案时获得的速率
$ K_{m,j} $	A_m 中第 j 列对应的分配方案中分配给用户 m 的子信道的个数
e	目标指数矩阵
$e_{m,j}$	用户 m 在采用 A_m 中第 j 列对应的分配方案时的目标指数
X	信道分配方案矩阵
$x_{m,j}$	用户 m 在采用 A_m 中第 j 列对应的分配方案时信道分配情况
$E_r(b(t), \overline{h_{i,K_i}}(t))$	云业务时段 t 的能量消耗
$Y_t(b(t), \overline{h_{i,K_i}}(t))$	云用户在时段 t 到 1 的最小能量消耗和
$\overline{Y}_t(b(t), \overline{h_{i,K_i}}(t))$	云用户在时段 t 到 1 的最小平均能量消耗和
v_x	x 时段内信道状态的估计
$G(v_1, \dots, v_T)$	v_x 的几何平均值，对信道状态的估计

4.1 云业务在现有网络框架下的调度方案

在现有网络中，LTE 系统调度是根据业务类型，采取预设的调度方案，常用的是基于 QoS 保障的最大化系统吞吐量调度方案或者以优化用户发送功率为主要目的的调度方案，本文将通过分析说明将云业务归入这 2 种现有的 LTE 调度方案中的任一类，都不能满足式(5)所列的云业务能量消耗的优化需求。

在现有网络基于 QoS 保障的最大化系统吞吐量调度方案中，每个时隙内的子信道分配准则为在满足用户获得的速率不小于其速率需求的同时，最大化当前时隙内所有用户获得的速率之和，由于云业务要求在时间 T 内完成数据量为 L 的数据传送，因此，在现有网络下云业务每时隙内的速率需求都至少为 $R_i^0 = \frac{L}{T}$ ，其中， R_m^0 表示用户 m 的业务对速率的要求。因此，一个调度时隙内的资源分配优化问题可表示为

$$\begin{aligned} & \max_{K_1, \dots, K_M \in KA} \sum_{m=1}^M R_{m, K_m} \\ \text{s.t. } & R_{m, K_m} = \sum_{k \in K_m} W_s \text{lb} \left(1 + \frac{p^u h_{m,k}}{|K_m| N_0 W_s} \right) \geq R_m^0, \forall m \in M \\ & K_m \cap K_{m'} = 0, \forall m \neq m' \in M \\ & R_i^0 = \frac{L}{T}, i \in M \end{aligned} \quad (6)$$

其中， p^u 为 UE 最大的发射功率。这种调度方案能在满足用户 QoS 需求的同时最大程度地提升系统吞吐量，然而其优化目标要求用户总是以最大的速率进行数据传送，在这种情况下，每时隙内都将使用最大允许的发送功率，显然不能使式(5)优化问题的目标函数最小，即不能满足无线云业务能量消耗最小的要求。

而在以优化用户发送功率为主要目的的调度方案里，每个时隙内资源分配的目标函数为使当前时隙内所有的用户发射总功率最小，限制条件为每个业务获得的速率不小于其速率需求，因此，一个调度时隙内的资源分配优化问题可表示为

$$\begin{aligned} & \min_{K_1, \dots, K_M \in KA} \sum_{m=1}^M P_{m, K_m} \\ \text{s.t. } & R_{m, K_m} = \sum_{k \in K_m} W_s \text{lb} \left(1 + \min \left(\frac{P_{m, K_m}}{|K_m|}, \frac{p^u}{|K_m|} \right) \frac{h_{m,k}}{N_0 W_s} \right) \geq \\ & R_m^0, \forall m \in M, K_m \cap K_{m'} = 0, \forall m \neq m' \in M, R_i^0 = \frac{L}{T}, i \in M \end{aligned} \quad (7)$$

这种调度方案通过调节每个用户的发送功率 p_{m, K_m} 来满足速率限制和优化目标，能在很大程度上减小用户的发送功率，但同时也牺牲了大量的系统吞吐量，业务几乎总是以满足要求的最低速率传送数据，此时仍然没有将用户的发送速率与信道增益联系起来，所以云业务用户的能量消耗也不是最小的，仍然有优化的空间。上述结论将在仿真结果中得到证明。

4.2 SDWN 下的调度方案

由此可见，在现有网络中无论采用哪种调度方案，都不能满足云业务的 QoS 需求，基于这种现状，本文基于新的网络架构 SDWN 提出了一种能满足云业务 QoS 需求的最大化系统吞吐量的调度方案。在 SDWN 下，系统把现有无线网络中分散在基站、网关等单个网络设备的控制功能转移到了集中的控制器上，让物理设备仅负责简单的数据转发和交换，并通过控制器来进行全局的、动态的数据流量管理，其逻辑视图如图 1 所示。

