

文章编号: 1004-4353(2023)02-0129-07

具有用户优先级的载波聚合资源 分配方案的性能分析

朱东弼, 宋佳兴, 许一虎
(延边大学 工学院, 吉林 延吉 133002)

摘要: 为了提高无线通信系统的传输效率,通过设置不同阈值提出了一种具有用户优先级的载波聚合无线资源分配方案. 该方案首先针对用户的不同类型(宽带用户和窄带用户、始发用户和切换用户)将其设置为不同的优先级;然后通过设置两个阈值将无线资源块分配给不同的优先级用户,以此在能够保障宽带用户获得最低服务质量的前提下,提高高优先级用户的切换成功率和系统的吞吐量. 性能验证结果表明,该方案在提高系统的总吞吐量和切换成功率方面显著优于无用户优先级的载波聚合资源分配方案,因此该方案在使用载波聚合技术的无线网络中具有良好的应用价值.

关键词: 载波聚合; 无线资源块; 用户优先级; 吞吐量; 阻塞概率

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

Performance analysis of carrier aggregation resource allocation scheme with user priority

ZHU Dongbi, SONG Jiaying, XU Yihu
(College of Engineering, Yanbian University, Yanji 133002, China)

Abstract: To improve the transmission efficiency of wireless communication system, a carrier aggregation radio resource allocation scheme with user priority was proposed by setting different thresholds. The scheme first set different priority for different types of users (wideband users and narrowband users, originating users and handoff users); then, two thresholds were set to control the number of wireless resource blocks allocated to different priority users, so as to improve the handoff success probability of high-priority users and improve the system throughput under the premise of ensuring the minimum quality of service for broadband users. The performance verification results show that this scheme is significantly superior to the carrier aggregation resource allocation scheme without user priority in improving the handoff success probability and the total throughput of the system. Therefore, this scheme has a good application value in wireless networks using carrier aggregation technology.

Keywords: carrier aggregation; wireless resource block; user priority; throughput; blocking probability

0 引言

载波聚合(carrier aggregation, CA)是一种通过增加系统的传输带宽来满足单用户峰值速率和提升系统容量的技术,目前该技术被广泛应用于 LTE-A 和 5G 系统中^[1-3]. 在载波聚合的过程中,其资源调

收稿日期: 2023-02-25

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20220101141JC)

作者简介: 朱东弼(1967—),男(朝鲜族),博士,教授,研究方向为通信网协议.

度可分为成分载波(component carrier, CC)级调度和资源块(resource block, RB)级调度. CC 级调度通常使用独立资源分配算法^[4]和联合资源分配算法^[5-6]对资源进行调度. RB 级调度通常使用轮询算法^[7]、最大载干比算法^[8]、比例公平算法^[9]、贪婪算法^[10]和资源分配算法^[11]等对资源进行调度. 上述算法都是基于用户信道的条件对资源进行分配的, 且每种分配算法都只适合于单一的应用场景; 但随着用户对多元化和个性化无线网络需求的增加, 开发设计出一种能够适合于多个应用场景的资源分配算法具有重要意义. 为此, 本文根据载波聚合的特征以及不同用户的个性需求, 提出了一种具有用户优先级的载波聚合资源分配方案, 并通过仿真实验验证了该方法的有效性.

1 具有用户优先级的载波聚合资源分配方案

本方案将系统中的用户分为高优先级和低优先级. 在系统拥挤时, 为了防止从其他小区切换过来的用户无法接入到系统, 本文将从其他小区切换到本小区内的请求业务的用户设为高优先级用户, 而将本小区内的请求业务的用户设为低优先级. 以下为具有用户优先级保护阈值的载波聚合资源分配方案:

假设载波聚合系统有 M 个资源块, 且系统同时支持窄带用户和宽带用户. 当窄带用户接入到系统时, 系统会调用某一个载波的某一个资源块为其服务; 当宽带用户接入到系统时, 系统会调用某一个或多个载波的 b 个资源块为其服务.

