

LTE-A 系统载波聚合情况下改进的 PF 算法^{*}

范文鹏¹, 徐昌彪^{1,2}, 鲜永菊²

(1. 重庆大学 通信工程学院, 重庆 400030; 2. 重庆邮电大学 移动通信重点实验室, 重庆 400065)

摘 要: 为提高边缘用户的吞吐量和用户间的公平性,提出了边缘用户优先比例公平算法。算法思想是让某些成分载波上的 RBs 以概率 a 分配给边缘用户,以概率 $1-a$ 分配给中心用户,分配后再使用传统的比例公平算法进行调度;而其他成分载波上的 RBs 直接使用传统的比例公平算法进行调度。仿真表明,该算法可以较好地提高边缘用户的吞吐量和用户间的公平性,并且可以通过控制 a 的大小来调节边缘用户吞吐量和用户间的公平性。

关键词: 载波聚合; LTE-A 系统; 中心用户; 边缘用户; 比例公平算法; 边缘用户优先 PF 算法

中图分类号: TN929.5; TP301.6

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2012)03-1032-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.03.063

Improved proportional fair algorithm for LTE-Advanced system with carrier aggregation

FAN Wen-peng¹, XU Chang-biao^{1,2}, XIAN Yong-ju²

(1. College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. Key Laboratory of Mobile Communications, Chongqing University of Posts & Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: In order to improve the cell edge users throughput and fairness between all users, this paper proposed a cell edge user prior proportional fair algorithm. The subject of this algorithm was to allocate the RBs(resource blocks) of some component carriers to the cell edge users and cell center users with probability a and $1-a$ respectively. After the allocation, it scheduled RBs by originally proportional fair algorithm. While the RBs of the other component carriers were scheduled by originally proportional fair algorithm directly. Simulation results indicate that this algorithm can fairly improve the cell edge users throughput and fairness between all users. In addition, it can adjust the cell edge users throughput and fairness between all users through controlling the size of a .

Key words: carrier aggregation; LTE-A system; cell center user; cell edge user; proportional fair; cell edge user prior proportional fair

0 引言

LTE 目前支持最大 20 MHz 的系统带宽,下行峰值速率可以达到约 300 Mbps。而 ITU-Advanced 以 1 Gbps 为设计目标,同时要求系统的最大带宽不小于 40 MHz。为了应对 ITU 对第四代移动通信技术的需求和其他标准化组织的挑战,3GPP 组织启动了后续的演进项目 LTE-Advanced(LTE-A)。LTE-A 系统中一项重要的技术是载波聚合技术^[15]。LTE-A 之所以提出载波聚合的技术,主要有以下原因:

a) LTE-A 系统的潜在部署频段包括 450470 MHz、698862 MHz、790862 MHz、2.32.4 GHz、3.44.2 GHz、4.44.99 GHz。除了 2.32.4 GHz 的传统蜂窝系统常用频段外,其他频段呈现高低分化的趋势。

b) 在系统带宽方面, LTE-A 系统的最大带宽要求达到 100 MHz,如此大的连续频谱很难找到。

c) 用户业务及应用有三个方面的趋势:(a) 业务容量呈指

数增长,需要高移动性的高速业务来满足持续增加的用户需求;(b) 多媒体业务相对语音业务增长更为迅速,并且逐步成为主要的业务需求;(c) 增强性业务与应用需要更高的峰值速率,在低移动速度环境下峰值速率达到 1 Gbps,在高移动性下峰值速率达到 100 Mbps^[4]。

从文献[58]中可以得出一个结论:无论是出于扇区吞吐量、用户间公平性的考虑,还是出于成分载波(component carrier, CC)负载均衡、时延的考虑,联合队列调度相对独立载波调度都是较好的选择。但是文献[58]并未给出具体的调度算法来提高系统的性能。文献[9]对于非相邻的带外载波聚合场景,假定每个成分载波具有相同的功率,由于高频成分载波的信道衰落大于低频成分载波,会导致高频成分载波的覆盖范围小于低频的,以至于在小区不同位置的用户可以调度的载波数目不同。文中针对这一场景提出了用户分组的方案,将具有相同调度成分载波个数的用户分为一组,牺牲了少量扇区吞吐量换取了用户间公平性的提高,但是对边缘用户的体验问题考虑