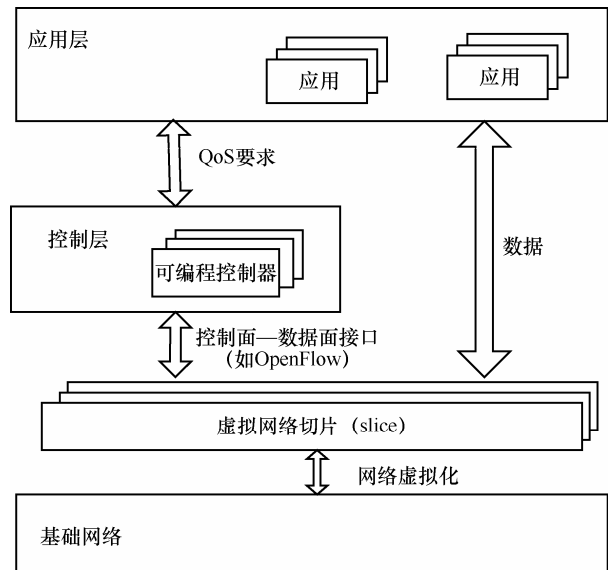


图 1 SDWN 的逻辑视图

因此，在现有网络中分散在各基站的调度功能，在 SDWN 下由集中的控制器来实现。图 2 对比了 SDWN 与现有网络对数据流的处理方式，在图 2(a)所示的现有网络中，由于业务被分成固定的几类，从而限制了对单个业务处理进行调配的空间；而 SDWN 下，可编程的集中控制的方式能够给流量处理提供足够的灵活性，从而可以利用图 2(b)所示的基于应用程序的 QoS 控制 (ABQC) 方法将云业务从现有的业务分类中抽离出来，根据每

时隙内的信道条件动态地为云业务配置当前最佳的发送速率，来保证云业务用户的能量消耗最小，这个最佳的发送速率即为式(5)优化问题的解。

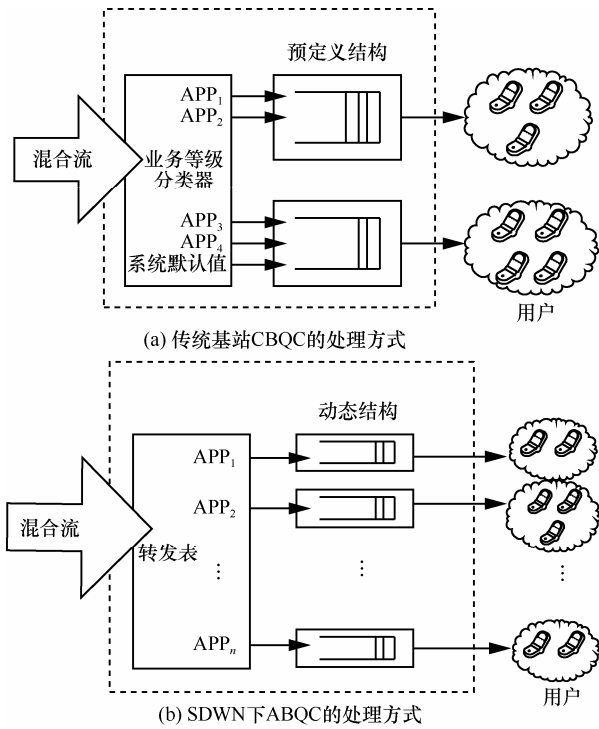


图 2 SDWN 与现有网络对数据流的处理

因此，在 SDWN 下的调度方案中，每个调度时隙内的资源分配问题可归纳为以最大化云业务以外的所有用户获得的速率之和为目标函数，限制条件为云业务外的每个用户获得的速率都不小于其速率需求，以及云业务的速率等于当前时隙内的最佳发送速率，即式(5)优化问题的解，具体表示如下

$$\begin{aligned}
 & \max_{K_1, \dots, K_M \in KA} \sum_{m=1}^M R_{m, K_m} \\
 \text{s.t. } & R_{m, K_m} = \sum_{k \in K_m} W_s \text{lb} \left(1 + \frac{P^u h_{m,k}}{|K_m| N_0 W_s} \right) \geq R_m^0, \\
 & \forall m \neq i \in M, K_m \cap K_{m'} = 0, \forall m \neq m' \in M, \\
 & R_{i, K_i} = \sum_{k \in K_i} W_s \text{lb} \left(1 + \frac{P_{i, K_i} h_{i,k}}{|K_i| N_0 W_s} \right) = b(t), i \in M, \\
 & K_i \cap K_m = 0, \forall i \neq m \in M
 \end{aligned} \tag{8}$$

其中， $b(t)$ 是式(5)问题的解。

显然，该调度方案的确定依赖式(8)中 2 个优化问题的求解，下面介绍求解方法。

式(8)是一个二维优化问题，它要求资源分配方案不仅能最大化系统吞吐量，而且能确保云业务以

最佳速率 $b(t)$ 进行数据传送。本文采用的方法是先所有用户的速率限制下以最大化系统容量为目标来进行子信道分配，得到云业务的子信道个数 $|K_i|$ 和相应的信道增益 $\overline{h_{i, K_i}}(t)$ ，此时 t 时隙内的资源分配问题变为

$$\begin{aligned}
 & \max_{K_1, \dots, K_M \in KA} \sum_{m=1}^M R_{m, K_m} \\
 \text{s.t. } & R_{m, K_m} = \sum_{k \in K_m} W_s \text{lb} \left(1 + \frac{P^u h_{m,k}}{|K_m| N_0 W_s} \right) \geq R_m^0, \forall m \in M, \\
 & K_m \cap K_{m'} = 0, \forall m \neq m' \in M
 \end{aligned} \tag{9}$$