当新到达的宽带用户或窄带用户接入到系统时, 若此时系统中没有可调用的空闲资源块, 则系统会在占用 b 个资源块的宽带用户中调用一些可分配的资源块分配给接入到系统的用户. 为了提高高优先级用户的切换成功率和系统的总吞吐量, 本文在系统中设置了 2 个保护阈值 b_1 和 b_0 ($b_0 < b_1$), 并根据所到达的用户优先级来确定所要调用的资源块数量, 其中 b_0 是为保障宽带用户能够得到最低服务质量而设置的最少的资源块数量. 当低优先级宽带用户和窄带用户到达系统时, 若此时系统中没有可调用的空闲资源块, 则占用 b 个资源块的宽带用户最多可提供 $b - b_1$ 个资源块; 当高优先级宽带用户和窄带用户到达系统时, 若此时系统中没有可调用的空闲资源块, 则占用 b (或 b_1) 个资源块的宽带用户最多可提供 $b - b_0$ (或 $b_1 - b_0$) 个资源块.

当低优先级窄带用户接入到系统时, 若此时系统中没有可调用的空闲资源块, 且所有的宽带用户所调用的资源块数量都少于或等于 b_1 个资源块, 则此时低优先级窄带用户的业务请求将被拒绝. 当高优先级窄带用户接入到系统时, 若此时系统中没有可调用的空闲资源块, 且所有的宽带用户都在使用 b_0 个资源块, 则此时该用户在缓存区中等待可调用的空闲资源块; 如果缓存区已满, 则该用户的切换请求将被拒绝.

当低优先级宽带用户到达系统时, 若此时空闲资源块大于或等于 b 个, 则其可占用 b 个资源块来接收服务. 当系统可调用的资源块数少于 b 个时, 若此时系统有 j 个窄带用户和 k 个宽带用户, 并且 $\lfloor \frac{M-j}{k+1} \rfloor \geq b_1$, 则将调用 $\lfloor \frac{M-j}{k+1} \rfloor$ 个资源块为该宽带用户服务; 若 $\lfloor \frac{M-j}{k+1} \rfloor < b_1$, 则该宽带用户的切换请求将被拒绝.

当高优先级宽带用户接入到系统时, 若此时空闲资源块大于或等于 b 个, 则其可占用 b 个资源块来接收服务; 若空闲资源块数少于 b 个, 且系统中有 j 个窄带用户和 k 个宽带用户正在接收服务, 则当 $\lfloor \frac{M-j}{k+1} \rfloor \geq b_0$ 时, 系统将调用 $\lfloor \frac{M-j}{k+1} \rfloor$ 个资源块为该宽带用户服务; 当 $\lfloor \frac{M-j}{k+1} \rfloor < b_0$ 时, 则该用户的切换请求将被拒绝.

当某一用户在本小区中的业务结束时(其所占用的资源块被释放), 若此时缓存区中有正在等候的高优先级窄带用户, 则这些用户将优先使用被释放的资源块; 若还有剩余的释放资源块, 则这些资源块将被用于升级处于低服务质量的宽带用户. 例如: 若有 n_r 个剩余释放资源块数, 且系统中正在使用 i 个资源块的宽带用户(即占用最少资源块的用户)数为 n_i . 当 $n_r < n_i$ 时, 系统将从 n_i 个宽带用户中随机选

出 n_r 个用户进行升级(即占用 $i+1$ 个资源块);当 $n_r \geq n_i$ 时,则所有 n_i 个宽带用户所占用的资源块数都升级为 $i+1$ 个资源块,而剩余的 $n_r - n_i$ 个资源块则继续用于升级处于低服务质量的宽带用户.

2 性能分析

为了分析本文方案的性能,本文假设:低优先级窄带用户和宽带用户到达系统的过程分别服从参数为 λ_{no} 和 λ_{wo} 的泊松过程,从其他小区切换过来的高优先级窄带用户和宽带用户到达系统的过程分别服从参数为 λ_{nh} 和 λ_{wh} 的泊松过程;窄带用户和宽带用户的服务时间均是相互独立和服从指数分布的,且其平均服务时间分别为 μ^{-1} 和 $(iv)^{-1}$.

设本小区内可供分配的总资源块数为 M 个,高优先级窄带用户的缓存区容量为 N ,且高优先级窄带用户在缓存区中的停留时间服从参数为 d 的指数分布.