收稿日期: 2011-06-15; 修回日期: 2011-08-07 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60972068); 重庆市教委科学技术研究项目(KJ100517)

作者简介: 范文鹏(1986-),男,河南商丘人,硕士研究生,主要研究方向为 LTE-Advanced 系统载波聚合等(willvan125@sina.cn); 徐昌彪(1972-),男,教授,博士(后),主要研究方向为宽带通信网技术、无线通信网络技术、下一代核心网络技术等; 鲜永菊(1973-),女,副教授,博士,主要研究方向为认知无线电、动态频谱管理及网络安全技术等。

不够。边缘用户由于地处小区的边缘,用户在RB上的SNR较小,其瞬时速率较小,在传统PF调度算法中优先级较低,导致其吞吐量较小,在小区中的通信负载较大时甚至会出现“饥饿”现象,用户的体验较差。

本文针对边缘用户和中心用户的吞吐量、用户间公平性问题,提出一种边缘用户优先PF算法(cell edge user prior PF, CEPPF),根据用户所在小区的位置分为中心用户和边缘用户,通过限制部分成分载波上的RBs分配给边缘用户的概率来提高用户间的公平性。

1 系统模型和假设

1.1 小区架构

首先讨论小区架构。假定系统中有1个BS, N 个用户, L 个CCs,并且每个成分载波具有相同的带宽,都具有 V 个RBs。本文考虑带外非相邻的载波聚合场景,成分载波的集合为 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_L\}$,其中 $f_1 < f_2 < \dots < f_L$ 。

在时隙 s , 用户 i 在 RB_n 的SNR为

$$\gamma_i(n, s) = \frac{p_k(n) |H(n, s)|^2}{N_0} \quad (1)$$

$$p_k = V \times p_k(n) \quad (2)$$

其中: $p_k(n)$ 是成分载波 k 上 RB_n 的发射功率; $H_i(n, s)$ 和 N_0 分别是用户 i 在 RB_n 上的复合信道增益和噪声功率; p_k 是成分载波 k 的发射功率。那么在时隙 s , 用户 i 在 RB_n 上的瞬时数据速率为

$$r_i(n, s) = W \log(1 + \beta \gamma_i(n, s)) \quad (3)$$

其中: W 是 RB_n 的带宽; $\beta = -1.5 / \ln(5P_{e,n})$ 为信噪比差额; $P_{e,n}$ 是目标误比特率^[10]。

根据几何位置判定用户是中心用户还是边缘用户,中心用户所在的区域半径为 r , 小区半径为 R , 如图1阴影部分中的用户是边缘用户^[11]。用户均匀分布在小区中,边缘用户占总用户数的比例为 λ , 则

$$1 - \lambda = \frac{\pi r^2}{\frac{3\sqrt{3}R^2}{2}} \quad (4)$$

而中心用户的半径与小区半径之比为 μ , 则

$$\frac{r}{R} = \mu \quad (5)$$

1.2 成分载波覆盖方案

关于成分载波的覆盖范围应考虑两种情况:a)所有成分载波覆盖整个小区;b)由于所有成分载波具有相同的覆盖范围时,用户会选择信道条件较好的低频成分载波,再加上边缘用户占总用户数的比例较小,可以让成分载波中的某几个来覆盖整个小区,其他的只覆盖中心用户所在的范围。从节省BS电力和减小小区间干扰的角度考虑,方案b)不失为较好的选择,并且方案b)对频谱的利用率损失影响较小。因此本文使用方案b),通过控制成分载波的功率 $p_k (k=1, 2, \dots, L)$ 来控制其覆盖范围。

