

# 一种高能效自适应移动云计算资源发现算法<sup>①</sup>

赵 伟

(第四军医大学 第一附属医院西京医院信息科, 西安 710032)

**摘 要:** 针对移动云计算中资源发现能耗高的问题, 提出了一种自适应、自动切换资源发现模式的高能效资源发现算法. 首先, 为两种主流移动资源发现模式分别建立能耗-资源质量模型; 然后, 利用启发式算法自适应的选择并切换至较低能耗的资源发现模式; 最终, 设备始终处于能耗较低的模式高效的实现资源发现. 实验结果表明, 本算法的能效高于单模式资源发现算法.

**关键词:** 移动云计算; 启发式算法; 资源发现; 能耗-响应质量; 能量效率

## An Consumption Efficient Resource Discovery Approach of Mobile Cloud Computing

ZHAO Wei

(Xijin Hospital, The fourth Military Medical University, Xi'an 710032, China)

**Abstract:** Aimed at the high consumption of the resource discovery of mobile cloud computing, an adaptive and efficient approach which realizes auto switch the mode is proposed. Firstly, the consumption-resource quality model for two popular resource discovery modes is set up. Secondly, a heuristic algorithm to implement the proposal is designed to adaptively switch the mobile mode to low consumption mode. Finally, mobile devices work under the lower consumption mode all the time. Extensive simulations prove that the proposal has better consumption performance than the approach which works under single mode.

**Key words:** mobile cloud computing; heuristic algorithm; resource discovery; consumption-resource quality; energy efficiency

移动云计算<sup>[1]</sup>(MCC)将移动互联网与云计算技术结合, 传统移动云计算架构为客户端-服务器架构<sup>[2]</sup>, 服务端的云(数据中心)为移动设备提供强大的资源管理与服务(软件、平台、基础设施等)从而帮助移动设备提高其处理能力, 其架构如图 1 所示. 随着智能手机与平板电脑计算能力增强及资源愈发丰富, 导致客户端-服务器架构出现两点不足: (1)移动设备的资源未被充分利用; (2)云与移动设备相距较远而导致时延较长. 为了解决以上不足, 出现了协作移动云计算: 通过无线网络实现移动设备间自主资源共享, 实现小范围但高吞吐量的局部数据通信. 协作移动云已成为移动云计算的主要研究方向, 亦称雾计算<sup>[3]</sup>, 如图 1 所示.

资源发现是云计算的重要技术之一, 已有的网络资源发现策略大多基于单一网络<sup>[4-6]</sup>. 资源发现需消耗

大量能量, 而移动设备的能量资源有限, 因此提高资源发现的能效成为研究重点. 文献[7]通过降低网络性能实现低能耗的资源发现策略; 文献[8]通过限制资源发现过程广播的跳数, 提高了 ad-hoc 网络的能效; 文献[9]提出了利用分布式哈希表的点对点资源发现协议来提高 ad-hoc 网络的能效; 文献[10]利用历史数据库预测机制实现了 ad-hoc 网络的能耗降低; 文献[11]开发了一种路由协议提高了移动云计算的能效; 文献[12]提出了通过动态路由资源信息降低冗余路由信息, 从而提高能效的方案.

以上算法均具有两点不足: 1)通过牺牲其他网络性能参数(如响应的准确率或覆盖率)来提高能效; 2)仅针对单一网络类型(3G、WLAN、WSN 等)实现能效提高.

基于此, 本文提出了自适应自动转换模式的高能

<sup>①</sup> 收稿时间:2015-06-18;收到修改稿时间:2015-08-10

效资源发现算法. 本算法自动检测所处网络环境并自适应的转换资源发现模式(中心化模式与洪泛模式), 从而提高了能效. 本文具有三个贡献: 1) 本文第一次提出无线网络自适应自动切换模式的资源发现算法; 2) 建立了移动云计算能效-资源质量的模型; 3) 提出了一种高效的启发式模式切换算法.



