

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.03.004

LTE 系统中一种低丢包率的实时业务调度算法

吴宣利, 韩杏玲, 赵婉君

(哈尔滨工业大学 电子与信息工程学院, 150001 哈尔滨)

摘 要: 为提高 LTE 系统中实时业务调度算法的系统丢包率性能, 且针对时延优先调度 (Delay prioritized scheduler, DPS) 算法随着用户数目的增多丢包率性能急剧变差、系统吞吐量也较低等问题, 本文在 DPS 算法基础上, 提出一种综合考虑用户时延信息和实时下行信道状态信息的改进算法。通过引入信道状态信息, 可以有效提高系统吞吐量; 通过引入用户时延信息, 可以保证用户之间的公平性。仿真结果表明, 该算法在保证实时业务服务质量的前提下, 取得了系统吞吐量和公平性之间的良好折中, 同时可以获得更低的丢包率性能。

关键词: LTE; 服务质量; 丢包率; 改进的时延优先调度算法

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2015)03-0024-05

A low packet loss rate scheduling algorithm for real-time traffics in LTE system

WU Xuanli, HAN Xingling, ZHAO Wanjun

(School of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China)

Abstract: In LTE system, in order to improve system Packet Loss Rate (PLR) performance of scheduling algorithm for real-time traffics and solve the problem that the performance of Delay Prioritized Scheduler (DPS) algorithm will degrade in terms of higher PLR and lower system throughput with the increase of user number, we propose a DPS based scheduling algorithm which considers packet delay and instantaneous downlink channel condition of each user. System throughput can be improved by the utilization of channel conditions for different users, and user fairness can be guaranteed due to the information of different user delay. Simulation results show that the proposed algorithm can be used to achieve the tradeoff between system throughput and user fairness, and reduce PLR significantly under the Quality of Service (QoS) constraints of real-time traffics.

Keywords: LTE; quality of service; packet loss rate; modified delay prioritized scheduler

目前,移动通信网络已经开始迈入第四代移动通信——LTE-A (long time evolution-advanced) 的大门,基于移动网络的实时语音和实时视频等实时业务发展迅速,成为通信领域的研究重点。良好的实时业务调度算法可以有效地满足业务 QoS 需求,在决定系统的性能上起到关键作用^[1]。

无线网络中的实时传输要求很低的传输延迟、延迟抖动、丢包率,以及足够的带宽,以保证业务的 QoS 需求。而早期的分组资源调度算法如比例公平 (proportional fair, PF) 算法等是以系统吞吐量和用

户间的公平性为目标,没有考虑用户业务的 QoS 需求和缓存队列信息^[2],使用 PF 算法处理实时业务时,会导致数据包有过大延迟而出现很高的丢包率,因此不能很好地满足业务实时性要求。对于实时业务的分组调度算法,目前常用的有改进的最大权重延迟优先(modified largest weighted delay first, M-LWDF)、指数比例公平(exponential PF, EXP/PF)等算法^[3-4],但是上述算法难以保证信道状况较差用户的调度机会,会导致此类用户丢包率较高,而且上述算法的计算量较大。为解决此问题,研究人员又提出时延优先调度(delay prioritized scheduler, DPS)算法^[5],DPS 算法在计算用户优先级时只考虑用户的时延状况,算法复杂度较低,而且能够满足实时业务的 QoS 需求。但是随着用户数目持续增多,DPS 算法的丢包率性能会急剧变差,

收稿日期: 2014-06-13.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2013CB329003); 国家自然科学基金(61301100); 国家科技重大专项基金(2013ZX03001024-003)。

作者简介: 吴宣利(1980—),男,副教授,硕士生导师。

通信作者: 吴宣利, xlwu2002@hit.edu.cn.