分析应该有多少个成分载波覆盖整个小区。从公平性的角度考虑问题,设边缘用户可以用的成分载波个数为 X 。从式(4)(5)得出 $\lambda = \frac{9-2\sqrt{3}\pi\mu^2}{9}$ 。取两个极端情况:a)中心用户使用全部的 L 个成分载波;b)中心用户使用除去 X 个成分载波

的其他 $L-X$ 个CC,则可得出:

$$\frac{1 - \frac{9-2\sqrt{3}\pi\mu^2}{9}}{L} = \frac{\frac{9-2\sqrt{3}\pi\mu^2}{9}}{X} \quad (6)$$

$$\frac{1 - \frac{9-2\sqrt{3}\pi\mu^2}{9}}{L-X} = \frac{\frac{9-2\sqrt{3}\pi\mu^2}{9}}{X} \quad (7)$$

由式(6)(7)可得出 $X \in (\frac{9-2\sqrt{3}\pi\mu^2}{9}L, \frac{3\sqrt{3}-2\pi\mu^2}{2\pi\mu^2}L)$, 则

对于不同成分载波个数的情况,表示为 $\frac{X}{L}$, 尽量让其比值在

$(\frac{9-2\sqrt{3}\pi\mu^2}{9}, \frac{3\sqrt{3}-2\pi\mu^2}{2\pi\mu^2})$ 中间,若无法让其比值在

$(\frac{9-2\sqrt{3}\pi\mu^2}{9}, \frac{3\sqrt{3}-2\pi\mu^2}{2\pi\mu^2})$ 中间,那么就让其比值大于

$\frac{3\sqrt{3}-2\pi\mu^2}{2\pi\mu^2}$ 。以1/3为例说明,如图2所示,有3个成分载波,

服务于边缘用户的成分载波仅有1个,服务于中心用户的有3个,服务于边缘用户的成分载波是频率最低的一个或几个。这种成分载波聚合部署场景在文献[12]中得到了阐述。

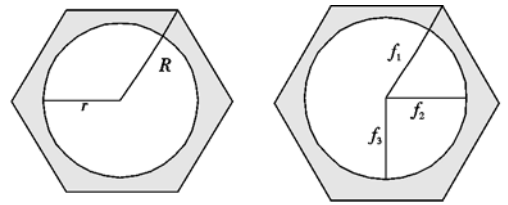


图1 边缘用户和中心用户的划分 图2 成分载波的覆盖范围

2 边缘用户优先调度PF算法

对于只服务于中心用户的成分载波(如图2中的 f_2 和 f_3),使用传统的PF调度算法,分配 RB_n 给瞬时数据速率与平均接收速率比值最大的用户 i ,表达式为

$$i^* = \arg \max_i \Gamma_{i,n} = \arg \max_i \frac{r_i(n, s)}{\bar{R}_i(s)} \quad (8)$$

其中: $r_i(n, s)$ 是用户 i 在 RB_n 上的瞬时传输速率; $\bar{R}_i(s)$ 是用户 i 的平均数据速率。

对于同时服务于中心用户和边缘用户的成分载波(如图2中的 f_1),使用CEPPF算法,让其侧重服务于边缘用户。其方法是首先 RB_n 以概率 a 分配给边缘用户,以 $1-a$ 的概率分配给中心用户,其中 $a > 0.5$ 。在分配给中心用户或者边缘用户后,再使用传统的PF算法进行调度,比较各用户在 RB_n 上的优先级,也就是使用式(8)。

a 的大小决定了服务于边缘用户的资源块的分配情况, a 越大,资源块就越可能分配给边缘用户,进而可以提高边缘用户的吞吐量。可以通过控制 a 的大小来控制边缘用户的吞吐量,通过比较不同 a 值的边缘用户吞吐量、中心用户吞吐量和公平性指数来找到最优的 a 值,这一点可以通过仿真得到验证。在每个时隙 s 中,算法的执行流程如图3所示。其执行的步骤为如下:

a)每个用户测量聚合CC的信道质量,估计 $r_i(n, s) = W \log(1 + \beta \gamma_i(n, s))$ 。

b)由于每个用户都会接入 f_1 ,可通过下面的方法来划分中心用户和边缘用户:用户 i 的路损为 $PL_i^1 = 58.83 + 37.6 \log_{10}(d_i) + 21 \log_{10}(f_1)$,而中心用户和边缘用户分界线处的路损为