图 1 协作 MCC 架构

### 1 系统模型

假设系统为异构无线网络, 其包含 3G 蜂窝网络与 ad-hoc WLAN 网络, 如图 2 所示. 两种无线网络下资源共享方式分别为: 1) 3G 蜂窝网: 中央资源代理 (CRS) 可与该区域所有节点通信, 从而调度区域内资源分配; 2) ad hoc WLAN: 节点与其周围节点小范围通信, 实现资源共享. 此外, 假设智能手机或移动设备通信能力相同; 假设所有节点均匀分布于目标区域中; 节点既与 3G 网 CRS 共享资源, 也与区域中周围节点经 ad hoc WLAN 实现小范围资源共享.

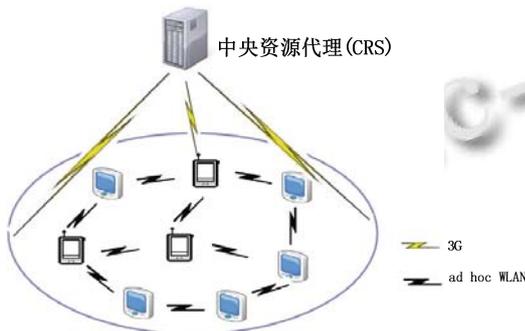


图 2 3G 与 ad hoc WLAN 覆盖的移动云系统架构

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{中心化模式} \\ 0 & \text{泛洪模式} \end{cases} \quad (1)$$

设  $E_i(x_i)$  表示单位时间  $i$  中设备的能耗. 假设设备运行时长为  $Q$ , 那么能效的优化问题变为: 在保证所

获资源质量不低于阈值  $R_{thresh}$  (分布于  $[0,1]$  的一个实数) 的前提下, 从  $Q$  维向量 (共  $2^Q$  个待选方案) 中选择总能耗最小方案.

$$\text{目标方程表示为: } \min \sum_{i=1}^Q E_i(x_i)$$

式中:  $x_i = 0$  或  $1$ ,  $E[RIA] \geq R_{thresh}$ .

## 2 自适应资源发现算法

### 2.1 算法总体策略

数本算法假设移动设备有两种资源发现模式:

1) 中心化模式(3G): 该模式工作于 3G 网络. CRS 维护全网可用资源列表. 节点需新资源时, 检查自身是否有该资源, 如无, 将通过 3G 网络向 CRS 发送请求 (request), CRS 返回含该资源的节点信息.

2) 洪泛模式(WLAN): 该模式工作于 WLAN 网络. 本文采用按需组播洪泛模式, 如节点  $U$  需新资源时, 检查自身是否有该资源, 如无, 将通过 ad hoc WLAN 广播资源请求(request), 其他节点如收到请求并含有该资源, 则返回其节点信息(response). 该模式需设定合适的 time-to-live(TTL)参数来防止网络风暴, 此外, 若节点收到重复请求, 则忽略之.

本资源发现算法通过自适应地切换两种模式来实现能耗最优化, 共包含 4 步:

- 1) 将时间分为连续且相等的单位时间;
- 2) 各节点在每个单位时间结束时将其资源统计信息发送至 CRS;
- 3) CRS 基于统计信息分别估算两种模式下的能耗;
- 4) CRS 选择能效较高的模式, 并通知各节点下个单位时间使用该模式.

### 2.2 资源信息质量参数(RIA)

任务定义为用户占用部分系统资源来实现某种功能. 不同任务所需资源类型不同, 如图像处理需 CPU 和 GPU 资源, 数据传输则需带宽资源, 任务运行将占用资源而任务结束则释放所占资源.

资源信息质量(RIA)是资源发现的重要参数, 表示了 response 的质量, 定义为: response 中所得资源占 request 所需资源的比例. RIA 包括两个参数: 正确率(response 资源是否符合 request)和覆盖率(response 的资源数量是否符合 request). 而维护资源发现的 RIA 参数, 需额外消耗大量能量, 因此需在 RIA 与能效间进

