

MIMO 系统中的自适应比例公平调度算法研究

谭力 苏钢 朱光喜 王玲

(华中科技大学电子与信息工程系 武汉 400074) (武汉光电国家实验室 武汉 400074)

摘要 在 MIMO 系统中,通过在每个时隙选择信道条件最好的用户进行通信,可以利用无线通信系统的多用户分集大大提高系统吞吐量,但该方法存在公平性差的缺点。主要关注应用机会波束形成的 MIMO 系统的公平性。提出了一种自适应比例公平调度算法来提高长时间处于较差信道条件下的用户的吞吐量,从而提高系统的公平性。在每个时隙,基站监测每个用户的实时请求速率和过去一段时间内的平均请求速率,并根据这两个速率来调整算法中的自适应参数。提出的算法较好地获得了系统吞吐量和公平性的折中,仿真实验结果也表明了算法的有效性。

关键词 MIMO 系统,多用户分集,机会波束形成,比例公平调度

中图分类号 TN929.53 文献标识码 A

Adaptive Proportional Fair Scheduling Scheme for Multi-input Multi-output Systems

TAN Li SU Gang ZHU Guang-xi WANG Ling

(Department of Electronics & Information Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

(Wuhan National Laboratory of Optoelectronics, Wuhan 430074, China)

Abstract In MIMO systems, the throughput of system is increased by always scheduling the subscribers with good channel conditions to transmit. This is the multi-user diversity. The fairness over all subscribers is the weak point. In this paper, the fairness of the MIMO systems was concerned and an adaptive proportional fair scheduling schemes based on opportunistic beamforming were proposed to increase the throughput of the subscribers in the bad channel conditions and guarantee the fairness all over the systems. In each timeslot, the adaptive parameters monitor the requested data rate and the mean of the requested data rate in the past period. And the adaptive parameters are updated per-user basis. The proposed schemes find a tradeoff between the throughput and the fairness. And the simulation results show the validity.

Keywords MIMO system, Multi-user diversity, Opportunistic beamforming, Proportional fair scheduling

1 引言

移动通信产品的普及,尤其是移动多媒体业务的发展和和服务质量保证要求的不断提高,对未来无线通信系统的容量和服务质量提出了更高的要求,这与有限的频谱资源之间的矛盾显得日益突出。最近的研究表明多用户分集是一种新的提高多输入多输出(MIMO, Multi-input Multi-output)系统的系统容量和频率效率的方法^[1]。多用户分集利用不同用户信道的衰落和快速变化来调度用户,在每个时隙,基站总是调度那些信道条件好的用户进行数据传输,从而提高系统的吞吐量和频谱效率。

如何提高 MIMO 系统的容量和频谱效率已成为近年来的研究热点。文献[2,3]对 MIMO 系统下行广播信道容量进行了详细分析并证明脏纸编码(DPC, dirty paper coding)是可以达到 MIMO 系统下行广播信道理想容量限的最优算

法^[4,5]。DPC 算法的计算复杂度非常高,而且它要求每一个用户都必须将其信道状态信息(CSI, channel state information)准确地反馈给基站。无线通信系统的上行反馈信道受到带宽和信道误码率的限制,很难满足 DPC 算法的要求,因此 DPC 算法无法在实际的通信系统中应用。Pranod Viswanath 和 David N. C. Tse 给出了一种简单有效的利用 MIMO 系统多用户分集增益的方法:随机波束形成算法(RBF, random beamforming)^[6]。通过在每个子信道上叠加一个随机向量,RBF 算法使每个用户的子信道产生快速而剧烈的波动,于是基站总能够选择一个处于较好信道状态的用户进行数据传输。RBF 算法仅需要用户反馈部分 CSI 信息给基站。为了提高 RBF 算法的公平性和服务质量(QoS, quality of service),文献[6]将比例公平调度(PFS, proportional fair scheduling)^[7]算法与 RBF 算法结合。本文在此基础上提出了一种自适应 PFS 算法。在每个时隙,基站根据每个用

到稿日期:2009-04-24 返修日期:2009-08-20 本文受国际科技合作计划项目(2008DFA11630),国家 863 计划(2008AA01Z204)和(2008AA01Z205),国家自然科学基金项目(60496315)和(60802009),湖北省自然科学基金项目(2007ABA008)和(2008CDB325),博士后基金项目(20070410279)资助。