$PL^1 = 58.83 + 37.6 \log_{10}(r) + 21 \log_{10}(f_1)$ 。如果 $PL_i^1 > PL^i$, 则用户 i 是边缘用户, 否则用户 i 是中心用户。

c) 初始化 $k = 1$ 。

d) 根据上述的资源调度算法分配成分载波 f_k 的 RB_n 给用户, 其中 $n = 1, 2, \dots, V$ 。

e) 在分配 RB_n 之后, 通过式 (9) (10) 更新 $\bar{R}_i(s)$:

$$\bar{R}_i(s+1) = (1 - \frac{1}{T_c})\bar{R}_i(s) + \frac{1}{T_c}r_i(n,s)g(i) \tag{9}$$

$$g(i) = \begin{cases} 1 & \text{if } i = i^* \\ 0 & \text{if } i \neq i^* \end{cases} \tag{10}$$

其中: T_c 是平均传输速率的观察窗长度, 由 TTI 来度量。

f) 令 $k = k + 1$, 如果 $k > L$, 停止; 否则, 转到步骤 d)。

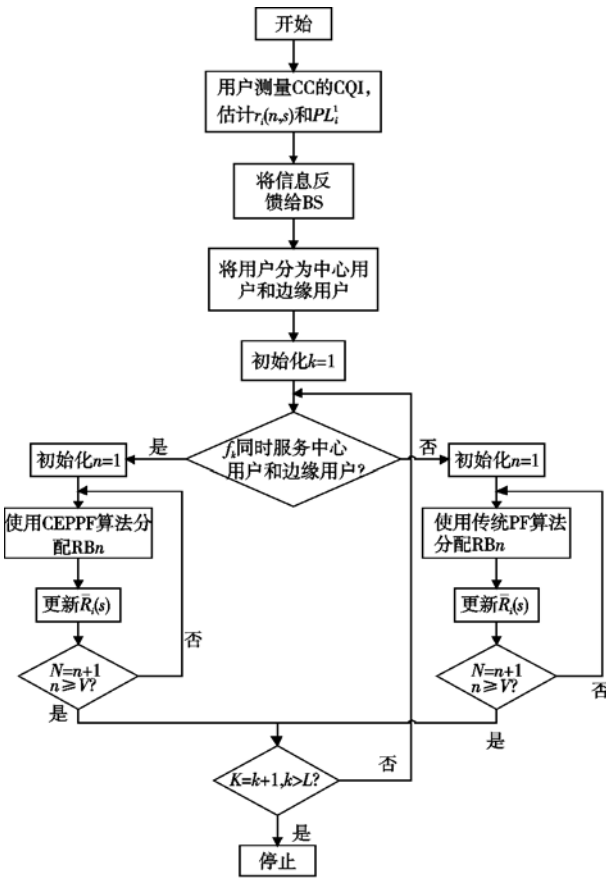


图3 算法的流程图

3 仿真结果与分析

本章通过仿真来估计算法的性能, 仿真是针对 LTE-Advanced 系统中下行链路带外非相邻聚合场景, 使用 MATLAB 作为仿真的工具。考虑三个成分载波聚合的情况, 其中 $f_1 = 860 \text{ MHz}$, $f_2 = 2\,300 \text{ MHz}$, $f_3 = 3\,400 \text{ MHz}$, 每个载波的带宽为 20 MHz , 设定 $\mu = 0.8$ 。在仿真中观察窗 T_c 的长度设为 100TTIs , 其他的参数如表 1 所示。

设定扇区的用户数 $N = 30$, CEPPF 算法中的概率 $a = 0.8$ 。在仿真时按照图 3 的流程进行, 分别统计各个用户的吞吐量, 然后分别计算中心用户和边缘用户的吞吐量。

