

# 基于能效的异构无线网络资源分配 与切换调度机制研究

毛莉君, 张 彦

(西安培华学院, 西安 710125)

**摘要:** 为了能够有效提高系统的能效, 文章对基于能效的异构无线网络资源分配与切换调度机制进行研究, 提出了 JSRA 算法, 该算法结合了集中式用户切换角调度算法 (CUSA) 及能效资源分配算法 (BCSA); 通过微基站睡眠集中式的切换调度算法 (CUSA), 确定用户关联基站, 最终实现用户微基站与宏基站的之间的切换, 之后基站使用以最优信道质量子载波分配调整算法 (BCSA) 实现用户传输功率及子载波的分配, 使网络能够接近于最优解; 最后, 通过 SimuWorks 仿真软件创建为网路场景, 在仿真过程中设置 7 个宏基站, 通过 JSRA 算法与其他 3 种算法的对比, 得出如下结果: JSRA 算法能够有效降低网络功能消耗, 提高异构无线网络的网络能效, 提高网络速度。

**关键词:** 能效; 资源分配; 切换调度; 异构网络

## Research on Heterogeneous Wireless Networks of Resource Allocation and Switching Scheduling Mechanism Based on Energy Efficiency

Mao Lijun, Zhang Yan

(Xi'an Peihua University, Xi'an 710125, China)

**Abstract:** In order to effectively improve the energy efficiency of the system, this paper studies the resource allocation and handover scheduling mechanism based on energy efficiency in heterogeneous wireless networks. The JSRA algorithm is proposed. This algorithm combines centralized user handover angle scheduling algorithm (CUSA) and Energy Efficiency Resource Allocation Algorithm (BCSA). The base station uses the optimal channel quality subcarrier allocation adjustment algorithm (BCSA) to achieve the handover between the user micro base station and the macro base station by determining the user-related base station through the CUSA of the micro base station sleep-centered sleep switching scheduling algorithm (CUSA) User transmission power and subcarrier allocation, the network can be close to the optimal solution. Finally, SimuWorks simulation software is used to create a network scenario. Seven macro base stations are set up during the simulation. By comparing the JSRA algorithm with the other three algorithms, the following results are obtained: The JSRA algorithm can effectively reduce the network consumption and increase the difference Network wireless network energy efficiency, improve network speed.

**Keywords:** energy efficiency; resource allocation; switch scheduling; heterogeneous networks

## 0 引言

在现代无线通信技术不断发展过程中, 传输方面对于全新的无线设备的需求在不断的提高, 人们也对于此方面进行了有效的研究。在用户对于吞吐量及峰值流量需求不断提高的过程中, 其能量负担也在不断的提高, 并且用户对于传输速率要求也越来越高, 从而导致大量能量在无线网络中消耗<sup>[1]</sup>。能量消耗问题对于运营商及研究人员来说, 实现传统基站的部署不仅经济实惠, 而且还能够实现可持续发展, 从而有效满足用户快速增长的需求。所以, 就出现了异构网络技术。但是异构网络跨层及同层干扰会对异构网络基站部署造成一定的挑战, 还会使异构网络性能进一步的降低。现代在对异构网络资源分配研究过程中, 一般都是利用降低基站发射功率, 从而实现能效的进一步提高, 但是此无法满足实际需求<sup>[2]</sup>。所以, 本文就

对基于能效的资源分配和切换调度进行研究, 从而提出满足实际的异构网络能效分配算法。

## 1 异构网络的资源分配技术

### 1.1 Femtocell 技术

无线通信对于高速率无止境追求, 并且在现代智能技术及通信技术不断发展过程中, 也在室内实现了数据及语音业务<sup>[3]</sup>。图 1 为 Femtocell 技术的网络结构。

Femtocell 技术也属于家庭基站, 其能够使用户在室内实现数据及语音传输, 其成本较低, 并且功率也较低, 其主要优势为:

- 1) 提高室内的容量和覆盖量;
- 2) 节约成本;
- 3) 提高基站可靠性;
- 4) 提高室内用户数量<sup>[4]</sup>。

### 1.2 OFDMA 无线技术

OFDMA 无线技术属于正交频多址技术, 其能够良好地对多径衰落进行抵御, OFDMA 无线技术的工作原理属于宽频带的多个正交窄带子载波, 其能够组合实现信息传输。