设 $N_w(t)$ 为 t 时刻正在接收服务的宽带用户数, $N_n(t)$ 为 t 时刻正在接收服务的窄带用户和正在缓存区等待的窄带用户数,则该随机过程 $\{(N_w(t), N_n(t)) | t \geq 0\}$ 为二维连续时间马尔可夫过程,其状态空间为 $S = \{(k, j) | 0 \leq k \leq K, 0 \leq j \leq M - kb_0 + N\}$, 其中 $K = \lfloor \frac{M}{b_0} \rfloor$.

将状态空间 S 中的所有状态排序成字典顺序即可得到连续时间马尔可夫过程 $\{(N_w(t), N_n(t)) | t \geq 0\}$ 的无穷小算子 \mathbf{G} 矩阵. 该矩阵为有限拟生灭过程(QBD),其结构由多个分块矩阵组成,如式(1)所示:

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_0 & \mathbf{U}_0 & & & \\ \mathbf{D}_1 & \mathbf{A}_1 & \mathbf{U}_1 & & \\ & \mathbf{D}_2 & \mathbf{A}_2 & \mathbf{U}_2 & \\ & & \cdots & \cdots & \cdots \\ & & & \mathbf{D}_{K-1} & \mathbf{A}_{K-1} & \mathbf{U}_{K-1} \\ & & & & \mathbf{D}_K & \mathbf{A}_K \end{pmatrix}. \quad (1)$$

式(1)中的分块矩阵 \mathbf{D}_k ($1 \leq k \leq K_b$) 是系统的宽带用户数从 k 个减少到 $k-1$ 个时的状态转移速率矩阵,可表示为 $\mathbf{D}_k = (\text{diag}(d_0^{(k)}, d_1^{(k)}, d_2^{(k)}, \dots, d_{M-kb_0+N}^{(k)}), 0)$. 该矩阵的维度为 $(M - kb_0 + N + 1) \times (M - (k-1)b_0 + N + 1)$, 且其对角线元素为:

(i) 当 $0 < k \leq K_b$ 时,有:

$$d_j^{(k)} = \begin{cases} kvb, & 0 \leq j \leq M - kb; \\ (M - k(l-1) - j)vl + (j - M + kl)v(l-1), & M - kl < j \leq M - k(l-1), \\ & l = b, b-1, \dots, b_0 + 1; \\ kvb_0, & M - kb_0 < j \leq M - kb_0 + N. \end{cases}$$

(ii) 当 $K_i < k \leq K_{i-1}$ ($i = b, b-1, \dots, b_0 + 2$) 时,有:

$$d_j^{(k)} = \begin{cases} (M - k(i-1) - j)vi + (j - M + ki)v(i-1), & 0 \leq j \leq M - k(i-1); \\ (M - k(l-1) - j)vl + (j - M + kl)v(l-1), & M - kl < j \leq M - k(l-1), \\ & l = i-1, \dots, b_0 + 1; \\ kvb_0, & M - kb_0 < j \leq M - kb_0 + N. \end{cases}$$

(iii) 当 $K_{b_0} + 1 < k \leq K$ 时,有:

$$d_j^{(k)} = \begin{cases} (M - kb_0 - j)v(b_0 + 1) + (j - M + k(b_0 + 1))vb_0, & 0 \leq j \leq M - kb_0; \\ kvb_0, & M - kb_0 < j \leq M - kb_0 + N. \end{cases}$$

式(1)中的分块矩阵 \mathbf{U}_k ($0 \leq k < K$) 是系统的宽带用户数从 k 个增加到 $k+1$ 个时的状态转移速率矩阵,可表示为 $\mathbf{U}_k = \begin{pmatrix} \text{diag}(u_0^{(k)}, u_1^{(k)}, u_2^{(k)}, \dots, u_{M-(k+1)b_0+N}^{(k)}) \\ \mathbf{0}_{(b_0 \times M - (k+1)b_0 + N + 1)} \end{pmatrix}$. 该矩阵的维度为 $(M - kb_0 + N + 1) \times$

$(M - (k + 1)b_0 + N + 1)$, 且其对角线元素为:

(i) 当 $0 \leq k < K_{b_1}$ 时, 有:

$$u_j^{(k)} = \begin{cases} \lambda_w, & 0 \leq j \leq M - (k + 1)b_1; \\ \lambda_{wh}, & M - (k + 1)b_1 < j \leq M - (k + 1)b_0; \\ 0, & M - (k + 1)b_0 < j \leq M - (k + 1)b_0 + N, \end{cases}$$

其中 λ_w ($\lambda_w = \lambda_{wh} + \lambda_{wo}$) 为宽带用户的总到达率.

