

无线供电混合多址接入网络的最优能效资源分配研究

张广驰¹, 曾志超¹, 崔苗¹, 武庆庆², 林凡³, 刘怡俊¹

(1. 广东工业大学信息工程学院, 广东广州 510006; 2. 新加坡国立大学电子与计算机工程系, 新加坡 609774;
3. 广州杰赛科技股份有限公司, 广东广州 510310)

摘要: 在能量受限的通信系统中, 能量效率是衡量系统性能的关键指标. 本文研究由一个基站和多个分簇用户组成的无线供电混合非正交多址接入系统. 在该网络中, 基站通过无线能量传输方式给用户供电, 用户则利用收集到的能量向基站传输各自的信息. 为降低基站的接收解码复杂度, 用户采用分簇的方式进行信息传输; 簇间用户的信息传输采用时分多址方式, 而簇内用户的信息传输采用非正交多址方式. 通过联合分配能量传输与信息传输的时间长度以及控制基站和用户的发射功率来实现网络能量效率的最大化. 由于涉及的优化问题是非凸的, 本文先通过寻找问题最优解的结构, 然后根据分式规划理论, 提出了一种新的迭代资源分配算法来求解该问题. 仿真结果表明, 与“吞吐量最大化策略”和“固定时间分配策略”两种基准策略相比, 所提出的算法显著提高了网络的能量效率.

关键词: 非正交多址接入; 能量效率; 分式规划; 资源分配

中图分类号: TN911.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2020)04-0697-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.04.011

Optimal Energy Efficient Resource Allocation for Wireless Powered Hybrid Multiple Access Networks

ZHANG Guang-chi¹, ZENG Zhi-chao¹, CUI Miao¹, WU Qing-qing², LIN Fan³, LIU Yi-jun¹

(1. School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China;
2. Department of Electrical and Computer Engineering, National University of Singapore, 609774, Singapore;
3. Guangzhou GCI Science & Technology Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510310, China)

Abstract: In energy-limited communication systems, energy efficiency is a key factor that affects the performance of the systems. In this paper, we consider a wireless powered hybrid non-orthogonal multiple access network consisting of a base station and multiple clustered users. In this network, the base station transfers energy to the users in a wireless manner, and the users utilize the harvested energy to transmit information to the base station. To simplify the complexity of the base station's information receiver, a hybrid multiple access scheme is adopted by the users, which are partitioned into multiple clusters. The users in the same cluster transmit in the non-orthogonal multiple access manner, while the users from different clusters transmit in the time division multiple access manner. To maximize the energy efficiency of the network, we jointly optimize the time length of wireless energy transfer from the base station to the users and the time length of information transmission from the users to the base station, as well as the transmit powers of the users. The formulated problem is non-convex and thus is difficult to solve. To tackle this problem, we first find the structure of its optimal solution, and then propose an efficient iterative algorithm to solve it based on the fractional programming technique. Simulation results show that the energy efficiency performance of the proposed algorithm significantly outperforms that of two benchmark schemes, namely the throughput maximization scheme and the fixed time allocation scheme.

Key words: non-orthogonal multiple access; energy-efficiency; fractional programming; resource allocation

收稿日期: 2018-05-09; 修回日期: 2019-10-23; 责任编辑: 孙瑶

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61571138); 广东省科技计划 (No. 2017B090909006, No. 2018A050506015, No. 2019B010119001); 广州市科技计划 (No. 201904010371)

1 引言

近十年来,由于无线通信网络技术的不断发展^[1-14],移动数据流量需求和物联网(IoT)的数量将呈爆炸性增长^[1].由于非正交多址技术能提供较高的频谱效率和大规模的通信链路连接^[1-3],因此被业内认为是第五代移动通信中最有发展前景的技术之一.非正交多址接入可以同时在一个时频资源单元上为多个用户服务,并通过功率维度来区分用户.通过发射机的叠加编码技术和接收机的连续串行干扰消除技术,使得非正交多址接入具有比正交多址(Orthogonal Multiple Access)更高的频谱效率(Spectral Efficiency).早期关于非正交多址接入的研究主要集中在改善系统的频谱效率上.文献[4]中研究了两用户单输入单输出下行非正交多址接入系统的功率分配策略问题.文献[5]研究了下行非正交多址接入系统的最优用户解码顺序,并提出了最大化系统和速率的最优功率分配策略的闭式解表达式.此外,关于非正交多址接入系统的联合用户功率分配和信道子载波分配问题也有研究者做了相应的研究^[6,7].

无线能量传输技术可以为无线网络节点设备进行远程供电,以延长无线网络的使用寿命,因此无线供电通信网络也引起了学术界研究者的广泛关注^[8-11].在无线供电通信网络中,无线网络节点设备先收集基站广播的无线能量,然后使用收集的能量传输数据信号^[11,15-17].文献[11]采用时分多址接入的方式,通过联合优化下行链路的无线能量传输(Wireless Energy Transfer, WET)时间和上行链路的无线信息传输(Wireless Information Transfer, WIT)时间来最大化无线供电通信网络系统的吞吐量.文献[17]采用非正交多址接入的方式,通过联合优化下行链路的无线能量传输时间和上行链路的无线信息传输时间来最大化无线供电通信网络系统的吞吐量.然而,文献[11,15-17]并没有考虑用户终端的电路功率功耗问题.正如文献[18]所述,当与数据传输所消耗的功率相比时,终端用户的电路功耗是不能被忽略的,特别是对于小规模 and 短距离物联网场景.在无线供电通信网络中,无线能量传输阶段和无线信息传输阶段都会存在能量消耗,为了使得理论的分析更符合实际的情况,所以在无线供电通信网络中,无线网络节点的电路功率消耗是不能够被忽略的.

尽管非正交多址接入用户功率分配问题已经有许多的研究者做了相关的研究工作,但这些工作主要集中在系统和速率最大化方面,对于系统能量效率资源分配问题的研究还很少.由于能源成本的不断上升,未来无线数据业务的大量增长将会消耗更多的能量,对

于一个基于能量收集的系统来说,系统的能量效率也是衡量一个无线能量传输系统性能的重要指标,这也是下一代通信系统要解决的关键问题^[19,20].以每焦耳比特为单位测量的能量效率逐渐被认为是未来通信系统的重要设计标准^[21],所以研究无线能量传输系统的能量效率具有重要的实际意义.