OFDMA 无线技术简单来说就是比 OFDMA 多了一个子信

收稿日期: 2017-08-28; 修回日期: 2017-09-26。

基金项目: 陕西省教育厅 2017 专项科研计划项目 (17JK1059); 西安培华学院校级重点资助项目 (PHKT17015)。

作者简介: 毛莉君 (1978-), 女, 陕西西安人, 硕士生, 讲师, 主要从事模式识别与人工智能、大数据处理、云计算等方向的研究。

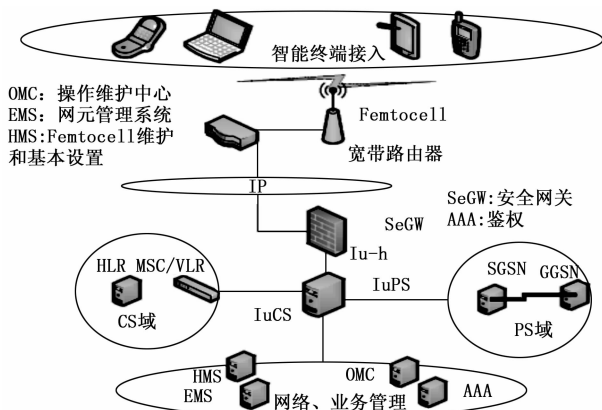


图 1 Femtocell 技术的网络结构

道划分过程，其能够使用子载波正交特性，从而使用用户多址接入，从而便于使用良好信道状态实现数据的传输<sup>[5]</sup>。图 2 为 OFDMA 无线技术典型的蜂窝结构。

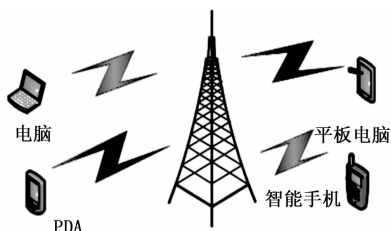


图 2 OFDMA 无线技术典型的蜂窝结构

一种具有代表性的典型的下行 OFDMA 无线网络，包含了  $K$  个用户和一个基站，并且包含  $N$  个子载波。在一个调度周期中，每个子载波只能分配至一个用户，并且每个用户的传输速率都有一个限制，不能无限放大。假如基站调度器完全掌握了在全部  $N$  个子载波上  $K$  个用户的全部信道质量信息 (channel quality information, CQI)，根据能量效率的定义可知：能效为总速率与总消耗功率的比值，也就是网络消耗单位焦耳所传输的比特数量。由此可以得到基于能效的 OFDMA 网络下行资源分配数学模型见公式 (1)：

$$\begin{aligned} \hat{\eta}_{EE} &= \max_{\rho \in \tilde{n}, p \in P} \frac{R_{total}}{p_{total}} = \\ \max_{\rho \in \tilde{n}, p \in P} & \frac{\sum_{k \in K} \sum_{n \in N} \rho_{k,n} W \log_2(1 + p_{k,n} \gamma_{k,n})}{\zeta P + P_c} \quad (1) \\ \text{St} & \\ & \sum_{k \in K} \sum_{n \in N} P_{k,n} = P \leq P_{max} \quad (2) \\ & \sum_{k \in K} \rho_{k,n} = 1, \forall n \in N \quad (3) \\ & \sum_{n \in N} \rho_{k,n} r_{k,n} \geq R_{k,min}, \forall k \in K \quad (4) \end{aligned}$$

式 (1) ~ (4) 中， $\hat{\eta}_{EE}$  是通过资源分配而获得的最大网络能效， $W$ 、 $P_c$  分别为子载波的带宽、基站的静态电路功率； $P$ 、 $\zeta$  分别代表总的传输功率、功率放大器漏极效率的倒数； $\gamma_{k,n}$  代表在子载波  $n$  上用户  $k$  的信道增益噪声比 (Channel-gain-to-Noise Ratio, CNR)。网络的 CQI 可以写成  $CNR = [\gamma_{k,n}]_{K \times N}, k \in K = \{1, 2, 3, \dots, K\}, n \in N = \{1, 2, 3, \dots, N\}, \rho_{k,n} \in \{0, 1\}$  代表子载波  $n$  是否分配给用户  $k$ ，如果分配则  $\rho_{k,n} = 1$ ，如果不分配则  $\rho_{k,n} = 0$ ，子载波分配矩阵和功率分配矩阵表