(ii) 当 $K_{b_1} \leq k < K$ 时, 有:

$$u_j^{(k)} = \begin{cases} \lambda_{wh}, & 0 \leq j \leq M - (k + 1)b_0; \\ 0, & M - (k + 1)b_0 < j \leq M - (k + 1)b_0 + N. \end{cases}$$

式(1) 中的分块矩阵 \mathbf{A}_k ($0 \leq k \leq K$) 是系统的宽带用户数保持不变时系统的状态转移速率矩阵, 可表示为 $\mathbf{A}_k = \mathbf{Q}_k - (\text{diag}(d_0^{(k)}, d_1^{(k)}, d_2^{(k)}, \dots, d_{M-kb_0+N}^{(k)}) - (\mathbf{U}_k, 0_{(M-kb_0+N+1) \times b_0}))$. 该矩阵的维度为 $(M - kb_0 + N + 1) \times (M - kb_0 + N + 1)$, 且其对角线元素 $q_j^{(k)}$ 可表示为:

(i) 当 $0 \leq k \leq K_{b_1}$ 时, 有:

$$q_j^{(k)} = \begin{cases} -(j\mu + \lambda_n), & 0 \leq j \leq M - kb_1 - 1; \\ -(j\mu + \lambda_{nh}), & M - kb_1 \leq j \leq M - kb_0; \\ -((M - kb_0)\mu + ld + \lambda_{nh}), & j = M - kb_0 + l \ (1 \leq l \leq N - 1); \\ -((M - kb_0)\mu + Nd), & j = M - kb_0 + N, \end{cases}$$

其中 λ_n 是窄带用户的总到达率.

(ii) 当 $K_{b_1} < k \leq K$ 时, 有:

$$q_j^{(k)} = \begin{cases} -(j\mu + \lambda_{nh}), & 0 \leq j \leq M - kb_0; \\ -((M - kb_0)\mu + ld + \lambda_{nh}), & j = M - kb_0 + l \ (1 \leq l \leq N - 1); \\ -((M - kb_0)\mu + Nd), & j = M - kb_0 + N. \end{cases}$$

由于连续时间马尔可夫过程 $\{(N_w(t), N_n(t)) | t \geq 0\}$ 的无穷小算子 \mathbf{G} 是与状态相关的有限拟生灭过程, 因此可知系统能够达到稳态. 若用向量 $\boldsymbol{\Pi}$ 表示系统的稳态概率矩阵, 则 $\boldsymbol{\Pi}$ 是如下线性方程组的唯一解:

$$\boldsymbol{\Pi}\mathbf{G} = \mathbf{0}, \boldsymbol{\Pi}\mathbf{e} = \mathbf{1}. \quad (2)$$

式(2) 中向量 \mathbf{e} 是所有元素均为 1 且其维数为 $\sum_{k=0}^K (M - kb_0 + N + 1)$ 的列向量. 向量 $\boldsymbol{\Pi}$ 的子向量为 $\boldsymbol{\Pi} = (\boldsymbol{\Pi}_0, \boldsymbol{\Pi}_1, \dots, \boldsymbol{\Pi}_K)$, 其中 $\boldsymbol{\Pi}_k = (\pi_{k,0}, \pi_{k,1}, \dots, \pi_{k,M-kb_0+N})$, $\pi_{k,j}$ 是系统达到稳态时其马尔可夫过程处于状态 (k, j) 的概率. 根据矩阵分析方法可得系统稳态概率 $\boldsymbol{\Pi}$ 的子向量为:

$$\boldsymbol{\Pi}_k = \boldsymbol{\Pi}_0 \prod_{l=1}^k [\mathbf{U}_{l-1} (-\mathbf{B}_l^{-1})], \ 1 \leq k \leq K. \quad (3)$$