其中， $R_i^0(t) = \frac{\beta(t)}{t}$ ，表示 t 时隙内云业务的动态速率需求。将当前时隙开始时剩余数据量 $\beta(t)$ 和剩余时间 t 的比值作为该时隙内的速率需求来参与对子信道的分配，是为了保障云业务能在时间 T 内完成数据量为 L 的数据传送。

1) 资源分配方案的确定

式(9)可以归纳成 0-1 整数规划问题来进行求解^[18]，确定最大化系统吞吐量时每个用户的信道分配方案，步骤如下。

① 列出每个用户的子信道分配矩阵，代表所有可能的分配方案。

由于分配连续性条件的限制，对任一用户都有 $C = \frac{1}{2} K^2 + \frac{1}{2} K + 1$ 种可能的分配方案，如共有 $K = 3$ 个子信道时，每个用户都有 $C = 7$ 种可能的分配方案，用户 m 的子信道分配矩阵为

$$A_m = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \forall m \in M \tag{10}$$

每个用户的子信道分配矩阵都是一个相同大小为 $K \times C$ 的矩阵，其中， K 行对应 K 个正交的子信道， C 列对应 C 种可能的分配方案，矩阵中的元素“1”代表子信道分配给该用户，“0”表示不分配。

② 分别求出每个用户在每种可能的分配方案下的速率，构成一个大小为 $MC \times 1$ 的速率矩阵 $r = [r_1, \dots, r_M]^T$ ，其中， $r_m = [r_{m,1}, \dots, r_{m,C}]^T$ ，其元素 $r_{m,j}$ 表示用户 m 在采用 A_m 中第 j 列对应的分配方案时获得的速率，其值可根据式(11)求出， $|K_{m,j}|$ 表示第 j 列对应的分配方案中分配给用户 m 的子信道的个数。

$$r_{m,j} = \sum_{k \in K_{m,j}} W_s \text{lb} \left(1 + \frac{P^u h_{m,k}}{|K_{m,j}| N_0 W_s} \right), \forall m \in M, \forall j \quad (11)$$

③ 为了保证用户的速率需求得到满足, 利用式(9)中的速率限制条件对 \mathbf{r} 进行筛选, 构造目标指数矩阵 \mathbf{e} 来保障用户的 QoS, 其元素 $e_{m,j}$ 表示用速率限制条件对方案进行筛选后, 用户 m 在 A 中第 j 种方案下的目标指数。筛选原则如(12)所示, 如果方案满足速率限制条件, 则其目标指数等于其速率; 否则将其目标指数置为负无穷, 以表示对方案的否定, 即

$$e_{m,j} = \begin{cases} r_{m,j}, r_{m,j} \geq R_m^0 \\ -\infty, \text{其他} \end{cases} \quad \forall m \in M, \forall j \quad (12)$$

④ 定义一个大小为 $MC \times 1$ 的列向量 $\mathbf{X} = [X_1, \dots, X_M]^T$ 来表示分配方案, 其中, $\mathbf{X}_m = [x_{m,1}, \dots, x_{m,C}]^T$, $x_{m,j} \in \{0,1\}, \forall j \in 1, \dots, C$, $x_{m,j}$ 为“1”时表示用户 m 采用分配矩阵中第 j 列对应的分配方案, 反之为“0”。

因此, 式(9)优化问题的优化目标可表示为在所有可能的方案中找到使所有用户目标指数之和最大的方案, 即

$$\max_{\mathbf{X}} \{\mathbf{e}^T \mathbf{X}\} \quad (13)$$

由于一个子信道最多只能分配给一个用户, 限制条件为

$$[A_1, \dots, A_M] \mathbf{X} \leq \mathbf{1}_K \quad (14)$$

每个用户用且只能用一种分配方案, 限制条件为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{1}_C^T & \dots & \mathbf{0}_C^T \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0}_C^T & \dots & \mathbf{1}_C^T \end{bmatrix} \mathbf{X} = \mathbf{1}_M \quad (15)$$

至此, 已将式(9)优化问题归纳成了一个 0-1 整数规划问题, 通过穷举法容易求得式(13)目标函数在式(14)和式(15)限制条件下的最优解, 即可确定当前调度时隙内的资源分配方案, 从而可得每个用户在当前时隙内获得的子信道数 $|K_i|$ 和相应的平均信道增益 $\overline{h_{i,K_i}}(t)$ 。

2) 最优速率 $b(t)$ 的求解

通过上文的分析, 在给定业务的子载波个数和相应的信道增益后, 通过在不同时隙中按信道增益调节速率, 则相应的发送功率能使在整个业务持续

期间能量消耗最小。这里, 可通过动态规划来依次确定时隙 $t (1, \dots, T)$ 内应传送的数据量, 其目标函数可以分为两部分之和, 第一部分为当前时刻的能量消耗 $Er_t(b(t), \overline{h_{i,K_i}}(t))$, 第二部分为剩余时刻预计的总能量消耗 $E \left[\sum_{s=1}^{t-1} Er_s(b(s), \overline{h_{i,K_i}}(s)) \right]$, 因此, t 时刻的决策问题为选择一个满足限制条件的最优速率 $b(t)$, 使两部分之和最小, 表示为

$$b(t) = \begin{cases} \arg \min_{0 \leq b(t) \leq \beta(t)} \{Er_t(b(t), \overline{h_{i,K_i}}(t)) + E \left[\sum_{s=1}^{t-1} Er_s(b(s), \overline{h_{i,K_i}}(s)) \right]\}, t = T, \dots, 2 \\ \beta(1), t = 1 \end{cases} \quad (16)$$