在大规模的非正交多址组网中,为了降低串行干扰消除的复杂度和用户信息传输的时延,实际的网络更倾向于使用混合组网的方式.所以,研究无线供电混合多址接入网络的能量效率对以后实际的网络部署具有重要的现实意义.然而,关于无线供电混合多址接入网络能量效率最大化优化问题的研究还很不足,例如无线供电通信网络相关的研究大多数并没有考虑基站和用户的工作电路消耗问题,这在实际网络中也是不能忽略的^[1,21].本文研究无线供电混合多址接入网络能量效率最大化的资源分配问题,考虑了整个网络节点电路功率消耗情况,目标是联合优化基站功率、用户功率分配和上下行传输时间来最大化系统的能量效率.由于实际的系统可能还需要满足某些条件下的服务质量要求,所以本文还额外考虑了用户的服务质量需求以确保每个用户可以达到最低的系统吞吐量要求.由于能量效率最大化问题是一个非凸优化问题,本文先通过两个引理来分析问题的最优解结构,接着根据分式规划理论提出一种基于迭代优化的资源分配算法,最后对本文提出的能量效率最大化资源分配算法与基准策略“吞吐量最大化策略”和“固定时间策略”进行仿真比较,结果表明本文所提算法在能量效率性能上优于基准策略.

2 系统模型

如图1所示,本文考虑的无线供电混合多址接入系统由一个基站和 KM 个用户组成,其中 KM 个用户被分为 K 簇,每簇中包含 M 个用户,用 $U_{k,m}$ ($k \in \Phi \triangleq \{1, \dots, K\}$, $m \in \Omega \triangleq \{1, \dots, M\}$)表示第 k 簇第 m 个用户,且所有的网络节点都配备单根天线.定义基站传输无线能量给 KM 个用户的过程为无线能量传输阶段或者下行传输阶段,其中基站到用户 $U_{k,m}$ 的能量传输信道为 $h_{k,m}$;用户传输信息给基站的过程为无线信息传输阶段或者上行传输阶段,其中用户 $U_{k,m}$ 到基站的信息传输信道为 $g_{k,m}$.假设系统知道准确的信道状态信息.

整个系统的工作过程如图2所示.在无线能量传输阶段,给基站分配时间 τ_0 以向所有用户广播能量信号.第 k 簇的第 m 个用户 $U_{k,m}$ 收集到的能量为:

$$E_{k,m} = \eta \tau_0 P_0 |h_{k,m}|^2, \quad k \in \Phi, m \in \Omega \quad (1)$$

其中 P_0 ($P_0 \leq P_{\max}$)为基站的发射功率, P_{\max} 为基站最大发射功率; η ($0 \leq \eta \leq 1$)为能量转换效率.

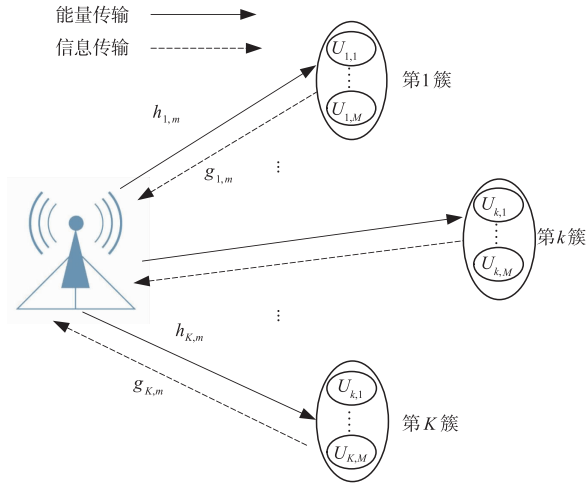


图1 系统模型

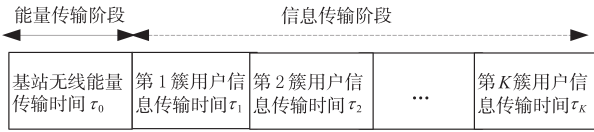


图2 能量传输阶段和信息传输阶段的时隙图

用 E_{WET} 表示无线能量传输阶段能量消耗,它由无线信道传播引起的能量损耗以及基站电路系统消耗的总能量组成,所以 E_{WET} 可以表示为:

$$E_{\text{WET}} = P_0 \tau_0 - \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \eta \tau_0 P_0 |h_{k,m}|^2 + P_E \tau_0 \quad (2)$$

其中 $P_0 \tau_0 - \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \eta \tau_0 P_0 |h_{k,m}|^2$ 表示无线信道传播引起的能量损耗; P_E 为基站恒定电路功耗功率, $P_E \tau_0$ 表示无线能量传输阶段基站电路系统消耗的总能量。

在无线信息传输阶段,簇与簇之间使用时分多址方式正交地向基站发送信号,第 k 簇的信息传输时间为 τ_k , 并且 $K+1$ 个时隙传输总时间不超过 T_{\max} 即:

$$\tau_0 + \sum_{k=1}^K \tau_k \leq T_{\max} \quad (3)$$

每一簇中的 M 个用户之间使用非正交多址接入方式同时传输信息. 所以基站收到的第 k 簇用户的信号为:

$$y_k = \sum_{m=1}^M g_{k,m} x_{k,m} + n_k \quad (4)$$

其中 $g_{k,m}$ 为用户 $U_{k,m}$ 到基站的上行信息传输信道; $x_{k,m}$ 表示第 k 簇第 m 个用户 $U_{k,m}$ 发射给基站的信号; n_k 为加性高斯白噪声, 噪声功率为 σ^2 . 由于用户 $U_{k,m}$ 信息传输的能量来源于其第一阶段收集到的能量, 所以用户 $U_{k,m}$ 信息传输时的能量消耗不会超过其收集到的可用能量:

$$E_{k,m} = P_{k,m} \tau_k + P_{C_{k,m}} \tau_k, \quad \forall k \in \Phi, \forall m \in \Omega \quad (5)$$

其中 $P_{C_{k,m}}$ 为用户终端恒定电路功耗功率, $P_{C_{k,m}} \tau_k$ 为用

户 $U_{k,m}$ 电路消耗的能量.