谭力(1976-),男,博士生,讲师,主要研究方向为未来移动通信系统中的信道容量与多用户分集,E-mail:ltan@hust.edu.cn;苏钢(1971-),男,博士,副教授,主要研究方向为未来移动通信系统关键技术;朱光喜(1945-),男,教授,主要研究方向为未来移动通信系统;王玲(1977-),女,博士生,讲师,主要研究方向为未来宽带无线通信系统中的跨层优化。

户的信道质量变化,自适应地调整算法中的参数,以使那些长时间处于恶劣信道状态的用户得到更多的通信机会。这种自适应的 PFS 算法可以有效增加系统的公平性。

本文第 2 节介绍了 RBF MIMO 系统模型;第 3 节描述了经典的 PFS 算法,介绍了已有的对 PFS 算法的改进研究工作;第 4 节描述了自适应 PFS 算法;第 5 节给出的仿真结果证实了算法的有效性;最后对全文进行总结。

2 系统模型

考虑一个多用户 MIMO 系统下行广播信道。BS 有 N_t 根天线,每个用户有 1 根天线,小区内有 K 个均匀分布的用户,则各个用户所经历的信道可以看作是相互独立的。在每个时隙 t 中,基站将训练符号 $s(t)$ 与一个随机权重向量 $q(t)=[q_1(t), q_2(t), \dots, q_{N_t}(t)]^T$ 相乘,并向小区内所有用户广播。则用户接收到的信号可以表示为:

$$y_k(t) = h_k(t)q(t)s(t) + w_k(t) \quad k=1,2,\dots,K \quad (1)$$

其中, $h_k(t)=[h_{k,1}(t), h_{k,2}(t), \dots, h_{k,N_t}(t)]$ 为用户 k 的复信道矢量, $w_k(t)$ 为复高斯白噪声。 $h_k(t)$ 的每个元素和 $w_k(t)$ 均为独立同分布,零均值循环对称的复高斯变量满足 $CN(0,1)$ 。信道模型考虑时变的瑞利衰落信道,并假设各用户能够通过信道测量准确地获取信道信息矩阵 $h_k(t)$ 。基站的发送总功率 P 为 $Tr(E[ss^H])$,假设 $Tr(E[ss^H])$ 与基站的发射天线数 N_t 相等, P 在各条天线上平均分配,则各天线上的发射功率为 $p_n=1, (1 \leq n \leq N_t)$ 。

每个用户测量并计算其在当前时隙的瞬时信噪比(SNR, signal-to-noise-ratio)为:

$$SNR_k(t) = \sum_{n=1}^{N_t} |h_{k,n}(t)q_n(t)|^2 \quad (2)$$

其中, $k=1,2,\dots,K$ 。假设每个用户的信道状态在每个时隙内保持稳定,在时隙之间则是快速变化的。基站根据各个用户反馈的信息选择 SNR 值最大的用户,将该用户的数据与波束形成矢量 $q(t)$ 相乘,并发送给该用户。

3 PFS 算法

为了在提高系统吞吐量和保障公平性两方面取得折中,高通公司提出了 PFS 算法^[7]。该算法已经应用于 IS-856 系统中。在应用 PFS 算法的 RBF MIMO 系统中,用户反馈的信息为当前时隙内的请求速率 $R_k(t)$ 。基站通过每个用户在当前时隙的请求速率 $R_k(t)$ 与过去 t_c 时间内该用户的传输速率 $T_k(t)$ 的比值来衡量其等效信道质量,并对用户进行调度。调度规则为:

$$k^* = \underset{k=1,2,\dots,K}{\operatorname{argmax}} \frac{R_k(t)}{T_k(t)} \quad (3)$$

在每个时隙 t , 基站保存每个用户的传输速率 $T_k(t)$ 的变化,并根据如下公式对 $T_k(t)$ 进行更新:

$$T_k(t+1) = \begin{cases} \left(1 - \frac{1}{t_c}\right)T_k(t) + \frac{1}{t_c}R_k(t), & k=k^* \\ \left(1 - \frac{1}{t_c}\right)T_k(t), & k \neq k^* \end{cases} \quad (4)$$

式(3)的更一般形式为:

$$k^* = \underset{k=1,2,\dots,K}{\operatorname{argmax}} \frac{(R_k(t))^\alpha}{(T_k(t))^\beta} \quad (5)$$