其中 $\boldsymbol{\Pi}_0$ 是由如下方程得到的:

$$\boldsymbol{\Pi}_0 \mathbf{B}_0 = \mathbf{0}, \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\Pi}_0 [\mathbf{e}_0 + \sum_{k=1}^K (\prod_{l=1}^k \mathbf{U}_{l-1} (-\mathbf{B}_l^{-1})) \mathbf{e}_k] = \mathbf{1}. \quad (5)$$

上式中, 矩阵 \mathbf{B} 由如下递归关系得出: $\mathbf{B}_K = \mathbf{A}_K$, $\mathbf{B}_k = \mathbf{A}_k + \mathbf{U}_k (-\mathbf{B}_{k+1}^{-1}) \mathbf{D}_{k+1}$, $k = 0, 1, \dots, K - 1$. 由上述可知, 通过计算稳态概率向量 $\boldsymbol{\Pi}$ 就可以计算出系统的阻塞概率和吞吐量.

由系统的稳态概率可得, 低优先级窄带用户的阻塞概率 $P_{no} = 1 - \sum_{k=0}^{Kb_1} \sum_{j=0}^{M-Kb_1-1} \pi_{k,j}$, 低优先级宽带用

户的阻塞概率 $P_{wo} = 1 - \sum_{k=0}^{Kb_1-1} \sum_{j=0}^{M-(k+1)b_1} \pi_{k,j}$.

设 P_{wh} 和 P_{nh} 分别为高优先级宽带用户和高优先级窄带用户的阻塞概率,则有:

$$P_{\text{wh}} = 1 - \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{j=0}^{M-(k+1)b_0} \pi_{k,j},$$

$$P_{\text{nh}} = \sum_{k=0}^K \pi_{k,M-kb_0+N} + \sum_{k=0}^K \sum_{l=0}^{N-1} \pi_{k,M-kb_0+l} \pi_{f|k,l}.$$

其中 $\pi_{f|k,l}$ 是当系统中的宽带用户数为 k , 且缓存区中已有 l 个高优先级窄带用户时, 新进入缓存区的高优先级窄带用户在离开缓存区时其未能分配到无线资源块的概率. 令 $\alpha_{k,l} = kvb_0 + (M-kb_0)\mu + ld$, 则此用户的状态会有以下3种情形: ① 以 $\frac{d}{\alpha_{k,l} + d}$ 的概率离开缓存区; ② 以 $\frac{(M-kb_0)u + ld}{\alpha_{k,l} + d}$ 的概率在缓存区中向前移动1个位置, 即系统中有一个窄带用户业务结束或离开缓存区; ③ 以 $\frac{kvb_0}{\alpha_{k,l} + d}$ 的概率在缓存区中向前移动 $l-b_0$ 个位置, 即系统中有一个宽带用户业务结束. 由上述可知, $\pi_{f|k,l}$ 可以通过递推关系 $\pi_{f|k,l} = \frac{d}{\alpha_{k,l} + d} + \frac{(M-kb_0)u + ld}{\alpha_{k,l} + d} \pi_{f|k,l-1} + \frac{kvb_0}{\alpha_{k,l} + d} \pi_{f|k-1,l-b_0}$ 获得.

由上述可得系统总吞吐量 T_s 的计算公式为:

$$T_s = \lambda_{\text{no}}(1 - P_{\text{no}}) + \lambda_{\text{wo}}(1 - P_{\text{wo}}) + \lambda_{\text{wh}}(1 - P_{\text{wh}}) + \lambda_{\text{nh}}(1 - P_{\text{nh}}). \quad (6)$$

3 性能比较与分析

为分析比较系统的性能, 设置系统参数如下: $M = 100$, $b = 13$, $b_0 = 3$, 低优先级宽带用户到达率 $\lambda_{\text{wo}} = 1.0 \sim 3.0$, 低优先级窄带用户的到达率 $\lambda_{\text{no}} = 1.0$, 高优先级用户的到达率为总用户到达率的25%, b_1 分别取7、8、9, $\mu^{-1} = v^{-1} = 30$ s, $d^{-1} = 3$ s, $N = 6$.