而且系统的吞吐量也非常低。

因此针对这些问题本文提出了改进的时延优先调度(modified delay prioritized scheduler, MDPS)算法,该算法在考虑用户时延条件的基础上,综合考虑用户的信道状态.因此,相对于 DPS 算法,MDPS 算法可以在保证用户间公平性的同时,改善系统重载时的丢包率性能,而且系统吞吐量也可得到有效提升。

表 1 LTE 下行系统参数设置

仿真参数	载波中心 频率/GHz	载波带宽/ MHz	子载波间隔/ kHz	资源块 数目	资源块 带宽/kHz	一个子帧上 OFDM 符号数	一个资源块 上子载波数	TTI 长度/ms	天线
设置值	2	5	15	25	180	14	12	1	1x1

由于多路径传播产生的频率选择性衰落和用户运动导致的时间选择性衰落,每个用户的瞬时下行信干噪比(signal to interference plus noise ratio, SINR)值随物理资源块 PRB 和 TTI(transmission time interval)的不同而不同.根据瞬时下行 SINR 值,用户在每个 TTI 都将相应的 CQI(channel quality indicator)值报告给基站,基站可以根据上报的 CQI 信息及时调整和更新用户的信道状态信息,然后系统采用自适应调制编码(adaptive modulation and coding,AMC)技术,根据信道条件的变化来动态地选择适当的编码调制方案.当信道条件较好时,采用高阶调制和较高的编码速率来实现高传输速率,获得较高吞吐量.当信道条件质量较差时,采用低阶调制和较低的编码速率以保证传输链路的质量,从而实现在多用户情况下进行系统资源最优分配.本文利用式(1)来确定用户 k 在物理资源块 i 上可以获得的理论数据速率:

$$r_k^i(t) = (N - 3) \times M \times Q_k \times nbits_k^i(t) / 1\,024. \quad (1)$$

式中: N 为一个子帧上的 OFDM 符号数, M 为一个资源块上的子载波数, Q_k 为用户 k 一个符号所能携带的比特数,由调制方式所决定. $nbits_k^i$ 为根据用户的 SINR 值由表 2 映射得到的用户 k 在物理资源块 i 上的编码速率。

基站为每位用户分配了一个缓冲区,在本文中缓冲区的大小认为是无限的,缓冲区中每个业务流缓存队列数据包采取先进先出策略.对于在基站缓冲区中排序的每个数据包,可计算出队头数据包(head of line, HoL)的时延.如果 HoL 数据包的时延超过了时延门限,那么该包将被丢弃^[8]。

系统中每个 TTI 中等待接受调度的用户都放置在服务列表中,调度器根据采用的调度算法来决定用户的优先级.调度算法考虑了某些调度条件,如用户信道状况、HoL 数据包时延、服务类型等.如果选定某个用户开始传输,当前用户传输的

1 系统模型

考虑一个多小区的 LTE 系统,本文中参与调度的用户只随机分布在中心小区中.中心小区包含 25 个物理资源块(physical resource block, PRB),占据 5 MHz 带宽.基站位于小区的中心位置,所有的资源块都参与中心小区内的用户调度.本文中采用的 LTE 系统的参数设置见表 1。

数据速率将依据用户上报的下行瞬时 SINR 值和用户缓冲区内待传送的比特数来共同确定.在每个 TTI,根据采用的调度算法结合用户需求为用户分配 PRB.在用户需求得到满足之后,则此用户从当前服务列表中清除。

表 2 MCS 与 SINR 映射表^[7]

CQI	调制方式	编码速率/ ×1 024	频谱效率/ (bits/s/Hz)	SINR 值/ dB
1	QPSK ($Q = 2$)	78	0.152 3	-6.710
2	QPSK ($Q = 2$)	120	0.234 4	-5.110
3	QPSK ($Q = 2$)	193	0.377 0	-3.150
4	QPSK ($Q = 2$)	308	0.601 6	-0.879
5	QPSK ($Q = 2$)	449	0.877 0	0.701
6	QPSK ($Q = 2$)	602	1.175 8	2.529
7	16QAM ($Q = 4$)	378	1.476 6	4.606
8	16QAM ($Q = 4$)	490	1.914 1	6.431
9	16QAM ($Q = 4$)	616	2.406 3	8.326
10	64QAM ($Q = 6$)	466	2.730 5	10.300
11	64QAM ($Q = 6$)	567	3.322 3	12.220
12	64QAM ($Q = 6$)	666	3.902 3	14.010
13	64QAM ($Q = 6$)	772	4.523 4	15.810
14	64QAM ($Q = 6$)	873	5.115 2	17.680
15	64QAM ($Q = 6$)	948	5.554 7	19.610