用 E_{WIT} 表示无线信息传输阶段能量消耗, 它由 K 簇用户消耗的总能量组成. 其中第 k 簇用户无线信息传输阶段能量消耗 E_{WIT_k} 可以表示为:

$$E_{\text{WIT}_k} = \sum_{m=1}^M (P_{k,m} \tau_k + P_{C_{k,m}} \tau_k), \quad \forall k \in \Phi, \forall m \in \Omega \quad (6)$$

所以, 在无线信息传输阶段 K 簇用户消耗的总能量为:

$$E_{\text{WIT}} = \sum_{k=1}^K E_{\text{WIT}_k} = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M (P_{k,m} \tau_k + P_{C_{k,m}} \tau_k) \quad (7)$$

本文考虑的无线供电混合多址接入网络的能量消耗由两部分组成: 即无线能量传输阶段的能量消耗和无线信息传输阶段的能量消耗. 所以整个系统的能量消耗 E_{sum} 可表示为:

$$E_{\text{sum}} = E_{\text{WET}} + E_{\text{WIT}} \quad (8)$$

基站采用串行干扰消除的方式来解码第 k 簇 M 个用户的信息, 定义第 k 簇 M 个用户的吞吐量为用户的可达速率之和. 由于任意解码顺序都不会影响上行非正交多址系统的总吞吐量^[22], 所以用户信息的解码按其索引递增顺序解码. 在解码用户 1 的信息时, 会受到用户 2, \dots , M 的信号干扰; 在解码用户 2 的信息时, 会受到用户 3, \dots , M 的信号干扰, 如此类推, 所以第 k 簇用户 m ($1 \leq m \leq M-1$) 在单位带宽下的可达速率 (单位: bits/Hertz, 简称 bits/Hz) 为^[22]:

$$R_{k,m} = \tau_k \log_2 \left(1 + \frac{P_{k,m} |g_{k,m}|^2}{\sum_{i=m+1}^M P_{k,i} |g_{k,i}|^2 + \sigma^2} \right) \quad (9)$$

第 k 簇用户 M 在单位带宽下的可达速率 (单位: bits/Hz) 可以表示为:

$$R_{k,M} = \tau_k \log_2 \left(1 + \frac{P_{k,M} |g_{k,M}|^2}{\sigma^2} \right) \quad (10)$$

因此, 第 k 簇用户在单位带宽下的吞吐量 (单位: bits/Hz) 可以表示为^[22]:

$$\begin{aligned} R_k &= \sum_{m=1}^M R_{k,m} \\ &= \tau_k \sum_{m=1}^{M-1} \left[\log_2 \left(1 + \frac{P_{k,m} |g_{k,m}|^2}{\sum_{i=m+1}^M P_{k,i} |g_{k,i}|^2 + \sigma^2} \right) \right] \\ &\quad + \tau_k \log_2 \left(1 + \frac{P_{k,M} |g_{k,M}|^2}{\sigma^2} \right) \\ &= \tau_k \sum_{m=1}^{M-1} \left[\log_2 \left(\sum_{i=m}^M P_{k,i} |g_{k,i}|^2 + \sigma^2 \right) \right. \\ &\quad \left. - \log_2 \left(\sum_{i=m+1}^M P_{k,i} |g_{k,i}|^2 + \sigma^2 \right) \right] \\ &\quad + \tau_k [\log_2 (P_{k,M} |g_{k,M}|^2 + \sigma^2) - \log_2 (\sigma^2)] \\ &= \tau_k \log_2 \left(1 + \sum_{m=1}^M P_{k,m} \gamma_{k,m} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

其中 $\gamma_{k,m} = \frac{|g_{k,m}|^2}{\sigma^2}$, $\forall k \in \Phi, \forall m \in \Omega$.

整个网络的吞吐量定义为 K 个用户簇的吞吐量之和:

$$R_{\text{sum}} = \sum_{k=1}^K R_k = \sum_{k=1}^K \tau_k \log_2 \left(1 + \sum_{m=1}^M P_{k,m} \gamma_{k,m} \right) \quad (12)$$

本文考虑在基站发射功率与用户发射功率受限以及上下行传输时间之和固定的条件下,通过联合优化基站发射功率、用户发射功率以及上下行传输时间来最大化无线供电混合多址接入网络的能量效率.

$$\begin{aligned} \max_{\tau_0, \{\tau_k\}, P_0, \{P_{k,m}\}} & \frac{\sum_{k=1}^K \tau_k \log_2 \left(1 + \sum_{m=1}^M P_{k,m} \gamma_{k,m} \right)}{P_0 \tau_0 \left(1 - \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \eta |h_{k,m}|^2 \right) + P_E \tau_0 + \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M (P_{k,m} \tau_k + P_{C_{k,m}} \tau_k)} \\ \text{s. t.} & \quad \tau_0 + \sum_{k=1}^K \tau_k \leq T_{\text{max}} \end{aligned} \quad (13a)$$

$$P_0 \leq P_{\text{max}} \quad (13b)$$

$$P_{k,m} \tau_k + P_{C_{k,m}} \tau_k \leq \eta \tau_0 P_0 |h_{k,m}|^2, \forall k \in \Phi, \forall m \in \Omega \quad (13c)$$

$$\sum_{k=1}^K \tau_k \log_2 \left(1 + \sum_{m=1}^M P_{k,m} \gamma_{k,m} \right) \geq R_{\text{min}} \quad (13d)$$

$$\tau_0 \geq 0, \tau_k \geq 0, P_0 \geq 0, P_{k,m} \geq 0, \forall k \in \Phi, \forall m \in \Omega \quad (13e)$$

在问题(13)中,约束(13a)表示 $K+1$ 时隙最大传输时间不超过 T_{max} ;约束(13b)表示在无线能量传输阶段基站最大允许的发射功率为 P_{max} ;约束(13c)表示 K 簇用户在无线信息传输阶段的能量消耗不会超过其收集到的可用能量;约束(13d)为系统的服务质量约束, R_{min} 表示系统的最小吞吐量,为一常数,其大小由用户的服务质量要求决定.