图1为用户的到达率和系统的保护阈值对高优先级窄带用户和宽带用户阻塞概率的影响. 由图1可以看出, 高优先级窄带用户和宽带用户的阻塞概率随低优先级宽带用户的到达率的增加而增加, 这说明接入到系统的低优先级宽带用户过多会导致系统的拥挤. 另外, 高优先级用户的阻塞概率随阈值 b_1 的增加而降低, 这说明阈值 b_1 越大, 系统调用给高优先级用户的资源块数量越多, 从而可提高切换成功率. 对比图1(a)和图1(b)还可知, 当低优先级宽带用户的到达率相同时, 高优先级窄带用户的阻塞概率低于高优先级宽带用户的阻塞概率, 这说明此时窄带用户所需调用的资源块数量少于宽带用户, 因此其可调用资源块的机会相对更多.

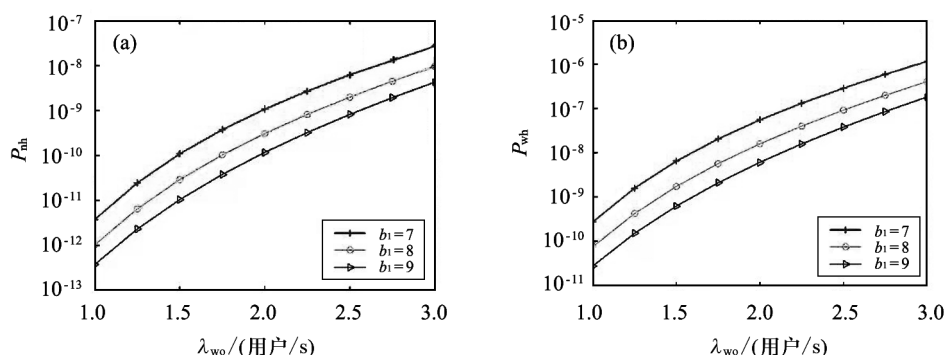


图1 到达率和阈值对高优先级窄带用户(a)和宽带用户(b)阻塞概率的影响

图2为高优先级用户在本文方案和无用户优先级方案下的阻塞概率. 由图2可以看出, 本文方案中, 高优先级窄带用户和宽带用户的阻塞概率随低优先级宽带用户到达率的增加而增加, 同时阻塞概率低于无用户优先级方案. 这说明本文方案可更好地调用系统的资源块数量, 进而可提高高优先级用户的切换成功率.

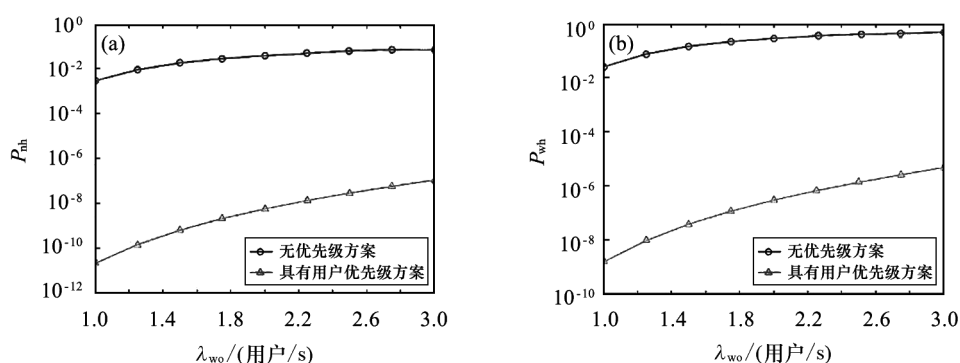


图 2 不同方案对高优先级窄带用户(a)和宽带用户(b)阻塞概率的影响

图 3 为本文方案和无用户优先级方案对低优先级用户阻塞概率的影响. 由图 3 可以看出: 本文方案中低优先级用户的阻塞概率随宽带用户到达率的增加而增加; 在宽带用户到达率 $\lambda_{wb} < 1.8$ 时, 低优先级用户的阻塞概率低于无用户优先级方案的阻塞概率; 当低优先级宽带用户到达率 $\lambda_{wb} > 1.8$ 时, 本文方案的低优先级用户的阻塞概率高于无用户优先级方案的阻塞概率. 上述说明, 当系统中的宽带用户的到达率增加时, 系统可调用的资源块数量逐渐减少, 进而使低优先级窄带用户的阻塞概率高于无用户优先级方案的阻塞概率.