如果 $\alpha=\beta=1$, 则式(5)描述的是 PFS 算法,如果 $\alpha=1$,

$\beta=0$, 则式(5)描述的是 RBF 算法,如果 $\alpha=0, \beta=1$, 则式(5)描述的是轮询(RR, Round Robin)算法。

当小区内的用户所经历的信道变化为相似的快变化时, PFS 算法可以在系统吞吐量和长期公平性之间取得较好的折中,而且算法实现简单。但在实际的无线通信系统中,视距传播路径的存在和某些慢速移动用户所经历的信道变化非常缓慢等因素导致 PFS 算法所能提供的公平性是有限的。

近年来,针对不同的应用场景,许多改进的 PFS 算法能够获得更好的性能。指数规则的 DRC(data rate control)算法^[8]将式(5)中的 α 置为大于 1 的数,以指示信道条件,但 α 的取值对所有用户都是相同的,无法体现不同用户的信道条件差异以及用户信道的时变特性。改进的指数规则 DRC 算法^[9]根据每个用户的信道条件来设置 α 的值。由于利用逐次逼近的方法来更新 α 的值,因此该算法的收敛速度对步进值的取值比较敏感。

在文献[10]中,作者提出将式(5)中的 β 的取值范围扩大为从 1 到 ∞ 。但 β 的值并不随时间变化且对所有用户都是相同的。文献[11]提出的算法是对该算法的改进。文献[11]的算法通过监测平均数据率和平均公平因子来动态调整 β 的取值,但在每个时隙, β 的取值对所有用户是相同的,并不能根据不同用户经历的信道条件差异进行调整。动态 PFS 算法^[12]通过构造一个关于每个用户平均信干噪比(SINR, signal-to-interference-plus-noise-ratio)的函数来动态调整 β 的值,以提高小区边缘用户的性能,其中 β 的取值范围为 0 到 2。

在上述研究的基础上,提出了一种改进的自适应 PFS 算法,其特点有如下几点:

- 在每个时隙都对参数 β 进行更新,且不同用户的 β 取值不同;
- 每个用户的 β 取值由该用户当前时隙的请求速率和过去一段时间内的平均请求速率之比来确定;
- 参数 β 的动态范围从 0 到 ∞ ;
- 提出的算法被应用到 RBF MIMO 系统中,以增加那些较长时间处于较差信道条件下的用户所获得的服务机会,提高其性能。

4 自适应 PFS 算法

在 RBF MIMO 系统中,当用户从信道条件好的位置移动到信道条件差的位置并较长时间处于该位置时,基站应该给其更多的机会进行通信,以提高这部分用户的性能,体现系统的公平性。

利用一个新的参数 $\gamma_k(t)$ 来监测每个用户的信道状态变化。 $\gamma_k(t)$ 的定义式为:

$$\gamma_k(t) = \frac{R_k(t)}{\bar{R}_k(t)} \quad (6)$$

其中, $R_k(t)$ 为用户 k 在当前时隙的请求速率, $\bar{R}_k(t)$ 为用户 k 在过去的 t_c 个时隙内的平均请求速率。基站根据式(7)对每个用户的 $\bar{R}_k(t)$ 进行更新:

$$\bar{R}_k(t+1) = \left(1 - \frac{1}{t_c}\right)\bar{R}_k(t) + \frac{1}{t_c}R_k(t) \quad (7)$$

其中, $k=1,2,\dots,K$ 。为了简化算法,将对 $\bar{R}_k(t)$ 进行更新的时间窗长度取为与对 $T_k(t)$ 进行更新的时间窗长度相同。

当用户的信道状态逐渐变差并长时间处于较差状态时, $\bar{R}_k(t)$ 的值将缓慢下降,而 $R_k(t)$ 的值将快速减小,则 $\gamma_k(t)$ 的

值也将快速减小,因此 $\gamma_k(t)$ 的变化能够实时反映每个用户的信道状态的变化。 $\gamma_k(t)$ 的值越小,提出的自适应调度算法将给予该用户越多的服务机会,以获得系统的公平性。将 $\gamma_k(t)$ 应用到式(5)中,令 $\beta_k(t) = \gamma_k(t)$, $\alpha=1$, 记为 beta PFS 算法。

beta PFS 算法的基本步骤为:

在每个时隙内,

(1) 基站将训练符号 $s(t)$ 与随机权重矢量 $q(t)$ 相乘,并向小区内所有用户广播;

(2) 每个用户计算其在当前时隙的请求速率 $R_k(t)$, 并将计算结果反馈给基站;

(3) 基站根据如下调度规则选择以当前时隙进行数据传输的用户 k^* :

$$k^* = \operatorname{argmax}_{k=1,2,\dots,K} \frac{R_k(t)}{(T_k(t))^{\beta_k(t)}} \quad (8)$$

(4) 基站更新每个用户的 $\bar{R}_k(t)$, $\gamma_k(t)$, $\beta_k(t)$ 和 $T_k(t)$ 参数。

5 仿真与讨论

为了验证所提出的 beta PFS 算法的有效性,对 beta PFS 算法、RBF 算法和 RBF PFS 算法在前节所描述的仿真系统模型下的性能进行了蒙特卡罗仿真和分析比较。为了描述部分用户较长时间处于信道状态较差环境的特点,我们采用的时变衰落瑞利信道的参数是独立但不同分布的,其中三分之一用户的信道矩阵元素服从均值为 0, 方差为 1 的循环对称复高斯随机分布 $CN(0,1)$, 另三分之一用户的信道矩阵元素服从 $CN(0,1/2)$ 分布, 其余用户的信道矩阵元素服从 $CN(0,1/4)$ 分布。基站端设置 $N_t=4$ 根天线, 每个用户 1 根天线。假设每个用户均能准确获得自己的 CSI 信息。如下仿真结果均是 1,000,000 次仿真所得的平均性能。

图 1 给出了 3 种算法在 $SNR=0\text{dB}$ 和 $t_c=100$ 时的归一化系统吞吐量随小区内用户数增加而变化的曲线。

图 2 给出了应用以上 3 种算法作为基站调度器, 用户数为 $K=10$ 时, 每个用户的归一化频谱效率。10 个用户在小区内均匀分布, 仿真参数为 $SNR=0\text{dB}$ 和 $t_c=100$ 。

图 3 给出了 t_c 不同取值时, beta PFS 算法的归一化平均吞吐量的变化, 仿真参数为 $SNR=0\text{dB}$, $t_c=10, 100, 200$ 。

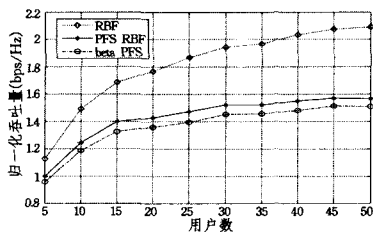


图 1 归一化系统吞吐量与小区内用户数的关系

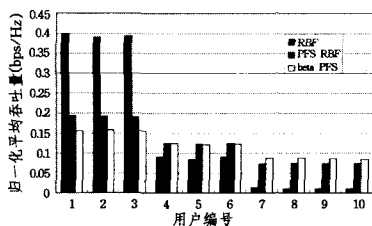


图 2 $K=10$ 个用户的归一化平均吞吐量比较

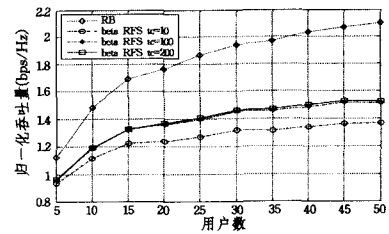


图 3 t_c 不同取值时, beta PFS 算法的归一化平均吞吐量比较

在多用户 MIMO 系统中, 公平性的主要目的是使各用户获得相同的吞吐量。我们引入公平因子来分析比例公平调度算法的公平性。其定义为:

$$F(K) = \frac{(\sum_{k=1}^K x_k)^2}{K \sum_{k=1}^K x_k^2} \quad (9)$$

其中, x_k 表示用户 k 的平均数据速率。从上式可以看出, $F(K)$ 的取值范围为从 0 到 1, 且取值越大, 公平性越好。

表 1 给出了在 $SNR=0\text{dB}$, $K=10$ 条件下, $t_c=10$, $t_c=100$ 和 $t_c=200$ 时, 上述 3 种算法的公平因子取值。