由于问题(13)的目标函数是一个分式形式,并且优化变量是耦合的,这使得很难使用传统的优化方法来直接求解这个非凸优化问题.为了设计一个能量效率最大化的资源分配算法,本文首先研究问题取得最优解时的结构,为此提出了下面两个引理.

$$\widehat{EE} = \frac{\sum_{k=1}^K \tau_k^* \log_2 \left(1 + \sum_{m=1}^M P_{k,m}^* \gamma_{k,m} \right)}{P_0^* (\theta \tau_0^*) \left(1 - \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \eta |h_{k,m}|^2 \right) + P_E (\theta \tau_0^*) + \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M (P_{k,m}^* \tau_k^* + P_{C_{k,m}} \tau_k^*)}$$

因为 θ 满足 $0 < \theta < 1$,通过对比可以发现 $EE^* < \widehat{EE}$,这跟前面假设 $\{\tau_0^*, \{\tau_k^*\}, P_0^*, \{P_{k,m}^*\}$ 是问题(13)的最优解是相互矛盾的.这表明在最大的能量效率资源分配策略中,所有用户在信息传输过程中会消耗完其收集到的可用能量.

可以看到问题(13)的最优解不同于传统^[23,24]的能量效率优化问题,因为它们并不总是耗尽所有的能量.

3 最大化能量效率资源分配算法

系统的能量效率(Energy Efficiency, EE)定义为系统的可达吞吐量之和与系统消耗总能量的比值.即: $EE = \frac{R_{\text{sum}}}{E_{\text{sum}}}$. 本文目的是在确保系统服务质量约束条件下,

通过联合优化基站发射功率、用户发射功率、下行无线能量传输时间和上行信息传输时间来最大化系统的能量效率.因此,无线供电混合多址接入网络的能量效率最大化问题描述如下:

引理 1 在最优资源分配策略下,所有用户可以消耗完其收集到的可用能量即:

$$P_{k,m} \tau_k + P_{C_{k,m}} \tau_k = \eta \tau_0 P_0 |h_{k,m}|^2$$

证明 引理 1 的证明可以通过反证法.假设 $\{\tau_0^*, \{\tau_k^*\}, P_0^*, \{P_{k,m}^*\}$ 是问题(13)的最优解,且该最优解满足 $P_{k,m}^* \tau_k^* + P_{C_{k,m}} \tau_k^* < \eta P_0^* \tau_0^* |h_{k,m}|^2$,此时对应最优的能量效率为 EE^* .再构造一组问题(13)的可行解 $\{\tilde{\tau}_0, \{\tilde{\tau}_k\}, \tilde{P}_0, \{\tilde{P}_{k,m}\}$,且满足 $\tilde{P}_0 = P_0^*, \tilde{\tau}_k = \tau_k^*$ 以及 $\tilde{P}_{k,m} = P_{k,m}^*$,对应的最优的能量效率为 \widehat{EE} .在最优解中方案中,由于 $P_{k,m}^* \tau_k^* + P_{C_{k,m}} \tau_k^* < \eta P_0^* \tau_0^* |h_{k,m}|^2$,那么在构造的可行解方案中,用户是可以缩减能量收集的时间 $\tilde{\tau}_0$,使得用户在信息数据传输时可以耗尽其收集到的能量,即存在 $\tilde{\tau}_0 = \theta \tau_0^*$ ($0 < \theta < 1$),满足 $\tilde{P}_{k,m} \tilde{\tau}_k + P_{C_{k,m}} \tilde{\tau}_k = \eta \tilde{P}_0 \tilde{\tau}_0 |h_{k,m}|^2$,其中 θ 为能量传输时间减少的比例.可以发现这两组解都是满足问题(13)的约束(13a)到约束(13e)的.将可行解等价于 $\{\theta \tau_0^*, \{\tau_k^*\}, P_0^*, \{P_{k,m}^*\}$ 并代入到问题(13)目标函数中有:

在问题(13)中,所有的用户使用从基站收获的能量进行数据传输.如果用户不能耗尽所有收集到的能量,则基站可以发射少量的能量给用户以获得更高的系统能量效率.

引理 2 在最优资源分配策略下,基站以最大功率发射能量信号,即 $P_0 = P_{\text{max}}$.

证明 假设 $\{\tau_0^*, \{\tau_k^*\}, P_0^*, \{P_{k,m}^*\}$ 是问题(13)的

最优解,且该最优解满足 $P_0^* < P_{\max}$, 基站发射的总能量为 $E_0^* \triangleq P_0^* \tau_0^*$, 此时对应的最优的能量效率为 EE^* . 再构造一组问题(13)的可行解 $\{\tilde{\tau}_0, \{\tilde{\tau}_k\}, \tilde{P}_0, \{\tilde{P}_{k,m}\}\}$, 并满足 $\tau_k^* = \tilde{\tau}_k, \tilde{P}_0 = P_{\max}, P_{k,m}^* = \tilde{P}_{k,m}$ 以及 $E_0^* = \tilde{P}_0 \tilde{\tau}_0$, 此时对应的最优的能量效率为 \tilde{EE} . 由于在最优解中 $\tilde{P}_0 = P_{\max} > P_0^*$, 这使得可行解中能量收集时间 $\tilde{\tau}_0$ 小于最优的 τ_0^* , 即 $\tilde{\tau}_0 < \tau_0^*$, 并且 $P_E \tilde{\tau}_0 < P_E \tau_0^*$ 总是成立的. 可以发现这两组解都是满足问题(13)的约束(13a)到约束(13e)的. 把这两组解代入到目标函数中可以发现目标函数分母的前两项满足如下关系:

$$\frac{\tilde{\tau}_0 \tilde{P}_0 (1 - \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \eta |h_{k,m}|^2) + P_E \tilde{\tau}_0}{\sum_{k=1}^K \tau_k \log_2 \left(1 - \sum_{m=1}^M P_{C_{k,m}} \gamma_{k,m} + \sum_{m=1}^M \frac{\eta P_{\max} |h_{k,m}|^2 \gamma_{k,m}}{\tau_k} \tau_0 \right)} > \frac{P_{\max} \tau_0 (1 - \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \eta |h_{k,m}|^2) + P_E \tau_0 + \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M (\eta \tau_0 P_{\max} |h_{k,m}|^2)}{P_{\max} \tau_0 (1 - \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \eta |h_{k,m}|^2) + P_E \tau_0 + \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M (\eta \tau_0 P_{\max} |h_{k,m}|^2)} \quad (14)$$