这是一个多阶段决策问题, 这里采用逆序迭代的方法进行递推, 即先确定最后一个时隙 $t=1$ 时的最优决策, 然后将结果代入 $t=2$ 时隙进行决策确定, 依次类推。为方便迭代过程的表示, 本文令 $Y_t(\beta(t), \overline{h_{i,K_i}}(t)) = \min_{0 \leq b(t) \leq \beta(t)} \{Er_t(b(t), \overline{h_{i,K_i}}(t)) + E \left[\sum_{s=1}^{t-1} Er_s(b(s), \overline{h_{i,K_i}}(s)) \right]\}$ 表示 t 时刻获得的最小能量消耗和, $\overline{Y}_{t-1}(\beta(t-1)) = E \left[Y_{t-1}(\beta(t-1), \overline{h_{i,K_i}}(t-1)) \right]$ 表示在最优决策时, $t-1 \sim 1$ 的所有时隙内传送 $\beta(t-1)$ bit 的数据预计需要耗费的能量代价, 即 $\overline{Y}_{t-1}(\beta(t-1)) = E \left[\sum_{s=1}^{t-1} Er_s(b(s), \overline{h_{i,K_i}}(s)) \right]$, 考虑到式(4)能量消耗, 得

$$Y_t(\beta(t), \overline{h_{i,K_i}}(t)) = \begin{cases} \min_{0 \leq b(t) \leq \beta(t)} \left(\frac{(2^{\frac{b(t)}{|K_i|W_s}} - 1) |K_i| N_0 W_s}{h_{m_c, K_{m_c}}(t)} + \overline{Y}_{t-1}(\beta(t) - b(t)) \right), t = T, \dots, 2 \\ Er_1(\beta(1), \overline{h_{i,K_i}}(1)), t = 1 \end{cases} \quad (17)$$

由于 $0 \leq b(t) \leq \beta(t)$ 对 $b(t)$ 取值的限制, 该问题在 $t \geq 3$ 时无法求最优解 $b(t)$ 和 $\overline{Y}_t(\beta(t))$ 的解析式。因此, 本文在先不考虑限制条件 $0 \leq b(t) \leq \beta(t)$ 的情况下, 采取数学归纳法对式(17)问题进行求解。

命题 1 令 $\overline{Y}_t(\beta(t))$ 表示在取最优解时 $t \sim 1$ 的所有时隙内传送 $\beta(t)$ bit 的数据预计需要耗费的能量, 则式(17)问题在不考虑限制条件 $0 \leq b(t) \leq \beta(t)$ 时可求最优解, 且 $\overline{Y}_t(\beta(t))$ 可由式(18)表示。

$$\bar{Y}_i(\beta(t)) = t2^{\frac{\beta(t)}{t|K_i|W_s}} G(v_i, \dots, v_1) - tv_i \quad (18)$$

其中, $v_x = \left(E \left[\left(\frac{|K_i|N_0W_s}{h} \right)^{\frac{1}{x}} \right] \right)^x$, $x = t, \dots, 1$, 表示根

据信道统计信息对 x 时隙内信道状态的估计,

$G(v_i, \dots, v_1) = \left(\prod_{x=1}^t v_x \right)^{\frac{1}{t}}$ 为 v_x 的几何平均值。

证明 本文采用数学归纳法, 显然在 $t=1$ 时,

式(18)变为 $\bar{Y}_i(\beta(1)) = (2^{\frac{\beta(1)}{|K_i|W_s}} - 1)v_1$, 根据能量消耗的表达式, 这表示对在最后一个时隙内传送 $\beta(1)$ 所需的能量, 符合 $\bar{Y}_i(\beta(t))$ 的定义。

假设式(18)在 $t-1$ 时刻成立, 即

$$\bar{Y}_{i-1}(\beta(t) - b(t)) = (t-1)2^{\frac{\beta(t-1)}{(t-1)|K_i|W_s}} G(v_{t-1}, \dots, v_1) - (t-1)v_1 \quad (19)$$

去掉 $0 \leq b(t) \leq \beta(t)$ 的限制, 根据式(17), 在 t 时隙内的优化问题变为

$$Y_i(\beta(t), \bar{h}_{i,K_i}(t)) = \min_{b(t)} \left(\frac{(2^{\frac{b(t)}{|K_i|W_s}} - 1)|K_i|N_0W_s + \bar{Y}_{i-1}(\beta(t) - b(t))}{\bar{h}_{i,K_i}(t)} \right) \quad (20)$$

将式(19)代入后, 式(20)是一个关于 $b(t)$ 的凸函数, 求导并令其导数为 0, 得

$$b(t) = \frac{1}{t}\beta(t) + \frac{t-1}{t}|K_i|W_s \text{lb}(G(v_{t-1}, \dots, v_1) \frac{\bar{h}_{i,K_i}(t)}{|K_i|N_0W_s}) \quad (21)$$

将式(21)代入式(20), 并对信道求期望, 得

$\bar{Y}_i(\beta(t)) = t2^{\frac{\beta(t)}{t|K_i|W_s}} G(v_i, \dots, v_1) - tv_i$, 即式(18)成立, 得证。