示为：

$$\rho \in \tilde{n} = \left\{ [\rho_{k,n}]_{K \times N} \mid \begin{aligned} & \rho_{k,n} \in \{0, 1\}, \forall k \in K, \forall n \in N \\ & \sum_{k \in K} \rho_{k,n} \leq 1, \forall n \in N \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$P \in P = \left\{ [P_{k,n}]_{K \times N} \mid \begin{aligned} & p_{k,n} \geq 0, \forall k \in K, \forall n \in N \\ & \sum_{k \in K} \sum_{n \in N} P_{k,n} = P \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

## 2 模型的创建

本文充分考虑资源分配和切换调度机制两层网络环境，创建异构网络的拓扑结构，本文仿真的场景设置主要包括 3 个校区网络结构，其中的每个小区都具有基站及簇，本文设置基站使用共频谱方案，并且使用全频率复用方式，并且设置在相同簇中不存在干扰。在网络簇都具有 12 个用户，每个基站中有 36 个用户，簇为了能够实现开放式的接入，每个基站中的用户都能够实现基站的接入<sup>[6]</sup>。异构网络的拓扑结构包括普通节点、中心节点及地面网络监控台，普通节点采集的信息汇集到中心节点，然后再由中心节点传输至地面网络监控台。

本文思路就是在资源分配及切换调度机制两层异构网络链路中，对于全网能量效率全面考虑实际功率模型及干扰限制，实现功率及子信道的联合式资源分配，并且使用相应的算法实现资源分配方案的优化<sup>[7]</sup>，图 5 为基于能源资源分配及切换调度机制的算法流程，此流程通过 SimuWorks 仿真软件进行设计，之后根据不同算法实现性能仿真。基于能源资源分配及切换调度机制的算法流程具体如下：开始之后，根据静态分簇建立系统模型，然后获得相关参数，计算 MUE 跨层干扰、FUE 跨层干扰，获得资源优化方案及存在的问题，采用 NSGA-II 软件进行最优化联合资源分配方案求解，求解之后结束。

通过全面的分析，本文就以资源分配及切换调度进行仿真分析，得到限制条件及系统参数。并且基于此模型，利用仿真分析实现算法种群规律及迭代次数的确定，从而提高收敛值，利用算法对比实现算法性能的验证，然后设置算法参数，从而实现系统的全面仿真分析<sup>[8]</sup>。

## 3 基于能效切换调度的机制

异构网络中的微基站睡眠能够有效节约网络能源消耗，并且还能够实现网络能源消耗的最优。集中式用户切换角调度 (CUSA) 算法能够利用宏基站信息的收集，实现微基站和覆盖范围中睡眠的判决条件，以判决条件及微基站的状态实现正常及睡眠模式的转换，从而实现数学分析。图 3 为微基站和单一宏基站的场景。

微基站和宏基站的网络功能消耗通过相应转换为：

$$\begin{aligned} P_{mic}^{mic} &= P_{static}^{mac} + P_{static}^{mic} + \sum_{k \in mac} \sum_{n \in N} p_{k,n}^{mac} p_{k,n}^{mic} + \\ & \sum_{k \in mac} \sum_{n \in N} p_{k,n}^{mic} p_{k,n}^{mic} \quad (7) \end{aligned}$$

微基站睡眠能够实现网络功率开销的降低，要不然就无法使微基站睡眠，那么就表示微基站已经是睡眠，而且  $P_{mac} > P_{mic}^{mic}$ ，将微基站唤醒就能够实现网络功率开销的降低<sup>[9]</sup>。微基站在睡眠和正常模式中的功率消耗差值为：

$$\Delta P = P_{mac} - P_{mic}^{mic} \quad (8)$$

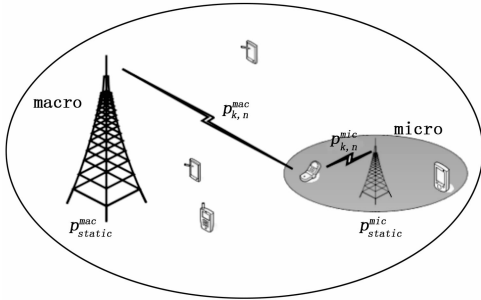


图 3 微基站和单一宏基站的场景

$\Delta P$  能够使微基站用户到宏基站进行借还, 从而降低功能消耗, 其主要包以下情况:

- 1) 在  $\Delta P > 0$  的时候不需要实现微基站睡眠模式的转换;
- 2) 在  $\Delta P$  为 0 的时候, 不需要实现微基站睡眠模式转换, 所以其在睡眠之前和睡眠之后的网络功耗相同, 而且在实际网络中, 基站在进行模式转换过程中具有一定的功耗;
- 3) 在  $\Delta P < 0$  的时候, 就要视线微基站睡眠模式的转换, 所以微基站睡眠之后就会降低网络功耗<sup>[10]</sup>。为了能够避免  $\Delta P$  在 0 周围摆动之后就会频繁切换模式, 并且还能够实现网络功耗的节约, 此时必须为  $\Delta P$  增加阈值增量, 由于在进行模式转换过程中微基站会产生额外的功耗, 因此,  $\Delta P$  中必须增加微基站的模式转换过程中产生的额外平均功率, 也就是  $\Delta P = \Delta P + P_{trans}$ 。从用户角度来说, 由宏基站根据计算得到的  $\Delta P$  确定用户所要切换的基站, 根据  $\Delta P$  的判断结果, 提出一种 CUSA 算法 (Centralized User Switching scheduling Algorithm, 微基站睡眠的集中式用户切换调度)。

图 4 为基于能效切换调度的算法, 通过 CUSA 算法实现, 在用户初始接入到网络的时候要选择最大信号强度基站接入, 用户能够对基站信道质量信息进行反馈, 然后对反馈信息进行收集, 对宏基站和微基站的关系进行计算。

表 1 为 4 种不同的切换调度算法的计算复杂度对比, 通过表 1 可以看出来, 能效切换调度算法的复杂程度最高, 并且实现起来较为复杂, 所以就要实现全网信息的收集。但是其能够实现调度控制的精度, 还能够有效提高网络的整体能源消耗<sup>[11]</sup>。

表 1 4 种不同的切换调度算法的计算复杂度对比

算法	复杂度
能效切换调度算法	1
用户分类算法	1
基于 RSS 算法	$K_{mac}$
基于 BIAS 算法	$K_{mac} + K_{mic}$

#### 4 基于能效资源分配及切换调度算法

通过以上分析可以看出来, 要想能够有效实现网络能效的最优化近似最优解, 就要实现能效资源分配 (BCSA) 及切换调度的相互结合。切换调度算法无法对基站提供整体资源信息, 但是切换调度算法能够解决以上问题, 还能够实现资源的合理分配<sup>[12]</sup>。

BCSA 算法的主要思想就是基于最大化最小用户能效原则, 该思想得到了 C. Xiong, G. Y. Li, S. Zhang, (2012) 的严

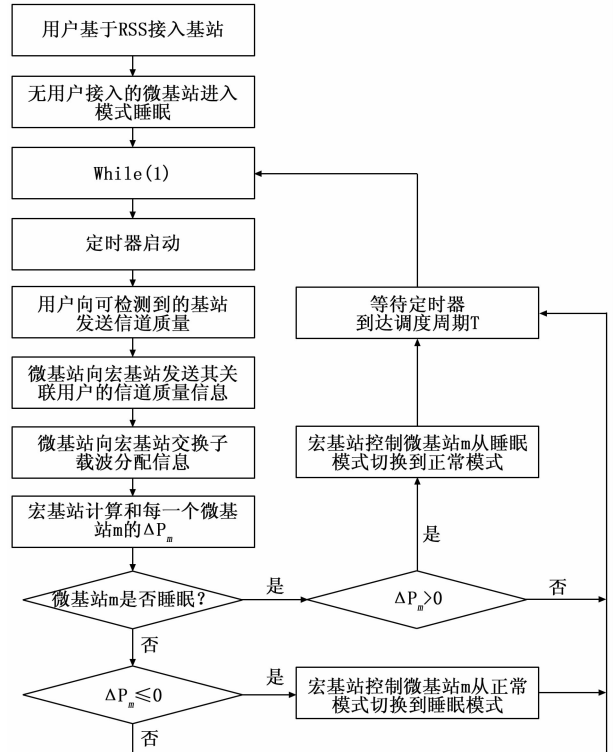


图 4 基于能效切换调度的算法

格的数学推导验证, 只有尽量将最小用户能效最大化, 得到的能效才能在最大程度上接近最优解。一种比较简单的方法就是基于最优信道质量 (Best Channel Quality Indicator, Best CQI) 分配, 将子载波分配给使用该信道质量最好的用户, 这样可以实现无用户 QoS 限制而得到能效最优解, 因此, 需要提出以下命题。