所以问题(13)可以等价于下面优化问题(15):

$$\begin{aligned} & \max_{\tau_0, \{\tau_k\}} \frac{\sum_{k=1}^K \tau_k \log_2 \left(1 - \sum_{m=1}^M P_{C_{k,m}} \gamma_{k,m} + \sum_{m=1}^M \frac{\eta P_{\max} |h_{k,m}|^2 \gamma_{k,m}}{\tau_k} \tau_0 \right)}{P_{\max} \tau_0 (1 - \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \eta |h_{k,m}|^2) + P_E \tau_0 + \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M (\eta \tau_0 P_{\max} |h_{k,m}|^2)} \\ & \text{s. t. } \tau_0 + \sum_{k=1}^K \tau_k \leq T_{\max} \\ & \left\{ \begin{array}{l} \sum_{k=1}^K \tau_k \log_2 \left(1 - \sum_{m=1}^M P_{C_{k,m}} \gamma_{k,m} + \sum_{m=1}^M \frac{\eta P_{\max} |h_{k,m}|^2 \gamma_{k,m}}{\tau_k} \tau_0 \right) \\ \geq R_{\min} \end{array} \right. \end{aligned} \quad (15a)$$

求解. 不失一般性, 假设问题(15)中取得最大能量效率为 q^* , 即

$$q^* = \max_{\tau_0, \{\tau_k\}, \{P_{k,m}\}} \frac{R_{\text{sum}}(\{\tau_k\}, \{P_{k,m}\})}{E_{\text{sum}}(\tau_0, \{\tau_k\}, \{P_{k,m}\})} \quad (16)$$

根据文献[25], 可以将问题(15)的目标函数转换为等价的减法形式, 进一步将问题(15)等价于问题(17), 即

虽然问题(15)比原问题(13)更容易处理些, 但转换后的问题(15)仍然是一个非凸优化问题, 对于这样的非凸目标函数很难使用非线性分式规划问题来

$$\begin{aligned} & \max_{\tau_0, \{\tau_k\}} \left[\sum_{k=1}^K \tau_k \log_2 \left(1 - \sum_{m=1}^M P_{C_{k,m}} \gamma_{k,m} + \sum_{m=1}^M \frac{\eta P_{\max} |h_{k,m}|^2 \gamma_{k,m}}{\tau_k} \tau_0 \right) - q \left[\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M (\eta \tau_0 P_{\max} |h_{k,m}|^2) \right. \right. \\ & \left. \left. + P_{\max} \tau_0 (1 - \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \eta |h_{k,m}|^2) + P_E \tau_0 \right] \right] \\ & \text{s. t. } \tau_0 + \sum_{k=1}^K \tau_k \leq T_{\max} \end{aligned} \quad (17a)$$

$$\sum_{k=1}^K \tau_k \log_2 \left(1 - \sum_{m=1}^M P_{C_{k,m}} \gamma_{k,m} + \sum_{m=1}^M \frac{\eta P_{\max} |h_{k,m}|^2 \gamma_{k,m}}{\tau_k} \tau_0 \right) \geq R_{\min} \quad (17b)$$

$$\tau_0 \geq 0, \tau_k \geq 0, \forall k \in \Phi, \forall m \in \Omega \quad (17c)$$

对于问题(17), 当给定 q 时, 目标函数第一项为优化变量的凹函数^[1], 第二项和第三项为线性的, 所以问题(17)是凸优化问题, 可以通过内点法^[26] 求其最优解. Dinkelbach 在文献[25]中提出了迭代算法来求 q^* . 在每次迭代中, 当给定 q 值时, 通过求解问题(17)可以

求解最优的能量效率. 接着根据等式(16)来更新 q 的值, 然后问题(17)会在下一次迭代中根据上一次得到的 q 值再次求解最优的能量效率, 接着再根据等式(16)来更新 q 的值, 直到最后 q 达到收敛. 当 q^* 取得最大值时也是系统的能量效率 EE 取得最大值时刻.

综上所述, 所提算法总结如下.

算法 1 能量效率最大化的资源分配算法

步骤 1: 初始化迭代次数 $n=0$, 误差精度 ε , 基站发射功率 P_{\max} , 系统最小吞吐量需求 R_{\min} 以及 $q^{(0)}$;

步骤 2: 令 $n=n+1$;

步骤 3: 给定 $q^{(n)}$ 时, 通过内点法求解问题 (17), 得出上下行时间分配策略 $\tau_0^{(n)}, \{\tau_k^{(n)}\}$;

步骤 4: 通过引理 1 和引理 2 求基站和用户的发射功率 $\{P_0^{(n)}, \{P_{k,m}^{(n)}\}\}$;

步骤 5: 根据 $\tau_0^{(n)}, \{\tau_k^{(n)}\}$ 和 $\{P_0^{(n)}, \{P_{k,m}^{(n)}\}\}$ 计算 $R_{\text{sum}}^{(n)}(\{\tau_k^{(n)}\}, \{P_{k,m}^{(n)}\})$;

步骤 6: 根据 $\tau_0^{(n)}, \{\tau_k^{(n)}\}$ 和 $\{P_0^{(n)}, \{P_{k,m}^{(n)}\}\}$ 计算 $E_{\text{sum}}^{(n)}(\tau_0^{(n)}, \{\tau_k^{(n)}\}, \{P_{k,m}^{(n)}\})$;

步骤 7: 如果 $|q_{(n)} - q_{(n-1)}| \leq \varepsilon$, 则求出了问题 (15) 的最优值 EE^* , 此时对应的 $\tau_0^{(n)}, \{\tau_k^{(n)}\}, \{P_0^{(n)}, \{P_{k,m}^{(n)}\}\}$ 为最优资源分配策略; 否则通过计算 $q^{(n)} = \frac{R_{\text{sum}}^{(n)}(\{\tau_k^{(n)}\}, \{P_{k,m}^{(n)}\})}{E_{\text{sum}}^{(n)}(\tau_0^{(n)}, \{\tau_k^{(n)}\}, \{P_{k,m}^{(n)}\})}$ 来更新 $q^{(n)}$ 取值, 然后再重复步骤 2 到步骤 6, 直到 $|q_{(n)} - q_{(n-1)}| \leq \varepsilon$.