此时式(21)即为式(17)问题在无限制条件时最优解的表达式, 现加入限制条件 $0 \leq b(t) \leq \beta(t)$, 作为原优化问题的次优解, 即

$$b(t) = \left\langle \frac{1}{t}\beta(t) + \frac{t-1}{t}|K_i|W_s \text{lb}(G(v_{t-1}, \dots, v_1) \frac{\bar{h}_{i,K_i}(t)}{|K_i|N_0W_s}) \right\rangle_0^{\beta(t)} \quad (22)$$

其中, $\langle x \rangle_a^b$ 表示 x 最大值取 b , 最小值取 a 。

在式(22)中, $G(v_{t-1}, \dots, v_1)$ 是根据长时间内信道状态的统计信息求得的与 t 相关的常数, 因此, 只

要确定信道分配方案, 就可以根据子信道数 $|K_i|$ 和相应的平均信道增益 $\bar{h}_{i,K_i}(t)$, 得到当前最佳的发送速率 $b(t)$ 。

综上可得, 在云业务存在的 T 个时隙里, 满足式(8)优化问题的 SDWN 下的 LTE 上行调度方案如下。

步骤 1 初始化调度时隙 $t=T$, 云业务剩余数据量 $\beta(t)=L$ 。

步骤 2 利用 SDWN 可在每时隙动态配置业务速率需求的特点, 将 $R_i^0(t) = \frac{\beta(t)}{t}$ 作为 t 时隙内预估

的云业务速率需求代入式(12)来参与信道分配, 利用 4.2 节资源分配方案的方法求出每个用户的子信道分配方案 $j_m, \forall m \in M$ 。

步骤 3 根据云业务用户的子信道分配方案 j_i 和式(21)求得当前时隙的最佳发送速率 $b(t)$, 并代入式(3)求得云业务的最佳发射功率 P_{i,j_i}^* 。

步骤 4 在 SDWN 的控制器中单独为云业务用户调节当前时刻的发射功率 $P_i = \min\{P_{i,j_i}^*, P^u\}$, 保证云业务的实际发送速率 $R_i(t)$ 尽可能等于 $b(t)$ 。

步骤 5 更新状态方程 $\beta(t-1) = \beta(t) - R_i(t)$, $t=t-1$, 从步骤 2 开始进行下一时隙的资源分配。

5 仿真结果与分析

根据表 1 所示的调度方案, 本文使用 Matlab 对所提出的算法进行了验证。在仿真参数的设置中, 考虑了包括多个无线云业务用户和多个一般用户的单一基站的蜂窝网络系统, 基站的覆盖半径为 800 m, 用户在基站范围内均匀分布, 用户与基站之间的最小距离为 90 m。假设每个用户只有一种业务, 一般用户按业务类型分为 2 种不同的速率需求, 云业务用户需要在截止时间内以最小的能量消耗完成一定数据量的传送。用户和基站之间不仅有因距离带来的大小为 $128.1+37.6\log D$ dB 的路径损耗, 其中, D 为用户到基站的距离, 还有在传播路径上障碍物造成的服从方差为 8 dB 的对数正态分布的阴影衰落, 另外还有方差为 1 dB 的多径衰落, 不同时隙之间的信道增益呈独立同分布状态。噪声功率谱密度为 161 dBm/Hz, 用户终端的最大发射功率为 200 mW, 系统中共包括 20 个连续的子信道和 15 个用户。在现有网络下, 基站作为调度器; 在 SDWN 框架下, 控制器作为调度器,

调度周期为 1 ms, 具体仿真参数设置如表 2 所示。

表 2 仿真参数	
参数	值
基站范围半径	800 m
终端与基站之间最小距离	90 m
小区内用户分布	均匀分布
调度周期	1 ms
路径损耗	$(128.1+37.6 \log D)$ dB
阴影效应	对数正态分布($\mu = 0, \sigma = 8$)
多径衰落	瑞利衰落($\mu = 0, \sigma = 1$)
终端最大发送功率 P^a	200 mW
噪声功率谱密度 N_0	161 dBm/Hz
子信道带宽 W_s	180 kHz
子信道数 K	20
用户数 M	15
一般用户速率要求 R_m^0	64 kbit/s, 256 kbit/s

根据上述设置, 本文针对所提算法与现有网络下 2 种典型的 LTE 上行调度算法进行了仿真对比, 即基于 QoS 保障的最大化系统吞吐量调度方案(式(6)对应的算法)和以优化用户发送功率为主要目的的调度方案(式(7)对应的算法)(下简称对比算法 1 和对比算法 2)。

首先考虑一个云业务的情况, 图 3 给出了云业务 $L=4\ 000$ bit, $T=20$ ms 时本文的调度方案和现有网络下 2 种典型的调度方案下速率的变化曲线, 并展示了 3 种方案在相同的信道条件下速率与当前信道增益的关系, 在式(6)对应的以最大化系统吞吐量的方案(即对比算法 1)中, 完全没有考虑信道好坏对能量消耗的影响, 用户始终以能达到的最大速率进行数据传送, 这导致在 $\frac{T}{2}$ 时隙之前云业务的数据就已经传完, 此时, 虽然达到了系统吞吐量最大的目的, 但云业务用户的能量消耗小的需求却没有得到保障; 在式(7)对应的以优化所有用户总功率为目标的调度方案(即对比算法 2)中, 系统为了减小所有用户的发射功率和, 要求用户在达到速率限制的条件下以最小的发射功率进行数据传送, 因而不信信道状况如何变化, 用户通过调节发射功率始终以非常接近于 $\frac{L}{T}=200$ kbit/s 的速率进行数据传送, 仍然没有将用户在每个时隙内的速率与信道增