2 算法分析

2.1 M-LWDF 算法

M-LWDF 算法是针对高速实时多媒体业务流提出,该算法充分考虑分组数据包的时延、业务优先级、用户当前信道质量等因素^[9].对于物理资源块 i ,调度时选取在当前资源块上具有最大优先级的用户 k ,该算法的优先级计算公式为

$$K = \arg \max \left(a_k W_k(t) \frac{r_k^i(t)}{R_k(t)} \right). \quad (2)$$

式中: $W_k(t)$ 为实时业务用户 k 的队列头时延, $r_k^i(t)$ 为用户 k 在第 i 个 PRB 上获得的理论数据传输速率, $R_k(t)$ 为用户 k 在时间窗内的平均吞吐量, a_k 的定义为

$$a_k = -\log(\delta_k) / \tau_k. \quad (3)$$

式中: δ_k 为实时业务用户 k 可接受的丢包率, τ_k 为

实时业务用户 k 的时延门限,当数据包等待时延超过时延门限时,数据包将被丢弃。

由式(2)、(3)可知, M-LWDF 算法支持对 QoS 有不同要求的用户。队头数据包 δ_k 和 τ_k 越小,就能获得越大指标的 a_k , 在传输过程中能获得更大的优先级。该调度算法表达式中,实时业务的优先级与 HoL 等待时间成简单的线性增长关系,对于时延敏感的实时业务,当 HoL 数据包等待时间接近时延门限时,调度优先级无法快速提高,因此数据包超时就会导致丢包的产生。

2.2 EXP/PF 算法

EXP/PF 算法在 M-LWDF 调度算法基础上提出,对于物理资源块 i , 调度时选取在当前资源块上具有最大优先级的用户 k , 其优先级为

$$K = \arg \max \left(\exp \left(\frac{a_k W_k(t) - \overline{aW}(t)}{1 + \sqrt{aW}(t)} \right) \frac{r_k^i(t)}{R_k(t)} \right). \quad (4)$$

其中

$$\overline{aW}(t) = \frac{1}{N_{UE}} \sum_{i=1}^{N_{UE}} a_k W_k(t). \quad (5)$$

式中 N_{UE} 为下行系统中用户数目。

由式(4)、(5)可知, EXP/PF 调度算法对时延的敏感程度是时变的,实时业务调度优先级与时延呈指数关系,因此 EXP/PF 算法相对于 M-LWDF 算法来说具有更好的时延特性。

2.3 DPS 算法

针对 LTE 系统中实时视频流业务对丢包率非常敏感的特点,研究人员提出了 DPS 算法,该算法的优先级为

$$K = \arg \min(\tau_k - W_k(t)). \quad (6)$$

可看出,随着用户 W_k 的增大,用户的优先级随之提升。当某个业务在缓存队列中的等待时间越接近于时延门限,业务优先级越高。因此 DPS 算法能够满足时延敏感业务的 QoS 需求。但式(6)只考虑了用户的时延状况,在用户数目较多时,必定存在大量用户具有相同的优先级,对于此类用户的调度顺序问题 DPS 算法并未做出明确的说明,而且 DPS 算法的吞吐量也很低。针对这些问题,本文提出改进算法——MDPS 算法。

2.4 MDPS 算法

本文所提出的 MDPS 算法在 DPS 算法的基础上,综合考虑了用户的时延状况和信道状态,每个用户的优先级为

$$M_k(t) = (\tau_k + b - W_k(t)) / (a + \Gamma_k(t)). \quad (7)$$

式中 $\Gamma_k(t)$ 为用户 k 在所有 PRB 上的平均频谱效率,

$$\Gamma_k(t) = \frac{1}{N_{PRB}} \sum_{i=1}^{N_{PRB}} \phi_k^i(t). \quad (8)$$

式中: N_{PRB} 是系统中的物理资源块数目, $\phi_k^i(t)$ 为用户 k 在第 i 个 PRB 上获得的频谱效率。根据表 2 可知,频谱效率由用户上报的 CQI 值所决定,因此 $\Gamma_k(t)$ 可表征用户的信道状态。

式(7)中 a 、 b 均为常数,并没有实际物理意义。 a 的取值会影响用户信道状态信息在决定用户优先级时的权重,而 b 的取值则会影响用户时延信息在决定用户优先级时的权重。若 a 越小, b 越大,则用户的信道状态越能决定用户的调度顺序,而时延信息所占的影响权重会下降,有助于系统吞吐量的提升,而用户之间的公平性则会有所降低。经过数学分析和仿真验证,从均衡系统吞吐量和用户公平性的角度出发,本文选取 $a = 10$, $b = 1$ 。