定理 1: 对于最优能效问题, 在不受 QoS 限制下, 最优解为最优信道质量分配子载波而获得的。

证明: 假设基于最优信道质量对子载波进行分配时, 得到子载波分配、能效、功率分配分别为  $\rho_b = [\rho_{k,n}^b]_{K \times N}$ ,  $\eta_b$ ,  $P_b = [P_{k,n}^b]_{K \times N}$ 。令能效分配取得最优解时, 子载波分配、功率分配、总功率、最优能效分别为  $\rho = [\rho_{k,n}]_{K \times N}$ ,  $P = [P_{k,n}]_{K \times N}$ ,  $P = \sum_{k \in K} \sum_{n \in N} P_{k,n}$ ,  $\eta$ , 则  $\eta \geq \eta_b$ 。

假设获得最优解时的子载波分配  $\rho \neq \rho_b$ , 则与 Best CQI 分配相比, 则最少有一个子载波将它分配给不同的用户, 将这些分配给不同用户的子载波集合命名为  $N_0$ 。

对  $\forall n \in N_0$ ,  $\rho_{k1,n} = 1$ ,  $\rho_{k2,n}^b = 1$ , 有  $\gamma_{k2,n} \geq \gamma_{k1,n}$ , 则

$$\sum_{k \in K} \sum_{n \in N_0} \rho_{k,n} W \log_2(1 + p_{k,n} \gamma_{k,n}) \leq \sum_{k \in K} \sum_{n \in N_0} \rho_{k,n}^b W \log_2(1 + p_{k,n} \gamma_{k,n}) \quad (9)$$

$\forall n \in (N - N_0)$ ,  $\rho_{k1,n} = \rho_{k2,n}^b = 1$ , 则

$$\sum_{k \in K} \sum_{n \in (N - N_0)} \rho_{k,n} W \log_2(1 + p_{k,n} \gamma_{k,n}) = \sum_{k \in K} \sum_{n \in (N - N_0)} \rho_{k,n}^b W \log_2(1 + p_{k,n} \gamma_{k,n}) \quad (10)$$

将式 (9) 和 (10) 相加:

$$\sum_{k \in K} \sum_{n \in N} \rho_{k,n} W \log_2(1 + p_{k,n} \gamma_{k,n}) \leq \sum_{k \in K} \sum_{n \in N} \rho_{k,n}^b W \log_2(1 + p_{k,n} \gamma_{k,n}) \quad (11)$$

将式 (11) 两边同时除以  $\zeta P + P_c$  :

$$\frac{\sum_{k \in K} \sum_{n \in N} \rho_{k,n} W \log_2(1 + p_{k,n} \gamma_{k,n})}{\zeta P + P_c} \leq \frac{\sum_{k \in K} \sum_{n \in N} \rho_{k,n}^b W \log_2(1 + p_{k,n} \gamma_{k,n})}{\zeta P + P_c} \quad (12)$$

$$\eta \leq \frac{\sum_{k \in K} \sum_{n \in N} \rho_{k,n}^b W \log_2(1 + p_{k,n} \gamma_{k,n})}{\zeta P + P_c} = \eta_0$$

$\eta_0$  的物理意义是对最优解的子载波分配进行调整, 使其调整成为  $\rho_0$ , 同时保证分配的传输功率不变, 这和  $\eta \geq \eta_i$  相互矛盾, 因此  $\rho = \rho_0$ 。

图 5 为基于能效资源分配及切换调度算法的流程, 通过 BCSA 算法实现, 宏基站实现用户信道质量信息的反馈然后通过微基站实现用户切换调度策略的控制, 从而分配传输功率及子载波。