益联系起来, 不能保障云业务用户的能量消耗最小; 而在本文的方案下, 用户的传送速率曲线几乎完全随着信道增益的变化围绕平均发送速率而变化, 在信道状况好(坏)的情况下多(少)发送数据, 能满足云业务的能量消耗最小。图 4 为 $L=4\ 000$ bit, $T=20$ ms 时 3 种方案下的能量消耗直方图, 证实了上述结论。

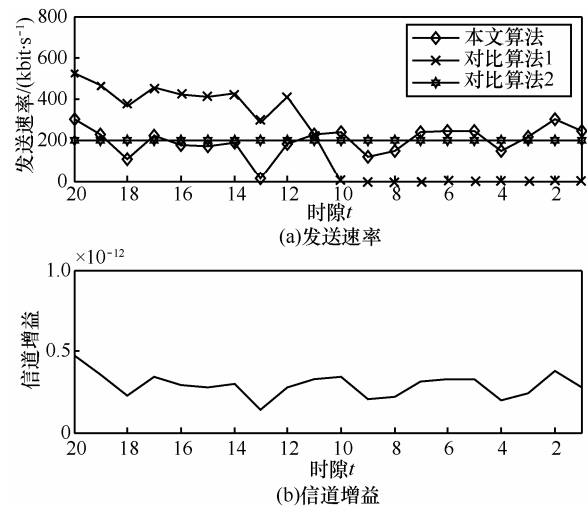


图 3 $L=4\ 000$ bit, $T=20$ ms 时发送速率和信道增益的变化

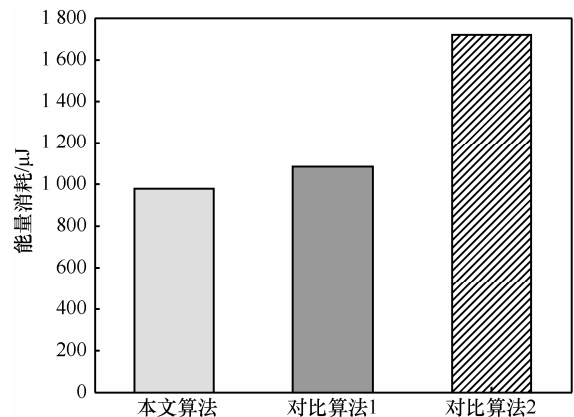


图 4 $L=4\ 000$ bit, $T=20$ ms 时 3 种方案的能量消耗对比

图 5 给出了平均速率为 $\frac{L}{T}=200$ kbit/s 时云业务用户消耗的能量随截止时间而变化的曲线, 图 5 中可见现有最大化系统吞吐量的方案(即对比算法 1)仅仅考虑系统吞吐量, 能量消耗最大; 现有优化功率的方案(即对比算法 2)相比前一种方案获得了较大的改善, 而本文在 SDWN 下提出的方案能获得更优的结果, 而且截止时间越长, 本文的调度算法运行的时间越长, 优化的效果越明显。

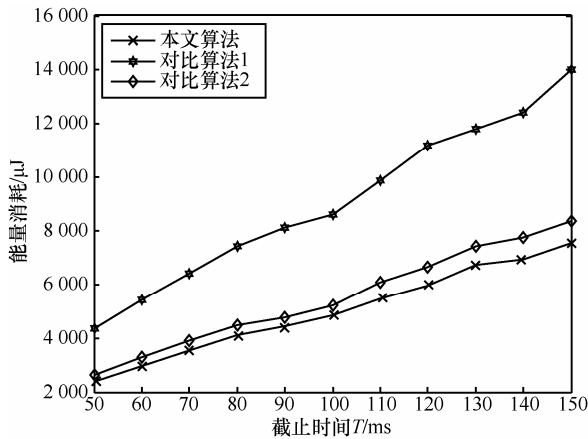


图 5 $\frac{L}{T} = 200 \text{ kbit/s}$ 时能量消耗随截止时间的变化

图 6 所示为截止时间 $T=100 \text{ ms}$ 时能量消耗随平均要求速率 $\frac{L}{T}$ 的变化情况。显然，在 T 一定的情况下，平均要求速率 $\frac{L}{T}$ 越大，则相应地要求传输数据量 L 越大，能量消耗也越高。由图 6 可知，在平均要求速率较小时，由于用户能获得的最大速率和平均要求速率相差较大，因此，能充分地进行速率调节来优化发送能量，此时，本文的算法相比现有的 2 种对比算法能获得较优的结果；当平均要求速率越来越接近能获得的最大速率时，系统不得不以接近最大的速率来进行数据传送，因而优化的空间越来越小，3 种算法的能量消耗逐渐接近，此时，本文的算法相比现有的 2 种算法仍能获得更优的结果。