从图 4 中可以看到, 相比传统的 PF 算法, CEPPF 算法中心用户的吞吐量下降了, 扇区的总吞吐量也下降了, 而边缘用户的吞吐量升高了, 边缘用户的体验得到了提高。这是因为边缘用户相比中心用户在同一 RB 的 SNR 较低, 而 CEPPF 算法分配了大量的 RBs 给信道条件差的边缘用户。

表 1 系统仿真参数

参 数	参数值
小区拓扑	正六边形, 19 个小区, 每个小区三个扇区
站间距	500 m
传播损耗公式	$L = 58.83 + 37.6 \log_{10}(R) + 21 \log_{10}(f)$ (R 单位 km, f 单位 MHz)
对数正态遮蔽	期望值 0, 标准差 8 dB 的高斯分布
穿透损耗	$A(\theta) = -\min\left[12\left(\frac{\theta}{\theta_{3\text{dB}}}\right)^2, A_m\right]$, $\theta_{3\text{dB}} = 70^\circ$, $A_m = 20 \text{ dB}$
三扇区定向天线	
用户分布	均匀分布在小区中
用户移动速度	3 km/h
基站发射功率	46 dBm (40 W)
天线配置	1 × 1
信道模型	spatial channel model
UE 和 BS 最小距离	35 m
热噪声谱密度	-174 dBm/Hz
业务模型	full buffer

上面讨论的吞吐量主要是聚合情况下整个系统的性能, 而公平性适用于对每个用户性能的讨论, 特别是对边缘用户的性能。公平性指数^[13]可以定义为

$$F = \frac{\left(\sum_{g=1}^G R_g\right)^2}{G \sum_{g=1}^G R_g^2} \tag{11}$$

其中: F 是基于中心用户和边缘用户平均吞吐量性能的公平性指数, 取 01 之间的连续值; $G = 2$; R_1 表示中心用户的平均吞吐量; R_2 表示边缘用户的平均吞吐量。 F 值越大, 表示中心用户和边缘用户之间的公平性越好。

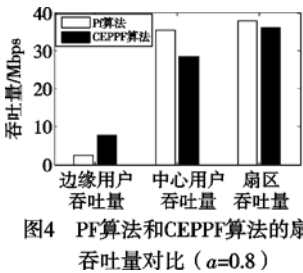


图4 PF算法和CEPPF算法的扇区吞吐量对比 ($a = 0.8$)

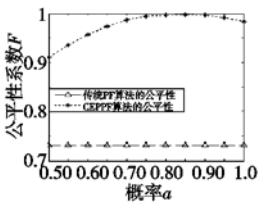


图5 不同概率情况下的公平性指数

通过图 5 可以看到, 传统 PF 算法的公平性指数明显小于 CEPPF 算法, 证明了 CEPPF 的公平性较好。另外, 传统 PF 算法的公平性指数基本保持恒定, 这是因为传统 PF 算法并未使用概率 a , CEPPF 算法的公平性指数经历了一个先升后降的过程, $a \in \{0.5, 0.55, 0.6, 0.65, 0.7, 0.75, 0.8, 0.85\}$ 时, 随着 a 的增大, 边缘用户的平均吞吐量提高, 中心用户的平均吞吐量下降, 这在图 6 得到了验证。当 $a = 0.85$ 时 F 达到最大, 也就是此时系统的公平性最好, 但这只是在集合 $\{0.5, 0.55, 0.6, 0.65, 0.7, 0.75, 0.8, 0.85\}$ 中最好, 在 $[0.85, 0.9)$ 有 a 值可以使 F 达到最大值。在 $a \in \{0.9, 0.95, 1\}$ 时, 随着 a 的增大, 边缘用户的平均吞吐量持续提高, 而中心用户的平均吞吐量持续下降, 这时用户间的公平性下降。