表 1 四种算法的公平因子比较

调度算法	RBF	PFS RBF	beta PFS
$t_c=10$	0.4549	0.8737	0.9322
$t_c=100$	0.45536	0.86592	0.94335
$t_c=200$	0.4542	0.8639	0.9410

由图 1、图 2、图 3 和表 1 可以看出, RBF 算法通过利用多用户分集增益, 可以使 MIMO 系统的归一化吞吐量随着用户数增加而迅速增加。但该算法对信道状态较差用户是不公平的, 因此其公平因子最小。与 RBF 算法和 PFS RBF 算法相比, 本文提出的 beta PFS 算法提供给信道状态较差用户更多的传输机会, 因此这些用户的性能将得到提高, 系统公平性将得到体现。获得系统公平性的代价是与 PFS RBF 算法相比系统的总归一化吞吐量下降了约 7%, 且在不同用户数条件下 beta PFS 的性能损失始终保持在 7% 左右。结合表 1 中三种算法的公平因子比较可知, beta PFS 算法较好地获得了公平性与系统吞吐量损失之间的折中, 从而提高了信道条件较差用户的性能。图 3 和表 1 还给出了时间参数 t_c 的不同取值对各算法的归一化吞吐量和系统公平性的影响。考察 beta PFS 算法, 当 t_c 较小时, 系统的归一化吞吐量随 t_c 增大而增大, 当 t_c 取值超过 100 后, 其取值变化对系统的归一化吞吐量影响不大。因此综合考虑归一化吞吐量和系统公平性的折中, $t_c=100$ 为较理想的取值。

结束语 本文针对较长时间处于信道较差条件下的部分用户的 QoS 保障问题, 提出了一种自适应的比例公平调度算法, 通过实时跟踪每个用户的请求速率与过去一段时间内请求速率的平均值之比来选择和调度用户, 该算法可以给处于“饥饿”状态的用户更多的服务机会, 提高其性能, 在系统总吞吐量和公平性之间取得平衡。

参考文献

- [1] Knopp R, Humblet P A. Information capacity and power control in single-cell multiuser communications [C]// IEEE International Conference on Communications. 1995: 331-335

(下转第 93 页)

观测方差: dB2	7.24	7.39	7.96	7.09	7.77	7.79
输出方差: dB2	7.25	7.36	7.99	7.08	7.75	7.77
时间: h	7	8	9	10	11	12
观测方差: dB2	7.42	7.22	7.13	6.91	7.19	7.37
输出方差: dB2	7.39	7.23	7.11	6.92	7.18	7.37

从比较结果来看,仿真输出与观测结果的数字特征基本吻合,误差保持在0.5%之内。

将频率为100Hz的单音信号分别输入到Walnut Street模型和Watterson模型当中,Watterson模型取ITU-R Rec. F. 1487中纬度模型disturbed的情况,平均信噪比取10dB,输出信号功率谱密度如图2和图3所示。

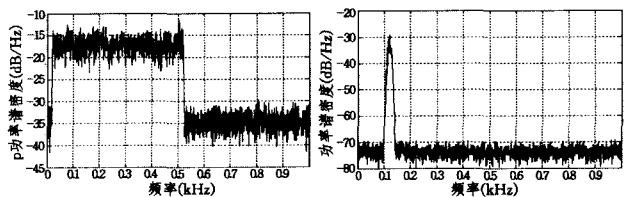


图2 Walnut Street模型输出信号功率谱密度 图3 Watterson模型输出信号功率谱密度

由图可见,与Watterson模型输出功率谱相比,Walnut Street模型输出功率谱出现了更明显的频谱展宽现象,导致能量分散,这也如实反映了长时段内由于各种衰落而造成的信道质量变化情况。

结束语 本文介绍了国外最新基于信噪比重放的Walnut Street短波信道模型,经过理论上的推导,给出了模型关键参数的解算方法以及将信噪比变化规律与Watterson模型结合的仿真流程。仿真结果验证了算法的正确性和可行性,同时表明算法具有简单、执行高效的特点。在OPNET等离散事件仿真工具中采用该仿真算法,可大大提高短波网络仿真的效率和精确度,从而为短波网络仿真奠定一个良好的基础。

参考文献

[1] Goodman J M. HF Communications, Science and Technology [M]. New York, NY: Van Nostrand Reinhold, 1992
 [2] Furman W, McRae D. Evaluation and Optimization of Data Link Protocols for HF Data Communications Systems [C] // IEEE