行折衷来降低能耗。

### 2.2.1 中心化模式 RIA

中心化模式下,各节点向 3G 网络 CRS 注册其资源信息,当节点的资源发生变化时,节点应及时发送请求来更新 CRS 中的资源列表。

若仅考虑单一资源,设为 A,表 1 所示为与 A 相关的参数,其中所有参数均针对一个单位时间。

表 1 与资源 A 相关的参数

参数名	意义
S	任务的大小
R	所有节点中 A 资源的总量
T	单位时间的时长
T'	任务运行的时长
N	系统可运行任务的最大数量
$\lambda_A$	需资源 A 的任务总数量
$\lambda_{A-o}$	对资源 A 的请求(request)数量
$F_{A-regist}$	资源 A 的更新次数(期望值)
$F_{regist}$	系统中所有资源的更新次数(期望值)

对于仅需资源 A 的任务,其运行时长为:

$$T' = \frac{S}{R} \quad (2)$$

一个单位时间内能处理该种任务的最大值为:

$$N = \frac{T}{T'} \quad (3)$$

根据  $\lambda_A$  与 N 的关系,一个单位时间的资源更新次数有两种情况:

1)  $\lambda_A > N$ : 该情况下单位时间可处理任务数量受限于 N. 而节点的资源分配和释放均需更新资源信息,因此,  $F_{A-regist}$  可如下计算:

$$F_{A-regist} = 2 \times N = \frac{2 \times R \times T}{S} \quad (4)$$

2)  $\lambda_A \leq N$ : 该情况下单位时间可处理的任务数量由  $\lambda_A$  决定.  $F_{A-regist}$  则可如下计算:

$$F_{A-regist} = 2 \times \lambda_A \quad (5)$$

可得,单位时间内各种资源更新的次数为:

$$F_{regist} = \sum F_{I-regist} \quad (6)$$

式中 I 表示资源的不同种类. 由资源更新次数可计算出中心化模式的资源发现总能耗。

### 2.2.2 洪泛模式 RIA

对于按需洪泛,收到 request 的节点必定知道自身资源情况,因此其 RIA 的正确率为 100%; 然而请求者需设定足够大的 TTL 值以确保所有节点收到该 request,由此方可保证 RIA 的高覆盖率。

定义变量  $P_i$  表示: 当 TTL 值从 i-1 增至 i 时,新增的收到 request 的节点占所有节点的百分比. 例如,图 3 中当 TTL 值从 0 增至 1 时,40% 的新节点将收到请求,因此其  $P_1 = 40%$ . 定义  $P_0 = 1 / N_{node}$ , 表示发送请求的节点所占百分比,  $N_{node}$  是目标区域中节点总数量. 综上,假设 k 表示 TTL 值,以期保证 100% 的 RIA 覆盖率,那么 k 应满足如下方程:

$$\sum_{i=0}^k P_i = 1 \quad (7)$$

式中 k 是满足方程的最小整数值,例如,对于图 3 中拓扑结构,  $P_0 + P_1 + P_2 = 1$ , 所以 k=2. 综上,  $P_i$  值依赖 3 个参数: (1) 节点的通信范围; (2) 目标区域中节点总数量; (3) 目标区域的几何大小. 文献[13]对此进行了详细的描述。

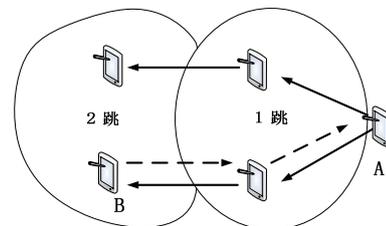


图 3 洪泛模式的 RIA

### 2.3 RIA 与能耗的折衷

#### 2.3.1 中心型模式的折衷方案与阈值

更新 CRS 资源列表需消耗较多能量,因此中心化模式下,通过降低 CRS 资源列表的更新频率来降低能耗。

如图 4 所示,  $t_0$  为上次 CRS 资源列表更新时间,  $t_c$  是节点资源改变时间,而  $t_u$  才是真正此次更新 CRS 的时间,  $t_c$  和  $t_u$  间的 request 将被错误的 CRS 处理。

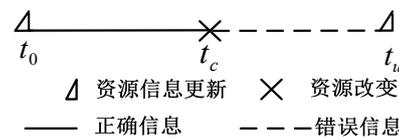


图 4 中心化模式的节能方案

设节点的资源请求为泊松过程,如下定义随机变量 H:

$$H = \begin{cases} 1 & (\text{response right}) \\ 0 & (\text{response error}) \end{cases} \quad (8)$$