在上述算法中, 每次迭代计算的复杂度主要集中在内点法求解问题 (17), 其复杂度为 $\mathcal{O}[(K+1)^2]$ [26,27]. 因此, 本文所提的能量效率最大化的资源分配算法的算法复杂度为 $\mathcal{O}[N_{\text{ite}}(K+1)^2]$, 其中 N_{ite} 为算法的迭代次数.

4 仿真结果分析

这一节通过计算机仿真来验证本文提出的能量效率最大化的资源分配算法的性能, 并将所提算法与基准策略“固定时间分配策略”与“吞吐量最大化策略” [28] 进行比较. “固定时间分配策略”固定下行能量传输时间为 $\tau_0 = \frac{T_{\max}}{2}$, 上行信息传输时间平均分配为 $\tau_k = \frac{(1-\tau_0)}{K}$, 功率分配方式由本文的引理 1 和 2 求得, 其计算复杂度为 $\mathcal{O}(KM)$. “吞吐量最大化策略”的目标是最大化网络吞吐量 $R_{\text{sum}} = \sum_{k=1}^K \tau_k \log_2(1 + \sum_{m=1}^M P_{k,m} \gamma_{k,m})$, 约束条件与问题 (13) 中的 (13a) ~ (13c) 和 (13e) 相同; 其功率分配方式由本文的引理 1 和 2 求得, 时间分配通过内点法求得, 其计算复杂度为 $\mathcal{O}[N_{\text{ite}}(K+1)^2]$, 其中 N_{ite} 为算法的迭代次数.

在仿真中, 假设共有 10 个用户, 被分成 5 簇, 每个簇有 2 个用户, 即 $K=5, M=2$. 所有用户到基站的距离相等. 上下行信道建模为 $h_{k,m} = g_{k,m} = 10^{-3} \rho_{k,m}^2 d_{k,m}^{-\alpha}$ [11], 其中, $d_{k,m}$ 为用户 $U_{k,m}$ 到基站的距离, 路径损耗因子 $\alpha = 2.2$, $\rho_{k,m}^2$ 是均值为 1 的指数分布随机变量, 它刻画小尺度瑞利衰落. 用户的能量转换效率 $\eta = 0.9$. 仿真场景是窄带物联网 [29], 系统带宽为 180kHz, 噪声功率谱密度为 -170dBm/Hz , 噪声功率为 $\sigma^2 = -117\text{dBm}$. 基站的最

大发射功率为 $P_{\max} = 40\text{dBm}$, 基站的电路功耗功率为 10mW , 用户终端节点的电路功耗功率为 0.05mW , $K+1$ 个时隙最大传输时间 $T_{\max} = 1\text{s}$, 用户的最小速率需求 $R_{\min} = 0.001\text{bits/Hz}$. 迭代收敛阈值为 $\varepsilon = 0.0001$ [30], 采用蒙特卡罗方法对 100 个随机信道样本结果取平均, 得到下述结果.

图 3 显示的是三种算法的平均能量效率与基站最大发射功率之间的关系 ($d_{k,m} = 3\text{m}$). 平均能量效率是指 100 个随机信道样本下的能量效率的算术平均值. 通过图 3 可以观察到, 能量效率最大化的资源分配算法求出的平均能量效率都随着基站发射功率的增加而增加, 这是因为当基站发射功率达到一定的水平后, 系统容量和能量消耗之间存在权衡. 而吞吐量最大化策略和固定时间分配策略求出的能量效率先增加然后再降低, 这是因为吞吐量最大化策略中用户会消耗更多的能量以提高系统的吞吐量, 从而导致系统能量效率的降低. 从图中显然可以看出, 能量效率最大化的资源分配算法所求出的能量效率性能是最优的.

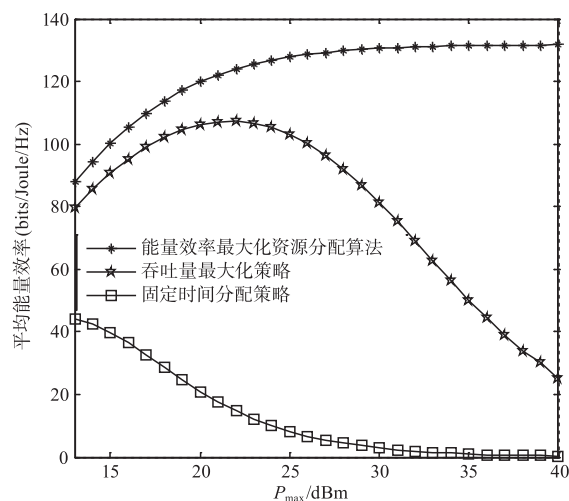


图3 不同基站发射功率条件下, 三种算法的系统平均能量效率比较

图 4 显示了三种算法的网络平均吞吐量与基站最大发射功率之间的关系, 其中平均吞吐量是指 100 个随机信道样本下的吞吐量的算术平均值. 图 4 中的仿真参数与图 3 相同. 在图 4 中, 三种算法的平均吞吐量随基站发射功率的增加而增加, 但三者的吞吐量差距也随基站发射功率的增加而增大. “吞吐量最大化策略”的吞吐量性能优于本文所提的能量效率最大化算法. 该结果显示能量效率最大化和频谱效率 (吞吐量) 最大化存在折中关系, 如果注重提高能量效率, 频谱效率 (吞吐量) 就会降低, 反之亦然.