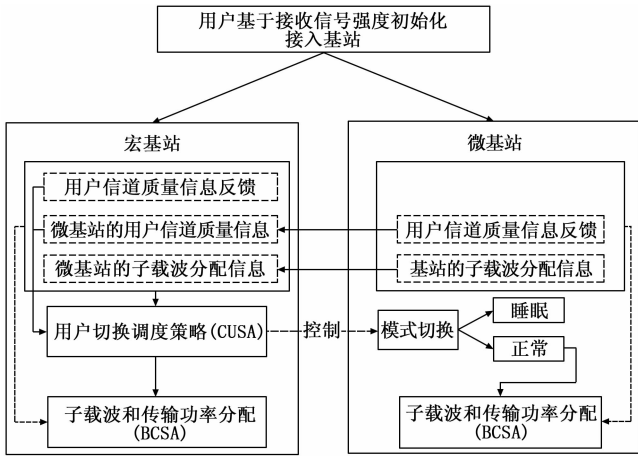


图 5 基于能效资源分配及切换调度算法的流程

其主要步骤为:

- 1) 实现初始接入用户的确定, 宏基站为正常工作;
- 2) 实现用户信道质量信息的周期性收集, 包括微基站用户信道的质量信息;
- 3) 以收集用户信道质量信息为基础, 对宏基站和微基站  $\Delta P$  进行计算, 如果其小于等于 0, 那么微基站工作正常, 对微基站进行控制, 使其能够睡眠。如果其大于 0, 那么微基站就为睡眠模式, 就要将其唤醒;
- 4) 以服务小区用户信道质量信息为基础, 使用此算法实现传输功率及子载波的分配<sup>[13]</sup>。

在对算法分析过程中, 实现最优化问题的分解, 使其成为资源分配及切换调度两个问题, 从而相互结合得到 JSRA 算法, 其能够实现以上问题的有效解决。图 6 为微基站的算法流程, 通过 BCSA 算法实现, 首先确定初始接入用户, 然后对用户信道质量信息反馈进行收集, 通过收集的信息对宏基站和每个微基站的值进行计算, 以服务小区用户信道质量实现信息的分配, 最后使用 BCSA 算法分配传输功率及子载波。

本文所研究算法复杂度比其他算法要高, 但是从整体还是要全面考虑节约网络能源消耗<sup>[14]</sup>。

### 5 算法的仿真分析

通过仿真软件创建为网路场景, 之后实现算法的对比仿

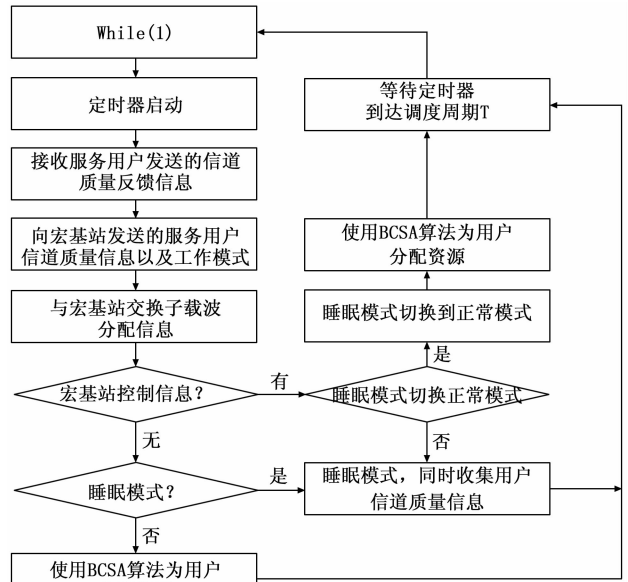


图 6 微基站的算法流程

真。在仿真过程中设置 7 个宏基站, 每个宏基站小区中包括 6 个微基站, 在宏基站的覆盖范围中均匀部署, 用户随机的进行分布<sup>[15]</sup>, 图 11 为资源分配和切换调度的联合算法对比。表 2 为系统的仿真参数。将网络能量效率作为优化模型, 通过 JSRA 算法实现优化子信道及功率。在通过 JSRA 算法求解最优问题近似解的过程中, 种群规模及迭代次数对算法复杂程度具有密切的联系。

表 2 系统的仿真参数

参数	取值	含义
$J$	3	基站数量
$L$	18	Femtocell 数量
$N$	60	子信道的数量
$B$	10	系统的总带宽
$\alpha$	3.8	基站路径的损耗因子
$P_{TM}$	45dBm	最大的发射功率