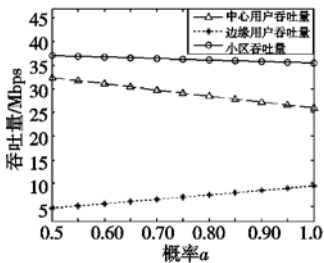


图6 吞吐量随着概率a的变化情况

瓣;当 $d=0.75\lambda_0=17.25\text{ mm}$ 时,天线的增益为 13.6 dB;而当 $d=0.7\lambda_0=16.1\text{ mm}$ 时,天线的增益为 13.7 dB,天线的增益值最高。所以天线单元间距的最优值取为 $d=0.7\lambda_0=16.1\text{ mm}$ 。

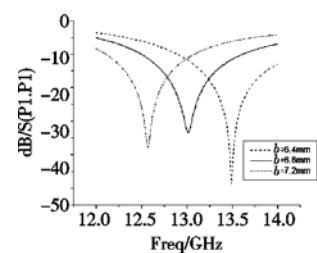


图4 天线宽度 b 对天线中心频点的影响

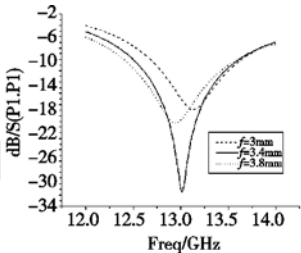


图5 缝隙长度 f 对天线 S_{11} 的影响

取天线单元间距 $d=0.7\lambda_0$,对阵列天线进行仿真分析,其输入回波损耗曲线如图 6 所示,在 12.14~14.3 GHz 频带内满足 $S_{11}\leq -10\text{ dB}$,实际带宽为 2.16 GHz,相对阻抗带宽达到 16.6%。由图可知,该天线阵列有两个谐振点,一个处于 12.5 GHz,一个处于 13.63 GHz。正是由于该天线阵列有两个谐振点,才使得该天线在工作频段内有较好的带宽特性。阵列方向图如图 7 所示,增益达到 13.7 dB。因此,四单元天线阵具有良好的带宽特性和增益特性。

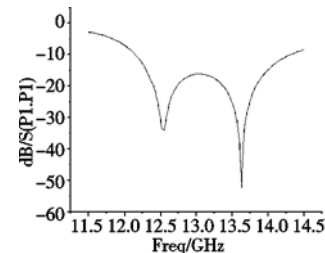


图6 阵列天线输入回波损耗曲线

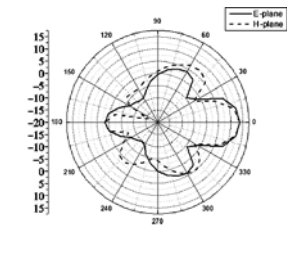


图7 阵列天线的E面和H面

3 结束语

本文设计了一个工作在 Ku 波段的宽频带四单元微带天线阵。用三维电磁场仿真软件 Ansoft HFSS 对该天线阵的结构进行了仿真优化。由于设计的天线综合运用了 H 型缝隙耦合

(上接第 1034 页)

4 结束语

在 LTE-A 系统的载波聚合情况下,本文针对边缘用户的体验问题,提出了边缘用户优先 PF 调度算法。仿真表明,该算法可以提高边缘用户的吞吐量和用户间的公平性,并且可以通过控制 α 的大小来调节边缘用户吞吐量和用户间的公平性。但是相比传统 PF 调度算法,扇区吞吐量有些许的下降。

参考文献:

[1] YUAN Guang-xiang,ZHANG Xiang,WANG Wen-bo,et al. Carrier aggregation for LTE-Advanced mobile communication systems[J]. IEEE Communications Magazine,2010,48(2):88-93.

[2] RATASUK R,TOLLI D,GHOSH A. Carrier aggregation in LTE-Advanced[C]//Proc of the 71st IEEE Vehicular Technology Conference. 2010:1-5.

[3] IWAMURA M,ETEMAD K,FONG M H,et al. Carrier aggregation framework in 3GPP LTE-Advanced[J]. IEEE Communications Magazine,2010,48(8):60-67.