图 5 显示三种算法的平均能量效率与用户到基站距离之间的关系 ($P_{\max} = 15\text{dBm}$). 通过图 5 可以观察

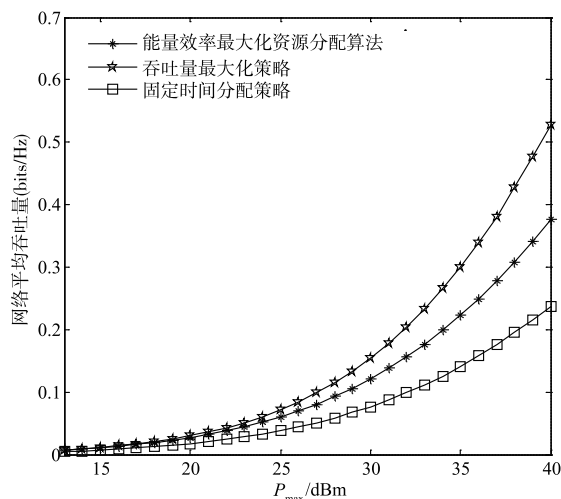


图4 不同基站发射功率情况下,三种算法的平均网络吞吐量比较

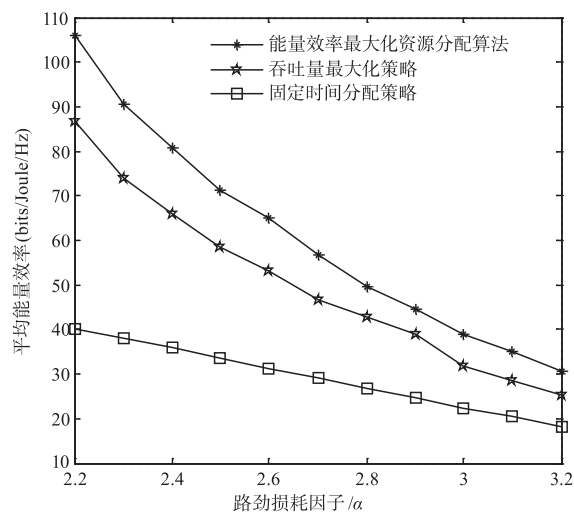


图6 不同路径损耗因子的条件下,三种算法的系统平均能量效率比较

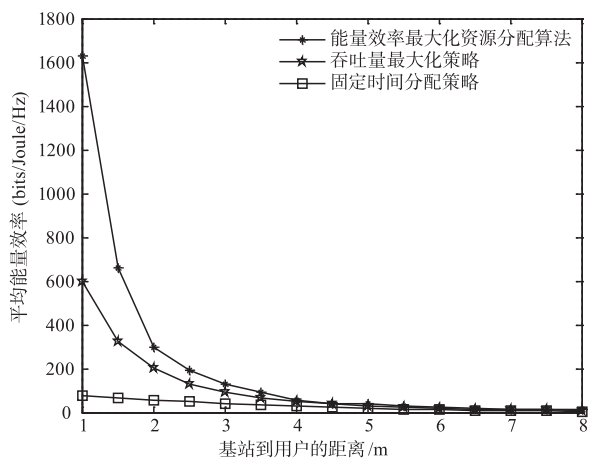


图5 用户到基站不同距离的条件下,三种算法的系统平均能量效率比较

到,随着用户远离基站,系统的平均能量效率也随之降低。这是因为用户靠近基站时可以获得较大的信道增益从而更加有效地利用能量,而用户远离基站时会导致能量在传输过程中损耗也增加,这就使得与实际设计中要合理的部署网络节点位置要求是一致的,这样用户可以利用更多能量来提高系统吞吐量,从而改善系统的能量效率。最后从图中还可以看出能量效率最大化的资源分配算法所求出的能量效率性能是最优的。

图6显示三种算法的平均能量效率与路径损耗因子之间的关系($P_{\max} = 15\text{dBm}$, $d_{k,m} = 3\text{m}$)。从图中可以看到系统的平均能量效率随着路径损耗因子的增加而减少,这是因为随着路径损耗因子的不断变大,能量信号在传播的过程损耗也增加,导致系统平均能量效率的降低。图6还表明能量效率最大化的资源分配算法所求出的能量效率性能是最优的。

5 结论

本文考虑一个无线供电混合多址接入网络,通过联合优化下行无线能量传输阶段与上行信息传输阶段的时间分配和功率分配来最大化网络的能量效率。为求解涉及的能量效率最大化资源分配问题,本文首先找到了问题的最优解结构,然后根据分式规划理论提出最优求解算法。仿真结果显示所提算法的能量效率性能明显优于“吞吐量最大化”和“固定时间分配”两种基准策略。此外,本文的结果显示在资源分配策略中,能量效率最大化和频谱效率最大化存在折中关系,在实际应用中,应根据实际需求选择目标不同的策略。在未来的工作中,有待研究的内容是改变本文假设的固定用户分簇情况,将动态的用户分簇与资源分配相结合,进一步提高网络的能量效率。

参考文献

- [1] WU Q, CHEN W, NG D W K, et al. Spectral and energy efficient wireless powered IoT networks: NOMA or TDMA? [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(7): 6663 - 6667.
- [2] WU Q, LI G Y, CHEN W, et al. An overview of sustainable green 5G networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2017, 24(4): 72 - 80.
- [3] DING Z, LIU Y, CHOI J, et al. Application of non-orthogonal multiple access in LTE and 5G networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(2): 185 - 191.
- [4] WANG C L, CHEN J Y, CHEN Y J. Power allocation for a downlink non-orthogonal multiple access system [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2016, 5(5): 532 - 535.
- [5] YANG Z, XU W, PAN C, et al. On the optimality of power