因此,一个 request 的期望值 E[H] 如下计算:

$$E[H] = \int_0^{t_0-t_u} f(t) \times E[H | T_{rc} = t] dt \quad (9)$$

式中  $T_{0-u}$  是  $t_0$  至  $t_u$  的时长,  $T_{rc}$  是  $t_c$  的随机变量,  $f(t)$  是  $T_{rc}$  的概率密度函数, 假设 request 泊松过程的到达时间均匀分布于  $T_{0-u}$ . 因此:

$$f(t) = \frac{1}{T_{0-u}} \quad (10)$$

设  $E[H | T_{rc} = t_c]$  表示 H 的期望值, 表示时间  $t_c$  处系统的空闲资源情况. 显然,  $t_0$  至  $t_c$  产生的 response 均为正确信息, 并且期间 request 的到达时间为均匀分布, 那么 H 的期望值可如下计算:

$$E[H | T_{rc} = t_c] = (t_c - t_0) / (t_u - t_0) \quad (11)$$

节点可根据  $t_0$  与  $t_c$  选择合适的  $t_u$ , 从而保持  $E[H | T_{rc} = t_c]$  不变. 令  $\alpha = (t_u - t_c) / (t_c - t_0)$ , 基于式(9)~(11),  $E[H]$  可如下表示:

$$E[H] = E[H | T_{rc} = t_c] \int_0^{T_{0-u}} f(t) dt = \frac{t_c - t_0}{t_u - t_0} \frac{1}{1 + \alpha} \quad (12)$$

调节  $t_u$  来保持  $E[H]$  不低于  $R_{thresh}$ :

$$\alpha \leq \frac{1 - R_{thresh}}{R_{thresh}} \quad (13)$$

更新时间段从  $(t_c - t_0)$  增至  $(t_u - t_0)$ , 因此一个单位时间内更新次数的期望值为:

$$F'_{regist} = F_{regist} \times \frac{t_c - t_0}{t_u - t_0} = \frac{F_{regist}}{1 + \alpha} \quad (14)$$

### 2.3.2 洪泛模式的阈值

TTL 值越大, 资源发现的成功率越大, 但能耗随之增高. 因此该模式下通过降低 TTL 值来节约能耗.

计算方法与式(7)相近, 但仅部分节点需接收请求, 如下表示:

计算方法与式(7)相近, 但仅部分节点( $R_{thresh}$ )需接收请求, 如下表示:

$$\sum_{i=0}^k P_i \geq R_{thresh} \quad (15)$$

式中 k 是满足不等式的最小整数值, 例如: 对于图 3 中的网络结构, 当  $R_{thresh} = 0.5$  时, 因  $P_0 + P_1 = 0.6$ , 所以  $k=1$ .

### 2.4 两种资源发现模式的能耗模型

定义变量  $N_{resp}$  表示 response 的平均数量,  $\lambda_0$  是一个单位时间中所有资源请求的数量.

1) 中心化模式能耗模型(单位时间):

$$E_{central} = (\lambda_0 \times E_{3G-trans}) + (N_{resp} \times \lambda_0 \times E_{3G-recv}) + (F_{regist} \times E_{3G-trans}) \quad (16)$$

式中  $E_{3G-trans}$  和  $E_{3G-recv}$  分别是经 3G 网络发送和接收数据的能耗. 总能耗  $E_{central}$  包括 3 部分: 发送 request 至 CRS 的能耗:  $\lambda_0 \times E_{3G-trans}$ ; 从 CRS 接收 response 的能

耗:  $N_{resp} \times \lambda_0 \times E_{3G-recv}$ ; 发送更新至 CRS 的能耗:  $F_{regist} \times E_{3G-trans}$ .