通过式(7)计算得到服务列表中用户的优先级数值后,根据其优先级数值对用户进行降序排列,然后根据式(9)挑选出优先级最高的用户接受调度。在此用户调度请求得到满足之后,从服务列表中清除,根据式(9)重新从服务列表中挑选用户接受调度。

$$K = \arg \min(M_k(t)). \quad (9)$$

由式(7)可知, $W_k(t)$ 和 $\Gamma_k(t)$ 越大,用户的优先级越高。当系统中用户数目较多时,在缓冲区中将有大量的数据包时延接近时延门限,而对于时延状况相同的用户来说,信道条件越好的用户优先级越高,可以有效地利用条件好的信道尽可能传送更多的数据包。因此 MDPS 算法可以满足实时业务用户的时延需求,并提供良好的丢包率性能,同时系统的吞吐量相对于 DPS 算法可以得到有效地提升。

在 MDPS 算法中,每个 TTI 需要计算出所有位于服务列表中用户的优先级,然后优先级最高的用户优先选取信道条件最好的 PRB,直至满足其业务要求的保证数据传输速率(guaranteed bit rate, GBR),将此用户从服务列表中清除,并重新寻找优先级最高的用户接受调度,循环上述过程直至所有的资源块分配完毕。本文采用的调度算法的调度流程如下:

输入:

系统调度时隙数目: N_{TTI}

系统资源块数目: N_{PRB}

接入系统用户数目: N_{UE}

每个用户时延门限: $\tau_1, \tau_2 \cdots \tau_k$

每个用户的 HoL 时延: $W_1, W_2 \cdots W_k$

每个用户在每个 PRB 上频谱效率: $\phi_1^1, \phi_1^2, \cdots, \phi_k^i$

用户 GBR 要求: GBR

输出:

资源块分配矩阵:allocation_RB

1) 赋值 $i_TTI = 1$;

2) 根据式(8)计算每个用户在当前 TTI 在整个带宽上的平均频谱效率: $\Gamma_1(i_TTI), \Gamma_2(i_TTI) \cdots \Gamma_k(i_TTI)$;

3) 根据式(7)计算每个用户在当前 TTI 的优先级数值: $M_1(i_TTI), M_2(i_TTI) \cdots M_n(i_TTI)$;

4) 根据式(9)挑选优先级最高用户 K 接受调度;

5) 从未分配出 PRB 中挑选出用户 K 信道条件最好的 PRB;

6) 在选出的 PRB 上传输用户 K 的数据, 将此 PRB 标记为已分配, 并更新资源块分配矩阵 allocation_RB;

7) 判断当前用户获得数据速率 $<$ GBR, 若小于, 则重复步骤 5)~7), 直至用户 K 数据速率 $\geq$ GBR, 然后把此用户从服务列表中清除;

8) 判断 PRB 是否分配完毕, 若没有, 则重复步骤 4)~8), 直至 PRB 分配完毕;

9) $i_TTI = i_TTI + 1$;

10) 判断 i_TTI 是否等于 N_{TTI} , 若不相等, 则重复步骤 2) ~ 10) 直至 $i_TTI = N_{TTI}$;

11) 返回资源块分配矩阵 allocation_RB.

3 仿真分析

3.1 仿真环境

本文主要对上述提到的 4 种算法 M-LWDF、EXP/PF、DPS 和 MDPS 算法从吞吐量、丢包率和公平性等 3 个方面进行性能仿真.主要仿真参数设置如表 3 所示.

表 3 系统仿真参数设置

仿真参数	小区数量	小区半径/m	基站发射功率/dBm	调制方式	路损模型	阴影衰落标准差/dB	快衰模型	UE 数量	终端移动速度/(km · h ⁻¹)	业务类型
设置值	7	500	46	QPSK, 16QAM, 64QAM	PL _{LOS} = 103. 4+ 24. 2 lg(R)	10	块衰落	20, 30, 40...	3	实时视频流业务

本文采用的方案是在一个半径为 500 m 正六边形小区,一定数目的 UE 随机分布在小区中,所以小区中用户之间的信道状况相差极大,这与提出 DPS 算法的文献[5]有所不同,在文献[5]中所有用户都一致地分布在基站周围,这样会导致所有用户信道状况相差不大,因此本文的仿真环境要更接近于实际系统.所有用户仿真的业务均为实时视频流业务,要求保证数据传输速率为 256 kbps,时延门限设置为 20 ms.具体视频业务参数见文献[10].