MILCOM'93. Boston, MA, 1993

[3] Department of Defense Interface Standard. Interoperability and Performance Standards for Medium and High Frequency Radio Systems[S]. MIL-STD-188-141B. 2001
 [4] Johnson E E, Kenney L, Chamberlain M, et al. US MIL-STD-188-141B Appendix C-A Unified 3rd Generation HF Message Protocol[C]//Nordic Shortwave Conference 98. 1998
 [5] Teters L R, et al. NTIA Report 83-127: Estimating the Performance of Telecommunication Systems Using the Ionospheric Transmission Channel-Ionospheric Communications Analysis and Prediction Program Users Manual[S]. 1983
 [6] ITU-R Recommendation F. 1487. Test of HF Modems With Bandwidths of Up to About 12k Hz Using Ionospheric Channel Simulators[S]. 2000
 [7] CCIR Recommendation 520-1. Use of High Frequency Ionospheric Channel Simulators[S]. 1982
 [8] Johnson E E. Simulation Results for Third-generation HF Automatic Link Establishment[C]//IEEE MILCOM'99. 1999
 [9] NMSU Technical Reports. E-Mail Standards for HF Radio[S]. 2001
 [10] Johnson E E. Interoperability and Performance Issues in HF E-Mail[C]//IEEE MILCOM'01. 2001
 [11] Johnson E E. Interactions Among Ionospheric Propagation, HF Modem, and Protocols[C]//IEEE MILCOM'02. Anaheim, CA, 2002
 [12] Johnson E E. The Walnut Street Model of Ionospheric HF Radio Propagation[S]. NMSU Technical Report. 2002
 [13] Johnson E E. ARQ Protocol Features for HF Radio Links[C]//IEEE MILCOM'02. Anaheim, CA, 2002
 [14] Batts W M, Furman W N, Koski E N. Empirically Characterizing Channel Quality Variation on HF Ionospheric Channels[C]//Nordic Shortwave Conference 2007. Faro, Sweden, August 2007; 14-16
 [15] Batts W M, Furman W N. Channel Quality Variation as a Design Consideration for Wireless Data Link Protocols [C] // IEEE MILCOM 2007. Orlando, Florida, USA, October 2007; 29-31
 [16] Arcoraci D. Channel Quality Variation and Its Impact on Data Link Protocol Performance[S]. Harris Corporation, RF Communication Division. July 2007

(上接第69页)

[2] Caire G, Shamai S. On the achievable throughput of a multi-antenna Gaussian broadcast channel [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(7): 1691-1706
 [3] Yu W, Cioffi J M. Sum capacity of Gaussian vector broadcast channels [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(9): 1875-1892
 [4] Vishwanath S, Jindal N, Goldsmith A. Duality, achievable rates, and sum-rate capacity of Gaussian MIMO broadcast channels [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(10): 2658-2668
 [5] Weingarten H, Steinberg Y, Shamai S. The capacity region of the Gaussian MIMO broadcast channel[C]//IEEE International Symposium on Information Theory. 2004; 174
 [6] Viswanath P, Tse D N C, Laroia R. Opportunistic beamforming using dumb antennas [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2002, 48(6): 1277-1294
 [7] Jalali A, Padovani R, Pankaj R. Data throughput of CDMA-HDR

a high efficiency-high data rate personal communication wireless system. 2000; 1854-1858

[8] Hoon K, Keunyoung K, Youngnam H, et al. An efficient scheduling algorithm for QoS in wireless packet data transmission [C]//13th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. 2002; 2244-2248
 [9] Aniba G, Aissa S. Adaptive proportional fairness for packet scheduling in HSDPA[C]//IEEE Global Telecommunications Conference. 2004; 4033-4037
 [10] Daiqin Y, Dongxu S, Wenjian S, et al. Towards Opportunistic Fair Scheduling in Wireless Networks[C]//IEEE International Conference on Communications. 2006; 5217-5221
 [11] Sang A, Xiaodong W, Madihan M, et al. A flexible downlink scheduling scheme in cellular packet data systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5(3): 568-577
 [12] Xu N, Guillaume V, Zhou W, et al. A Dynamic PF Scheduler to Improve the Cell Edge Performance[C]//IEEE 68th Vehicular Technology Conference. 2008; 1-5