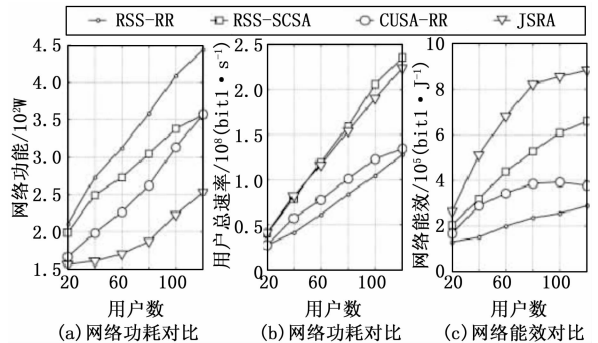


图 7 资源分配和切换调度的联合算法对比

通过图 7 可以看出来, 本文所研究的基于能效资源分配及切换调度机制的算法能够有效提高网络能效, 并且降低网络功耗, 提高用户在使用过程中的总体速率性能<sup>[16]</sup>。

### 6 结束语

本文提出的基于能效资源分配及切换调度的算法能够满足

现代异构网络环境需求, 并且还实现了两者联合的两层异构网络系统的模型, 利用仿真实现合理算法参数的仿真, 最后利用参数的设置实现本文所提出算法的仿真分析。通过仿真结果可以看出来, 本文提出的算法能够降低能源消耗, 提高用户性能。

#### 参考文献:

- [1] 邱畅啸, 冷甦鹏, 叶宇. 基于能效的异构无线网络联合切换度和资源分配算法 [J]. 计算机应用, 2015, 35 (6): 1505 - 1508.
- [2] 胡莹. 宽带无线通信系统中基于跨层设计和能效优化的资源分配方案研究 [D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [3] 钱进, 王孝, 郭士增. 基于能效优化的异构网络资源分配算法设计 [J]. 通信技术, 2016, 49 (2): 199 - 204.
- [4] 邱畅啸. 异构网络下基于能效的资源分配和切换调度机制研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [5] 冯立, 邝育军, 代泽洋, 等. 异构认知网中基于能效的协作技术研究 [J]. 电子科技大学学报, 2017, 46 (5).
- [6] 陈卓. 异构网络中基于 D2D 中继协作的干扰管理及负载均衡策略研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [7] 张国翊. 异构融合网络环境下基于认知的资源管理方法研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2011.

- [8] 李云, 王俊伟, 赵为粮, 等. 基于基站密度和业务负载的异构蜂窝网络能效优化 [J]. 电子与信息学报, 2017, 39 (4): 854 - 859.
- [9] 刘强, 李少谦, 武刚. 基于控制数据分离架构的 H-CRAN 异构前传形式下的能效资源分配 [J]. 中国科技论文在线, 2015.
- [10] 唐春菊. 基于能效和异构服务的密集家庭小区资源分配 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017, 15 (2): 223 - 229.
- [11] Cui Q M, Cui Z Y, Zheng W, 等. 基于能效的密集异构蜂窝网络部署研究 [J]. Science China Information Sciences, 2017, 60 (4): 042303.
- [12] 陶洋, 赵芳金, 王振宇, 等. 异构网络中的并行传输能效模型 [J]. 计算机工程与设计, 2017 (10): 2605 - 2610.
- [13] 蒋乔朋, 齐丽娜. 异构蜂窝网络中面向能效的基站协作方案 [J]. 南京邮电大学学报 (自然科学版), 2017, 37 (3): 78 - 82.
- [14] 秦爽, 刘齐美, 冯钢. 异构网络中高效动态流量卸载 [J]. 中国科技论文, 2014 (10): 1099 - 1104.
- [15] 李新炜. 分层异构网络信息交互效率优化仿真研究 [J]. 计算机仿真, 2017, 34 (1): 276 - 279.
- [16] 吴俊. 分层异构无线网络中高效协同通信技术的分析 [J]. 数字通信世界, 2016 (8).