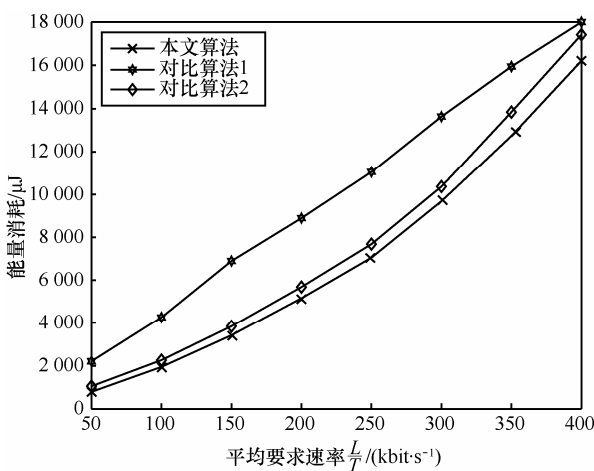


图 6 $T=100 \text{ ms}$ 时能量消耗随平均要求速率 $\frac{L}{T}$ 的变化

本文对多个云用户的算法性能也做了仿真。图 7 给出了本文算法所节省的能量随截止时间的变化

情况，为方便表示，这里用 $\frac{L}{T}$ 值的大小来区别不同参数的云用户，并考虑了一个云用户（即 $I=1$ ，其 $\frac{L}{T}=200 \text{ kbit/s}$ ，距基站 400 m）和 3 个云用户（即 $I=3$ ，其 $\frac{L}{T}$ 分别为 100 kbit/s、200 kbit/s 和 300 kbit/s，距基站的距离分别为 500 m、400 m 和 300 m）时的不同情况。由图 7 可知，本文算法相对于对比算法 1 和对比算法 2 所节省的能量正比于业务截止时间，即所需传输的业务数据越多，本文算法在优化能量方面的优势越大，且云用户越多本文算法所节省的能量越大。

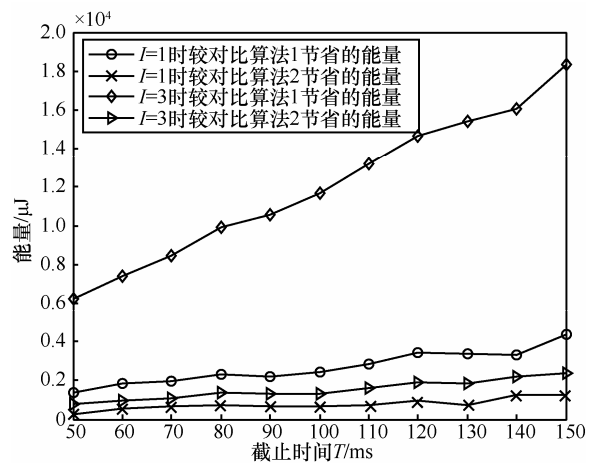


图 7 本文算法节省的能量随截止时间的变化

图 8 给出了本文算法较对比算法所节省的能量随云用户个数的变化情况，其中，假设系统中存在平均速率需求分别为 100 kbit/s、200 kbit/s 和 300 kbit/s，距基站的半径距离分别为 500 m、400 m 和 300 m 的 3 种云用户，每次系统增加的用户都是 3 种用户中的一种。由图 8 可见，由于对比算法 1 以最大化系统容量为目的，本文算法较之节省的能量较大；对比算法 2 以优化所有用户的功率和为目标，但是发送速率没有随着信道状况的变化调整，因而本文算法较之也能有一定的能量节省。随着云用户个数的增加，本文方案相对比算法 1 和对比算法 2 节省能量的效果不断增加。

以上分析表明随着系统规模的增大，本文的调度方案的优势愈发明显，因此，在大规模实际应用场景中，本文的调度方案将节省很可观的能量。当然，当本文的调度方案应用于大规模实际应用场景中时，系统用户数的增加不可避免地将增加该方案

的计算复杂度,使算法的运行时间增加。由调度方案可知,该算法的计算复杂度随用户数的增加呈幂增长的趋势。然而正如本文在系统模型中讨论的,SDN 虚拟切片技术把计算资源和频谱资源分给不同的业务类,因此,通过资源切片可以保证在每个资源切片内的用户数小于一定规模,从而降低计算复杂度,使每个资源切片内的计算复杂度近似呈线性增长的趋势,以保证算法能够实施,这也是 SDN 在未来网络体系中的巨大优势之一。

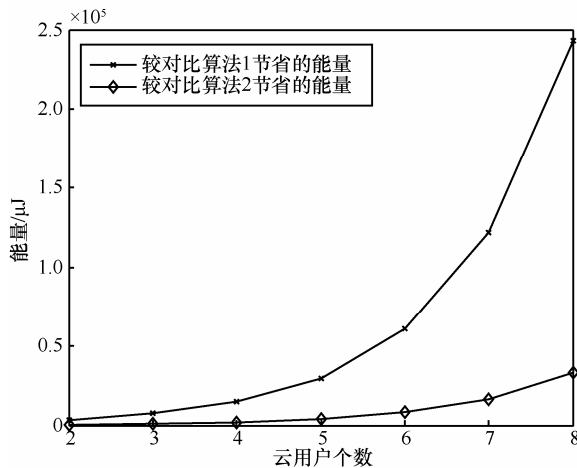


图 8 本文算法节省的能量随云用户个数的变化

通过与现有网络下 2 种典型的 LTE 上行调度算法的对比分析,总体而言,现有相关工作与本文工作的对比如表 3 所示。

6 结束语

本文针对现有网络中的分类调度方案无法适配每一种新业务来满足其 QoS 这一问题进行了研究,并利用 SDWN 研究了基于业务的 QoS 的控制方法,以云业务为例,将其从现有的分类调度中抽离出来,提出了一种在最大化系统吞吐量的基础