2) 洪泛模式能耗模型(单位时间):  $N_{reig}$  表示一个节点的单跳通信范围内所含节点数量的期望值:

$$N_{neig} = P_i \times N_{node} \quad (17)$$

资源请求者至提供者的平均跳数(HC)则为:

$$HC = \sum_{i=0}^k P_i \times i \quad (18)$$

$W_{trans}$  和  $W_{recv}$  分别表示经 ad hoc WLAN 网络发送和接收请求所需能耗. 第一次收到 request 的节点中仅  $P_i$  百分比的节点将转发 request, 其中 i 表示跳数且非最后一跳. 转发 request 的能耗是  $(\sum_{i=0}^{k-1} P_i \times N_{node}) \times W_{trans}$ . 所有接收请求所需能耗为  $(\sum_{i=0}^{k-1} P_i \times N_{node} \times N_{neig}) \times W_{recv}$ . 而 response 仅需单播传输, 综上, 转发和接收 response 的能耗为  $N_{resp} \times (W_{trans} + W_{recv}) \times HC$ , 式中 HC 由(18)式推导. 洪泛模式的单个请求的能耗包含以上三部分:

$$E'_{flooding} = \sum_{i=0}^{k-1} P_i \times N_{node} \times W_{trans} + \sum_{i=0}^{k-1} P_i \times N_{node} \times N_{neig} \times W_{recv} + N_{resp} \times (W_{trans} + W_{recv}) \times HC \quad (19)$$

因此, 一个单位时间中所有请求的能耗为:

$$E_{flooding} = \lambda_0 \times E'_{flooding} \quad (20)$$

## 3 启发式自适应资源发现算法

首先定义 3 个统计变量: (1)request 总数量  $\lambda_0$ ; (2)资源更新次数  $F_{regist}$ ; (3)每个 request 所产生 response 的平均数量  $N_{resp}$ .

每个单位时间末端, 所有节点发送以上三个统计量至 CRS. CRS 将收到的各节点统计量(共  $\lambda_0$  个)存入列表. 系统初始化时, 首先检测 NRS 是否变化过大以致难以预测状态, 如果变化次数多于阈值  $N_{trans}$ , 则认为 NRS 为非可预测型, 节点将使用中心化模式直至 NRS 变得稳定. 如果在 large\_diff 中较好模式与较差模式能耗比例低于  $C_{thresh}$ , 则直接选择较好模式. 如果, 以上情况均未满足, CRS 使用  $N_{trend}$  个历史记录的平均值来预测下一单位时间的 NRS. 最终, CRS 选择较低能耗的模式并将决定发送至每个节点. 以下伪代码描述了启发式自适应模式选择算法流程:

### Adaptive Procedure:

Adaptive\_alg ( $N_{slot}, N_{trans}, C_{thresh}, N_{trend}, P_{thresh}$ )

Initialize:

对收到的统计量进行预处理, 并为其创建记录  $r$ ;

将  $r$  插入列表并删除过期记录.

```

Check:
  if(记录中模式转换总次数 >= Ntrans)
  {
    choose 中心化模式;
    goto make_choice;
  }
large_diff:
  if(较好能耗 / 较差能耗 <= Cthresh)
  {
    choose 较好能耗模式;
    goto make_choice;
  }
prediction:
  /* Xi-j 表示第 i 个记录的统计量*/
  λ0 = ∑i=1Ntrend λi-o / Ntrend;
  Fregist = ∑i=1Ntrend Fi-regist / Ntrend;
  Nresp = ∑i=1Ntrend Ni-resp / Ntrend;
  使用 λ0, Fregist, Nresp 来估算能耗.
  if(较好能耗 / 较差能耗 >= Pthresh)
    保持当前模式;
  else
    选择较好模式;
make_choice:
  发送决定至每个节点
    
```

算法的输入参数含义如下:

$N_{slot}$ : 系统运行总时长.

$N_{trans} / N_{slot}$ : 表示 NRS 的稳定度, 当网络变换频繁时, 此判断可防止无意义的 NRS 转换.

$C_{thresh}$ : 两个模式间的差异大于该参数时, 选择低能耗模式.

$N_{trend}$ : 表示 NRS 变换的平滑程度.

$P_{thresh}$ : 两个模式间差异小于该参数时, 不切换 NRS, 从而防止模式转换的能耗大于模式间能耗差异.