(上接第 230 页)

气浮台试验中, 台上台一般的数据传输使用无线形式, 在不能避免有线连接时, 导线若悬挂于气浮台转动轴中心并自由下垂, 则系统平衡时, 台面转角微小, 导线不会因扭曲产生扭矩; 另外, 在试验前的气浮台调平衡阶段, 亦可找到台体的平衡位置, 若将此位置设为姿态控制零位, 导线线束扭力、设备风扇气流、台体转轴与地面不垂直等因素引入的总外干扰力矩之和基本为零, 采取此种综合控制方法可保证在姿态零位附近外干扰力矩足够小, 不至对标定结果带来影响。

#### 3.4 参试部组件安装误差影响

载荷运动机构及各参试部组件在气浮台上的安装精度由安装支架的平行度、垂直度等指标要求进行约束, 快速响应飞轮补偿力矩方向与干扰力矩反方向最大的交角容易控制在  $\theta = 0.1^\circ$  以内, 如图 6 所示。其中  $T_f$  为干扰力矩的负力矩,  $T_b$  为补偿力矩,  $\Delta T$  为补偿后的残余力矩。

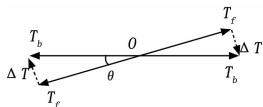


图 6 干扰力矩与补偿力矩不共轴示意图

按照此类载荷最大的干扰力矩 1 Nm,  $0.1^\circ$  的偏差角计算, 补偿后残余的干扰力矩为 0.001 Nm, 对常规卫星的主惯量轴的角速度影响小于  $1 \times 10^{-5} / \text{s}$ 。

根据上述分析, 使用单轴气浮台开展载荷干扰力矩的标定试验, 对由于地面测试设备、系统或者外界环境引起的误差可以接受, 对于主惯量轴在  $5\,000 \text{ kgm}^2$  左右的卫星, 使用该方法确定的标定参数, 在轨引起附加的姿态稳定度控制偏差在  $2 \times 10^{-5} / \text{s}$  范围内, 满足姿态稳定度控制指标在  $10^{-4} / \text{s}$  左右卫星开展载荷运动干扰力矩的地面精确标定工作的需要。

## 4 结束语

本文介绍了星载大惯量扫描镜往复运动所产生干扰力矩的一种实验室精确标定方法, 考虑了地面实验室环境显著不同于在轨环境, 存在诸多影响的实际情况, 并对使用该方法引入的误差对标定结果及其精度的影响进行了分析。结果表明, 该方法拓宽了使用单轴气浮台测定星载活动部件干扰力矩的适用范围, 提高了标定精度, 为干扰力矩补偿方案设计、参数装订及其试验验证提供了有效的数据支撑。

#### 参考文献:

- [1] 于哲峰, 杨智春. 扫描镜运动对三轴稳定卫星姿态影响研究 [J]. 西北工业大学学报, 2003, 21 (1): 87 - 90.
- [2] 刘军, 韩潮, 张伟. 星上转动部件对卫星姿态的影响分析及补偿控制 [J]. 上海航天, 2006, 23 (6): 22 - 26.
- [3] 王涛, 李顺利, 张卓, 等. 预警卫星前馈 +  $H_\infty$  回路成型复合控制 [J]. 上海航天, 2013, 30 (1): 24 - 29.
- [4] 彭真, 周志成. 预警卫星前馈复合控制研究 [J]. 航天器工程, 2009, 18 (3): 21 - 28.
- [5] Yamada K, Yonechi H, Wakao M, et al. Adaptive attitude control of the data relay test satellite [R]. 21st AIAA International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC) and Exhibit, Yokohama, Japan, 2003: 15 - 19.
- [6] 俞洁, 廖瑛, 刘伟. 高精度遥感卫星力矩补偿技术 [J]. 上海航天, 2011, 28 (1): 12 - 17.
- [7] 李季苏, 牟小刚, 张锦江, 等. 气浮台在卫星控制系统仿真中的应用 [J]. 航天控制, 2008, 26 (5): 64 - 68.
- [8] 向东, 杨庆俊, 包钢, 等. 三轴气浮台常值干扰力矩的分析与补偿 [J]. 宇航学报, 2009, 30 (2): 448 - 452.
- [9] 翁艺航, 杨立峰, 薛孝补, 等. 基于三轴气浮台的微波成像仪干扰力矩测量方法研究 [J]. 上海航天, 2015, 32 (2): 59 - 63.
- [10] 杨辉, 洪嘉振, 余征跃. 测量单轴气浮台转动惯量的新方法 [J]. 振动与冲击, 2001, 20 (2): 32 - 34.