3.2 仿真结果

在满足最低时延和较好公平性指数的情况下,丢包率的大小将明显影响实时业务的用户体验^[11].因此丢包率是评价实时业务调度算法的重要指标.图 1 对用户的丢包率进行了仿真.从图 1 知,随着用户数目的增多,由于 PRB 资源有限,难以保证所有用户需求,因此会有更多的包被丢弃,所以 4 种算法的 PLR 也随之提升.在用户数目低于 40 时,此时系统中的资源能够保证所有实时业务用户需求,因此 4 种算法 PLR 均为零.当用户数目为 40~70 时,M-LWDF 和 EXP/PF 算法开始不能保证信道质量较差用户的 PLR 性能,而 DPS 和 MDPS 算法此时仍可获得较低的 PLR.随着用户数目的持续增多,此时 DPS 算法的 PLR 性能急剧变坏,这是由于用户数目较多时,根据式(6),此时具有相同优先级的用户非常多,信道条件差的用户可能会优先接受

调度,某些高质量的信道被闲置,所以导致 PLR 急剧上升.与前 3 种算法对比发现,可以看出本文提出的 MDPS 算法 PLR 性能远远好于前 3 种算法.在相同仿真参数设置的情况下,MDPS 算法能支持更多的用户,而且随着用户数目的持续增多,在相同时延条件下,MDPS 算法会优先选择信道条件好的用户接受调度,因此在 PRB 数目有限的情况下,会充分利用高质量的信道,能发出更多的包,因此 MDPS 算法能够提供较低的丢包率性能.

图 2 对系统的吞吐量进行了仿真.从图 2 可看出,随着用户数目的增多,4 种算法的系统吞吐量会随之提升.在用户数目 $<$ 40 时,此时系统中的 PRB 足够支持所有的用户业务,但是当用户数目继续增多时,DPS 和 MDPS 算法吞吐量开始低于 M-LWDF 和 EXP/PF 算法,这是由于在此用户数目下,DPS 和 MDPS 算法仍然能够保证信道质量较差用户的 PLR 性能,这部分 PLR 性能上的提升是通过牺牲吞吐量的方式获得的.但是当用户数目 $>$ 70 时,此时系统资源已经不能保证所有用户的业务需求,相比于 DPS 算法来讲,MDPS 算法优先选择信道条件好的用户接受调度,在 PRB 资源有限的情况下,充分利用高质量的信道,尽可能发出更多的包,因此可以获得更高的系统吞吐量.

图 3 对用户间的公平性进行了仿真.从图 3 可知,在用户数目较少时,4 种算法的公平性指数相

差不多,随着用户数的增多,M-LWDF 和 EXP/PF 算法公平性指数急剧下降,而 DPS 和 MDPS 算法变化要缓慢一些.MDPS 算法公平性与 DPS 算法相比略有下降.与 M-LWDF 和 EXP/PF 算法相比,MDPS 算法牺牲了一部分系统吞吐量换取了公平

性能上的提升,而与 DPS 算法相比,MDPS 算法则是通过牺牲小部分公平性换取了系统吞吐量的提升.总之,其他 3 种算法相比,MDPS 算法在系统吞吐量和公平性之间取得了良好的折中.