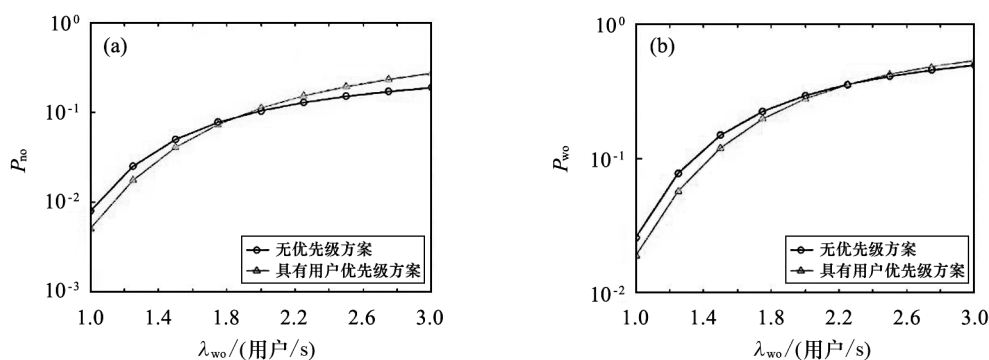


图 3 不同方案对低优先级窄带用户(a)和宽带用户(b)阻塞概率的影响

图 4 为本文方案和无用户优先级方案对系统总吞吐量的影响. 由图 4 可以看出, 吞吐量随宽带用户到达率的增加而增加, 且本文方案的总吞吐量高于无用户优先级方案的总吞吐量.

4 结论

研究表明, 本文方案的总吞吐量和切换成功率显著优于无用户优先级的载波聚合资源分配方案, 因此本文方案在使用载波聚合技术的无线网络中具有良好的应用价值. 在后续的工作中, 我们将探讨在不同的环境下如何选择系统的最佳阈值, 以使系统能够根据具体的情况动态地调整传输效率, 进而更好地提高系统的传输效率.

参考文献:

- [1] LEE H, VAHID S, MOESSNER K. A survey of radio resource management for spectrum aggregation in LTE-advanced[J]. Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(2): 745-760.
- [2] 刘英男, 张涛, 王伟. 5G NR 载波聚合部署方案研究[J]. 邮电设计技术, 2021(4): 50-53.
- [3] WEI X, KAN Z, SHEN X S. 5G mobile communications[M]. Switzerland: Springer, 2016: 4-40.