[4] 周渝霞. LTE-Advanced 系统中的载波聚合技术的研究综述[J]. 电子质量,2009(9):37-40.

[5] 程顺川,郑瑞明,张欣,等. LTE-Advanced 系统中载波聚合技术的性能研究[J]. 现代电信科技,2009(4):53-56.

馈电技术、反相馈电技术并引入空气层等,设计的宽频带天线具有良好的带宽特性和增益特性。四元天线阵列在 12.14~14.3 GHz 频带内满足 $S_{11}\leq -10\text{ dB}$,实际带宽为 2.16 GHz,相对阻抗带宽达到 16.6%,增益达到 13.7 dB。该天线阵电性能和辐射特性良好,可满足其在卫星、车载雷达和散射通信等领域的工程应用。

参考文献:

[1] 杨帅,冯全源. 缝隙加载的宽频带圆极化微带天线[J]. 探测与控制学报,2009,31(5):77-80.

[2] 王宇,姜兴,李思敏. Ku 波段宽频带双极化微带天线阵的设计[J]. 电波科学学报,2008,23(4):276-279.

[3] 李倩. C/X 波段双频共口面微带阵列天线研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2006.

[4] 丁军. 宽带微带天线单元及阵列研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2007.

[5] 王泽美,潘雪明,鄢泽洪,等. 一种 H 型槽耦合的 Ku 波段宽频带天线[J]. 雷达科学与技术,2005,3(5):317-320.

[6] 李书杰,鄢泽洪,张小苗. 一 16 元 Ku 波段微带天线阵的设计[J]. 微波学报,2006,22:32-34.

[7] 焦永昌,潘雪明,王泽美,等. 一种开双 H 型槽的新型宽频带微带天线[J]. 电波科学学报,2005,20(5):656-659.

[8] YUN W,YOON Y J. A wind-band aperture couple microstrip array antenna using inverted feeding structures[J]. IEEE Tran on Antennas Propagation,2005,53(2):861-862.

[9] LI Cun-long,WANG Hai-hua,LIN Hao-jia,et al. Analysis and design of broadband microstrip patch antenna with a pair of double cross-shaped slots[C]//Proc of International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. Chengdu: The Chinese Institute of Electronics,2010:18-21.

[10] WANG H,HUANG X B,FANG D G. A single layer wideband U-slot microstrip patch antenna array[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters,2008(7):9-12.

[11] 张小波. 一种宽频带高增益微带天线的设计[J]. 微波学报,2008,24:113-116.

[6] LEI Lei,ZHENG Kan. Performance evaluation of carrier aggregation for elastic traffic in LTE-Advanced systems[J]. IEICE Trans on Communications,2009(11):3516-3519.

[7] ZHANG L,WANG Y Y,HUANG L,et al. QoS performance analysis on carrier aggregation based LTE-A systems[C]//Proc of IET International Communication Conference on Wireless Mobile and Computing. 2009:253-256.

[8] CHEN Li,CHEN Wen-Wen,ZHANG Xia,et al. Analysis and simulation for spectrum aggregation in LTE-Advanced system[C]//Proc of the 70th IEEE Vehicular Technology Conference. 2009:1-6.

[9] SHI Song-song,FENG Chun-yan,GUO Cai-li,et al. A resource scheduling algorithm based on user grouping for LTE-Advanced system with carrier aggregation[C]//Proc of International Symposium on Computer Network and Multimedia Technology. 2009.

[10] MA Y. Proportional fair scheduling for downlink OFDMA[C]//Proc of IEEE International Conference on Communications. 2007:4843-4848.

[11] 任参军,钱耘之,陈明. LTE 系统上行链路无线资源分配算法[J]. 通信技术,2010(4):190-192.

[12] 3GPP TS 36.300. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); stage 2 description,version 10.3.0[S]. 2011.

[13] SANG A,WANG Xiao-dong,MADIHAN M,et al. A flexible downlink scheduling scheme in cellular packet data systems[J]. IEEE Trans on Wireless Communications,2006,5(3):568-577.