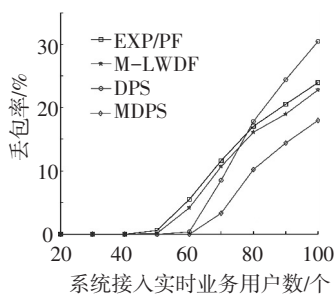


图 1 丢包率对比

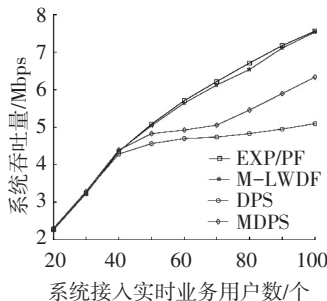


图 2 系统吞吐量对比

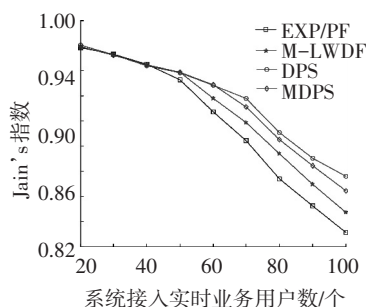


图 3 用户间的公平性指数对比

4 结 语

本文主要研究 LTE 系统下行链路实时资源调度算法的性能.在 DPS 算法的基础上提出改进的 MDPS 算法,同时把 M-LWDF 和 EXP/PF 算法作为对比算法,对上述 4 种算法进行仿真分析.根据仿真结果可知,在 LTE 系统中,当负载较轻(用户数目 <40)时,4 种算法性能相差不多,但是随着负载的增加(用户数目 $40\sim70$),此时 M-LWDF 和 EXP/PF 算法已经不能保证信道质量较差用户的丢包率性能,而 DPS 和 MDPS 算法则通过牺牲一部分系统吞吐量的方式来保证用户的丢包率.因此在丢包率和公平性指数上,DPS 和 MDPS 算法要远好于 M-LWDF 和 EXP/PF 算法.当负载继续增加(用户数目 >70)时,此时 DPS 的 PLR 性能急剧变坏,而 MDPS 算法在 PLR 上表现出其持久性能,MDPS 算法系统吞吐量也远好于 DPS 算法.与 M-LWDF 和 EXP/PF 算法相比,MDPS 算法虽然牺牲了一部分系统吞吐量但是却换取了 PLR 性能上的大大提升.因此,与本文提到的其他 3 种算法相比,MDPS 算法取得系统吞吐量和公平性之间良好折中的同时,获得了更好的丢包率性能.

参考文献

- [1] RAMLI H A M, SANDRASEGARAN K, BASUKALA R, et al. Resource allocation technique for video streaming applications in the LTE system[C]//Wireless and Optical Communications Conference (WOCC), 2010 19th Annual. Shanghai: IEEE, 2010:1-5.
- [2] KWAN R, LEUNG C, ZHANG Jie. Proportional fair multiuser scheduling in LTE[J]. Signal Processing Letters, IEEE, 2009, 16(6):461-464.
- [3] PIRO G, GRIECO L A, BOGGIA G, et al. Two-level downlink scheduling for real-time multimedia services in

LTE networks[J]. Multimedia, IEEE Transaction on, 2011, 13(5):1052-1065.

- [4] BASUKALA R, MOHD RAMLI H A, SANDRASEGARAN K. Performance analysis of EXP/PF and M-LWDF in downlink 3GPP LTE system[C]//First Asian Himalayas International Conference on, AH-ICI 2009. Kathmandu: IEEE, 2009: 1-5.
- [5] SANDRASEGARAN K, MOHD RAMLI H A, BASUKALA R. Delay-prioritized scheduling (DPS) for real time traffic in 3GPP LTE system[C]//Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2010 IEEE. Sydney: IEEE, 2010: 1-6.
- [6] CAPOZZI F, PIRO G, GRIECO L A, et al. Downlink packet scheduling in lte cellular networks: Key design issues and a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2012, 15(2): 678-700.
- [7] 孙璠. TD-LTE 无线资源调度算法的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2012.
- [8] PEDERSEN K I, KOLDING T E, FREDEROLSEN F, et al. An overview of downlink radio resource management for UTRAN long-term evolution[J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(7):86-93.
- [9] 吴大鹏, 严海升, 罗仁泽. 面向实时业务的快速公平性分组调度算法[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2013, 25(1):85-89.
- [10] RAMLI H A M, BASUKALA R, SANDRASEGARAN K, et al. Performance of well known packet scheduling algorithms in the downlink 3GPP LTE system[C]//Communications (MICC), 2009 IEEE 9th Malaysia International Conference on. Kuala Lumpur: IEEE, 2009: 815-820.
- [11] ZHANG Cheng wen, LIU Xin, TAN Xue zhi. Joint resource allocation for MIMO OFDM video transmission systems with unequal error protection[J]. Journal of Harbin Institute Of Technology (New Series), 2012, 19(2):119-124.

(编辑 苗秀芝)