## 4 仿真实验与结果分析

### 4.1 实验参数与环境

仿真实验平台为 PC: Intel(R) i5-2450M CPU @2.5GHz, 内存 4GB, Windows 7 操作系统, 基于 Matlab2011Rb 进行仿真实验. 实验中所有节点均匀分布于目标矩形区域, 各节点均具有中心化模式(3G)和洪范模式(ad hoc WLAN)下资源发现能力, 并且 3G 网络与 ad hoc WLAN 网络始终覆盖并工作良好. 假设一个单位时间内: 1)一个单位资源仅可被一个任务占用;

2)所有节点新建任务的概率相同.

统计信息和决定信息大小均设为 0.1KB, 采用文献[14]的实验结果: 3G 网络与 ad hoc WLANs 的能耗比为 20/1.

实验中自适应算法初始化为中心化模式, 两种模式的 RIA 均设为 0.95. 启发式算法初始化参数设为 ( $N_{slot}=5, N_{trans}=3, C_{thresh}=0.5, N_{trend}=2, P_{thresh}=0.9$ ). 部分仿真参数如表 2 所示.

表 2 实验参数及其取值

实验参数	值
矩形区域	1000 × 1000 m
节点数量	100
资源密度, $RES_{dens}$	100%
Ad hoc WLAN 覆盖范围	250 m
3G 发送, $E_{3G-trans}$	20
3G 接收, $E_{3G-recv}$	10
WLAN 发送, $W_{trans}$	1
WLAN 接收, $W_{recv}$	0.5
Request(请求)大小	1 KB
Response 标识信息大小	0.1 KB
统计信息大小	0.1 KB
决定信息大小	0.1KB
决定信息大小	0.1KB
一个单位时间长度	30 秒
每个节点包含资源数量	5

基于表 2 中参数, 对单位时间内单一模式分别做实验, 研究系统能耗与总任务数量的关系. 结果如图 5 所示, 可见中心化模式的能耗随任务数量呈线性增加, 洪泛模式则近似指数增加. 在[0,234)间洪泛模式较节能; 而[234,+∞)中心化模式较节能.

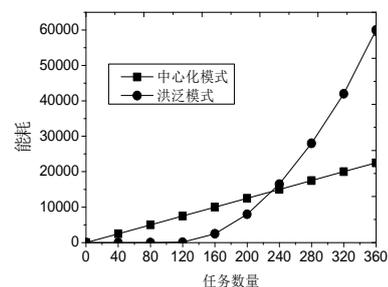


图 5 单一模式下系统能耗与总任务数量的关系

### 4.2 对比实验

将本自适应算法与其他高能效资源发现算法(文献[9]的低功耗协议方案)进行对比实验, 仿真实验参数如表 3 所示, 并设置文献[9]算法的 RIA 为 0.95, 本

算法设置 RIA 期望值为 0.95. 对比实验结果如图 6 所示, 可看出任务总数量低于 480 时, 本算法能效明显优于文献[9]. 原因在于, 文献[9]算法中协议内容的传输需消耗大量能量, 随着任务数量增多, 每个任务所占协议数据的比例将降低, 导致能耗增势变缓. 而目前移动设备的任务有限, 本算法更加有效.

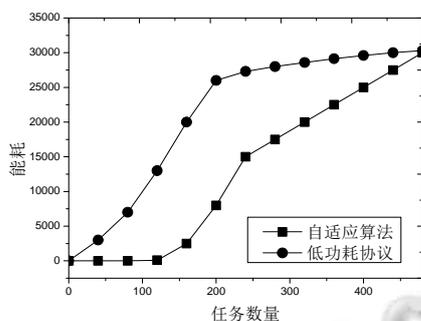


图 6 本算法与文献[9]方案的对比实验结果

### 4.3 启发式算法中参数对性能的影响

基于表 3 的参数进行参数影响实验, 研究与对算法性能的影响. 任务总数量设为 320. 图 1、2 显示了参数对能耗影响的实验结果. 可看出与对自适应算法的能耗有微弱影响, 其影响占总能耗的比例极小. 因此可看出, 以上对比实验结果具有普遍性, 与输入参数无关.