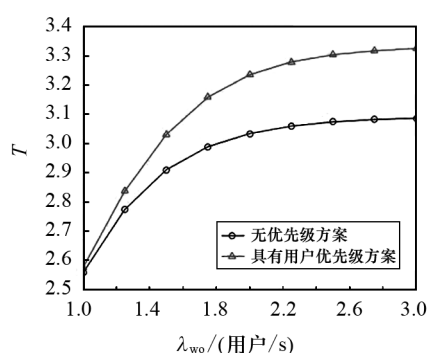


图 4 不同方案对系统总吞吐量的影响

- [4] 祝端. LTE-A 系统中基于载波聚合的资源分配技术[D]. 北京:北京邮电大学,2017:11-19.
- [5] KIM H, LEE H, AHN M, et al. Joint subcarrier and power allocation methods in full duplex wireless powered communication networks for OFDM systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(7): 4745-4753.
- [6] ZHANG J, MENG L L, JI H. Joint cell association and user scheduling in carrier aggregated heterogeneous networks[J]. Information, 2018, 9(1): 1-7.
- [7] ABDELMULA H S B, WARIP M N, LYNN O B, et al. QoS based independent carrier scheduling scheme for heterogeneous services in 5G LTE-advanced networks[C]//International Conference of Reliable Information and Communication Technology. Cham: Springer, 2018: 464-476.
- [8] LEE S B, CHOUDHURY S, KHOSHNEVIS A, et al. Downlink MIMO with frequency-domain packet scheduling for 3GPP LTE[C]//IEEE INFOCOM 2009, Rio de Janeiro: IEEE, 2009: 1269-1277.
- [9] TAKEDA K, NAGATA S, KISHIYAMA Y, et al. Effects of wideband scheduling and radio resource assignment in OFDMA radio access for LTE-advanced downlink[C]//2009 IEEE 70th Vehicular Technology Conference Fall. Anchorage: IEEE, 2009: 1-5.
- [10] LIAO H S, CHEN P Y, CHEN W T. An efficient downlink radio resource allocation with carrier aggregation in LTE-advanced networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2014, 13(10): 2229-2239.
- [11] KIM J C, PAK J H, NAM C S, et al. A study on the resource block allocation method to enhance the total energy efficiency for LTE-A networks[J]. Wireless Personal Communications, 2021, 123(3): 2679-2697.

~~~~~  
(上接第 121 页)

有利于食饵种群密度的增加. 当  $0 < m < \frac{1}{2} - \frac{d}{c\beta - ad}$  时, 由  $\frac{dy^*}{dm} > 0$  可知  $y^*$  是关于  $m$  的递增函数, 这表明此时食饵避难所有利于捕食者种群密度的增加; 当  $\frac{1}{2} - \frac{d}{c\gamma - ad} < m < 1 - \frac{d}{c\beta - ad}$  时, 由  $\frac{dy^*}{dm} < 0$  可知  $y^*$  是关于  $m$  的递减函数, 这表明此时食饵避难所不利于捕食者种群密度的增加. 当  $m = \frac{1}{2} - \frac{d}{c\beta - ad}$  时, 由上述和  $\frac{dy^*}{dm} = 0$  可知, 此时捕食者种群密度达到最大. 由于正平衡点是全局稳定的, 所以可知当  $m = \frac{1}{2} - \frac{d}{c\beta - ad}$  时, 食饵种群密度不会无限增大, 捕食者种群密度也不会绝灭.

## 参考文献:

- [1] CHEN L J, CHEN F D, CHEN L J. Qualitative analysis of a predator-prey model with Holling type II functional response incorporating a constant prey refuge[J]. Nonlinear Analysis: Real World Applications, 2010, 11: 246-252.
- [2] WANG X, ZANETTE L, ZOU X. Modelling the fear effect in predator-prey interactions[J]. Journal of Mathematical Biology, 2016, 73(5): 1179-1204.
- [3] 刘英姿, 李忠, 何梦昕. 具有恐惧效应和食饵避难所的 Leslie-Gower 捕食者-食饵模型的动力学分析[J]. 延边大学学报(自然科学版), 2022, 2(6): 112-117.
- [4] WANG X Q, TAN Y P, CAI Y L, et al. Impact of the fear effect on the stability and bifurcation of a Leslie-Gower predator-prey model[J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2020, 30(14): 205-210.
- [5] ZHANG H S, CAI Y L, FU S M, et al. Impact of the fear effect in a prey-predator model incorporating a prey refuge[J]. App Math Comput, 2019, 356: 328-337.
- [6] UPADHYAY R, MISHRA S. Population dynamic consequences of fearful prey in a spatiotemporal predator-prey system[J]. Math Biosci Eng, 2018, 16(1): 338-372.
- [7] WANG J, CAI Y L, FU S M, et al. The effect of the fear factor on the dynamics of a predator-prey model incorporating the prey refuge[J]. Chaos, 2019, 29(8): 83-109.
- [8] LI Y, HE M, LI Z. Dynamics of a ratio-dependent Leslie-Gower predator-prey model with Allee effect and fear effect[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2022, 32(6): 2250082.
- [9] 马知恩, 周义仓, 李承治. 常微分方程定性稳定性方法[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 182-183.
- [10] MEISS J D. Differential dynamical systems[M]. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2007.