上,使云业务用户的能量消耗最小的 LTE 上行调度方案。仿真结果表明,本文的方案能有效减小云业务用户的能量消耗,达到满足其特殊 QoS 的目的。

参考文献:

- [1] 3GPP TS 23.203. Policy and charging control architecture[S]. 2013.
- [2] ABU-ALI N, TAHA A E M, SALAH M. Uplink scheduling in LTE and LTE-advanced: tutorial, survey and evaluation framework[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(3): 1239-1265.
- [3] LEE J, JINDAL N. Energy-efficient scheduling of delay constrained traffic over fading channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(4): 1866-1875.
- [4] ZHANG W, WEN Y, GUAN K. Energy-optimal mobile cloud computing under stochastic wireless channel[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(9): 4569-4581.
- [5] NUNES B A A, MARC M. A survey of software-defined networking: past, present and future of programmable networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(3): 1617-1634.
- [6] PENTIKOUSIS K, WANG Y, HU W. Mobileflow: toward software-defined mobile networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(7): 44-53.
- [7] GUERZONI R, TRIVISONNO R, SOLDANI D. SDN-based architecture and procedures for 5G networks[C]//IEEE 5GU'14. 2014: 209-214.
- [8] AISSIOUI A, KSENTINI A, GUEROUI A M. Toward elastic distributed SDN/NFV controller for 5G mobile cloud management systems[J]. IEEE Access, 2015, 3: 2055-2064.
- [9] RIGGIO R, MARINA M K, RASHEED T. Interference management in software-defined mobile networks[C]//IEEE IM'15. 2015: 626-632.
- [10] ZHONG L, NAKAUCHIK, SHOJI Y. Performance analysis of application-based QoS control in software-defined wireless networks[C]//IEEE IWCMC'14. 2014: 464-469.
- [11] KIM J, KIM D, HAN Y. Proportional fair scheduling algorithm for SC-FDMA in LTE uplink[C]//IEEE GLOBECOM'12. 2012: 4816-4820.
- [12] YANG H, REN F, LIN C. Frequency-domain packet scheduling for 3GPP LTE uplink[C]//IEEE INFOCOM'10. 2010: 1-9.
- [13] DELGADO O, JAUMARD B. Scheduling and resource allocation for multiclass services in LTE uplink systems[C]//IEEE WiMob'10. 2010:

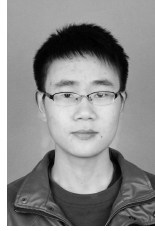
表 3

现有相关工作与本文工作的对比

比较方面	现有相关工作	本文工作
应用场景	传统网络框架下的 LTE 系统	SDWN 网络框架下的 LTE 系统
优化目标	单一目标 (如最大化吞吐量、最小化功率等)	多目标 (如最大化吞吐量、最小化云业务上传耗能等)
限制条件	难以考虑差异较大的不同 QoS 要求	可以满足不同业务的 QoS 要求
优化方法	对系统内所有业务采用相同的优化方法 (如贪婪算法、注水算法等)	采用分步优化的方法,首先利用 0-1 整数规划算法优化系统吞吐量,然后利用动态规划算法优化云业务耗能
方案效果	能达到优化目标要求,但不能优化云业务耗能	能够有效减少云业务耗能
适配新业务的能力	差	好

355-360.

- [14] WEN P, YOU M, WU S. Scheduling for streaming application over wideband cellular network in mixed service scenarios[C]//IEEE MILCOM'07. 2007: 1-7.
- [15] SOKMEN F I, GIRICI T. Uplink resource allocation algorithms for single-carrier FDMA systems[C]//IEEE EW' 10. 2010: 339-345.
- [16] MYUNG H G, LIM J, GOODMAN D J. Single carrier FDMA for uplink wireless transmission[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2006, 1(3): 30-38.
- [17] LEE K D, LEUNG V. Capacity planning for group-mobility users in OFDMA wireless networks[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2006(2): 59-59.
- [18] WONG I C, OTERI O, MCCOY W. Optimal resource allocation in uplink SC-FDMA systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(5): 2161-2165.



肖榜 (1992-)，男，湖北天门人，南京邮电大学硕士生，主要研究方向为宽带无线通信和软件定义无线网络等。

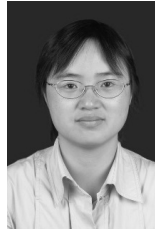


陈宇青 (1993-)，女，江苏南京人，南京邮电大学硕士生，主要研究方向为宽带无线通信和信道资源分配等。

作者简介：



潘甦 (1969-)，男，江苏扬州人，博士，南京邮电大学教授、博士生导师，主要研究方向为宽带无线通信中的资源分配技术、路由技术和 QoS 保证技术、移动互联网技术等。



刘胜美 (1977-)，女，江苏泰兴人，博士，南京邮电大学副教授、硕士生导师，主要研究方向为异构无线网络移动性管理、资源管理和无线云等。