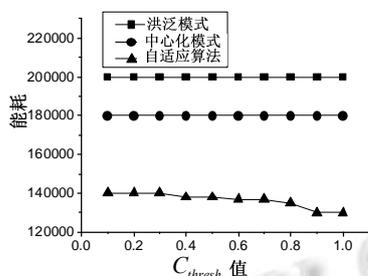


图 7 参数对系统能耗的影响

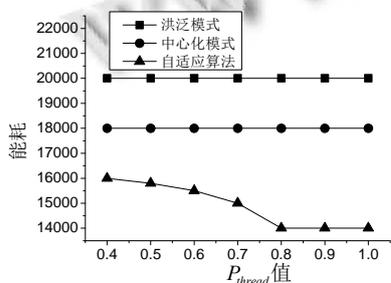


图 8 参数对系统能耗的影响

## 5 结语

本文针对移动云计算网络环境变化的特点, 提出

了一种自适应自动调节资源发现模式的高能效算法. 中心化模式下通过降低 CRS 资源列表的更新频率来降低能耗; 洪泛模式下通过降低 TTL 值来节约能耗. 分别建立了中心化模式与洪泛模式的能耗模型, 并为此开发了启发式模式切换程序. 仿真实验证明相较于单一模式的高能效资源算法, 本算法在资源发现质量相同的前提下, 具有更低的能耗.

### 参考文献

- 1 邓茹月,覃川,谢显中. 移动云计算的应用现状及存在问题分析. 重庆邮电大学学报(自然科学版),2012,24(6):716-723.
- 2 Dinh HT, Lee C, Niyato D, et al. A survey of mobile cloud computing: architecture, applications, and approaches. Wireless Communications and Mobile Computing, 2013, 13(18): 1587-1611.
- 3 Stolfo SJ, Salem MB, Keromytis AD. Fog computing: Mitigating insider data theft attacks in the cloud. Security and Privacy Workshops (SPW), 2012 IEEE Symposium on. IEEE, 2012: 125-128.
- 4 王宏,辛大欣,曹金坤,等. 一种基于 P2P 的非集中式网格资源发现方法. 计算机工程与应用,2009,44(30):96-99.
- 5 曾志,刘仁义,杜震洪,张丰. 云环境下基于 P2P 的动态资源发现机制. 浙江大学学报(理学版),2013,40(4):463-468.
- 6 徐韵洁,冉晓旻. 蚁群算法在网格资源发现中的应用. 计算机应用研究,2013,30(5):1492-1494.
- 7 Mokhtar BS, Kaul A, Georgantas N, et al. Efficient semantic service discovery in pervasive computing environments. Proc. of the ACM/IFIP/USENIX 2006 International Conference on Middleware. Springer-Verlag New York, Inc. 2006. 240-259.
- 8 Safa H, Koteiche Z. Service discovery in mobile ad-hoc networks. Next Generation Mobile Networks and Ubiquitous Computing, 2011: 217.
- 9 Liang JC, Chen JC, Zhang T. An adaptive low-overhead resource discovery protocol for mobile ad-hoc networks. Wireless Networks, 2011, 17(2): 437-452.
- 10 Tchakarov JB, Vaidya NH. Efficient content location in wireless ad hoc networks. Proc. IEEE International Conference on Mobile Data Management, 2004. IEEE. 2004. 74-85.
- 11 Li M, Wang Y, Chen H, et al. Reliable and energy-efficient routing for static wireless ad hoc networks with unreliable

- links. IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems, 2009, 20(10): 1408–1421.
- 12 Lim S, Yu C, Das CR. RandomCast: An energy-efficient communication scheme for mobile ad hoc networks. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2009, 8(8): 1039–1051.
- 13 Vellore P, Gillard P, Venkatesan R. Probability distribution of multi-hop multipath connection in a random network. Global Telecommunications Conference, 2009. GLOBECOM 2009. IEEE. 2009. 1–5.
- 14 Ristanovic N, Le Boudec JY, Chaintreau A, et al. Energy efficient offloading of 3G networks. 2011 IEEE 8th International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS). IEEE. 2011. 202–211.

[www.c-s-a.org.cn](http://www.c-s-a.org.cn)

[www.c-s-a.org.cn](http://www.c-s-a.org.cn)