- allocation for NOMA downlinks with individual QoS constraints[J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(7): 1649 – 1652.
- [6] YUAN D, HO C K, SUN S. Power and channel allocation for non-orthogonal multiple access in 5G systems: tractability and computation[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(12): 8580 – 8594.
- [7] SUN Y, NG D W K, DING Z, et al. Optimal joint power and subcarrier allocation for full-duplex multicarrier non-orthogonal multiple access systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(3): 1077 – 1091.
- [8] ZHANG G, XU J, WU Q, et al. Wireless powered cooperative jamming for secure OFDM system[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 67(2): 1331 – 1346.
- [9] ZHANG G, LI X, CUI M, et al. Signal and artificial noise beamforming for secure simultaneous wireless information and power transfer multiple-input multiple-output relaying systems[J]. *IET Communications*, 2016, 10(7): 796 – 804.
- [10] BOSHKOVSKA E, NG D W K, ZLATANOV N, et al. Practical non-linear energy harvesting model and resource allocation for SWIPT systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2015, 19(12): 2082 – 2085.
- [11] JU H, ZHANG R. Throughput maximization in wireless powered communication networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(1): 418 – 428.
- [12] 李光平, 张广驰, 崔苗, 等. 基于中继放大转发的多天线基站下行传输性能分析[J]. *电子学报*, 2013, 41(7): 1305 – 1312.
LI Guang-ping, ZHANG Guang-chi, CUI Miao, et al. Performance analysis of downlink systems with a multi-antenna base station based on amplify-and-forward relaying strategy[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(7): 1305 – 1312. (in Chinese)
- [13] 黄高飞, 罗丽平, 张广驰, 等. 具有时延 QoS 保证的 OFDM 中继系统子载波配对与功率分配算法[J]. *电子学报*, 2013, 41(2): 335 – 339.
HUANG Gao-fei, LUO Li-ping, ZHANG Guang-chi, et al. Subcarrier pairing and power allocation algorithm for OFDM relay systems with delay QoS guarantees[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(2): 335 – 339. (in Chinese)
- [14] 罗丽平, 邱焕新, 张广驰, 等. 具有约束条件的认知无线电网络最优频谱价格函数[J]. *电子学报*, 2011, 39(3): 562 – 566.
LUO Li-ping, QIU Huan-xin, ZHANG Guang-chi, et al. Optimal pricing function with spectrum constraint in cognitive radio networks[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(3): 562 – 566. (in Chinese)
- [15] HUANG K, LAU V K N. Enabling wireless power transfer in cellular networks: architecture, modeling and deployment[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(2): 902 – 912.
- [16] JU H, ZHANG R. Optimal resource allocation in full-duplex wireless-powered communication network[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2014, 62(10): 3528 – 3540.
- [17] DIAMANTOULAKIS P D, PAPPAS K N, DING Z, et al. Wireless-powered communications with non-orthogonal multiple access[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 15(12): 8422 – 8436.
- [18] KIM H, VECIANA G D. Leveraging dynamic spare capacity in wireless systems to conserve mobile terminals' energy[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2010, 18(3): 802 – 815.
- [19] WU J, RANGAN S, ZHANG H. *Green Communications: Theoretical Fundamentals, Algorithms, and Applications* [M]. CRC Press, 2012.
- [20] LI H, SONG L, DEBBAH M. Energy efficiency of large-scale multiple antenna systems with transmit antenna selection[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2014, 62(2): 638 – 647.
- [21] WU Q, LI G, CHEN W, et al. Energy-efficient small cell with spectrum-power trading[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016, 34(12): 3394 – 3408.
- [22] AL-IMARI M, XIAO P, IMRAN M A, et al. Uplink non-orthogonal multiple access for 5G wireless networks[A]. *International Symposium on Wireless Communications Systems* [C]. Spain: IEEE Press, 2014. 781 – 785.
- [23] CHEN X, WANG X, CHEN X. Energy-efficient optimization for wireless information and power transfer in large-scale MIMO systems employing energy beamforming[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2013, 2(6): 667 – 670.
- [24] NG D W K, LO E S, SCHÖBER R. Energy-efficient resource allocation in multi-cell OFDMA systems with limited backhaul capacity[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, 11(10): 3618 – 3631.
- [25] DINKELBACH W. On nonlinear fractional programming[J]. *Management Science*, 1967, 3(7): 492 – 498.
- [26] BOYD S, VANDENBERGHE L. *Convex Optimization* [M]. UK: Cambridge University Press, 2009.
- [27] LI Y, JIANG M, ZHANG Q, et al. Secure beamforming in downlink MISO non-orthogonal multiple access systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017. 7563 – 7567.
- [28] 张广驰, 曾志超, 崔苗, 等. 无线供电混合多址接入网络的资源分配[J]. *电子与信息学报*, 2018, 40(12): 3013 – 3019.

- ZHANG Guang-chi, ZENG Zhi-chao, CUI Miao, et al. Resource allocation for wireless powered hybrid multiple access networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2018, 40(12):3013–3019. (in Chinese)
- [29] WANG Y P E, LIN X, ADHIKARY A, et al. A primer on 3GPP narrowband Internet of things[J]. IEEE Communi-

cations Magazine, 2017, 55(3):117–123.

- [30] FANG F, ZHANG H, CHENG J, et al. Energy-efficient resource allocation for downlink non-orthogonal multiple access (NOMA) network [J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(9):3722–3732.

作者简介



张广驰 男, 1982年2月出生于广西南宁. 教授, 研究方向为新一代无线通信技术.
E-mail: gczhang@gdut.edu.cn



曾志超 男, 1992年1月出生于广东梅县. 硕士研究生, 研究方向为非正交多址接入的资源分配策略.
E-mail: zeng_zhichao@163.com

崔苗(通讯作者) 女, 1978年7月出生于黑龙江大庆. 讲师, 研究方向为新一代无线通信技术.

武庆庆 男, 1991年10月出生于安徽阜阳. 研究员, 研究方向为新一代无线通信技术.

林凡 男, 1983年2月出生于浙江温州. 高级工程师, 研究方向为智慧城市、智能化网络、物联网等.

刘怡俊 男, 1977年5月出生于江西于都. 教授, 研究方向为集成电路设计、类脑计算机、计算机体系结构等.