

LTE-A 网络下能源高效的 M2M 上行子载波和功率分配问题研究

何英庆 李 宁 王 聪 陈彦成 徐键卉

(陆军工程大学通信工程学院 南京 210007)

摘 要 在 M2M 通信中,提高设备的能源效率、延长设备的电池使用寿命是一个关键问题。文中研究了 LTE-A 网络中 M2M 上行通信的联合子载波和功率分配的能源效率问题,在保证 M2M 设备的基本传输时延以及 LTE-A 上行资源分配约束的前提下,得到资源分配的优化问题;由于直接求解该问题的计算复杂度相当高,因此文中进一步提出一种基于拉格朗日乘数法的子载波和功率分配算法,该算法在降低计算复杂度的同时,能够获得更低的功率消耗以及更高的能源效率。仿真结果表明,所提算法在功率消耗和能源效率方面更接近最优算法。

关键词 M2M 通信, LTE-A, 能源效率, 上行调度, 资源分配

中图分类号 TN929.5 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2019.07.009

Study on Energy Efficient M2M Uplink Subcarrier and Power Allocation in LTE-A Network

HE Ying-qing LI Ning WANG Cong CHEN Yan-cheng XU Jian-hui

(Institute of Communication Engineering, PLA Army Engineering University, Nanjing 210007, China)

Abstract Improving the energy efficiency of devices in M2M communication, and prolonging the lifetime of M2M devices which are powered by battery is a critical problem. In this paper, the energy efficient sub-channel and power allocation problem was studied for M2M communication over LTE-A cellular uplinks. Under delay requirement of M2M devices and resources allocation restrains of uplink communication, the sub-channel and power allocation problem was formulated. Due to the high computational complexity of solving this problem directly, a lagrange-basic resources allocation algorithm was further proposed in this paper, which can obtain acceptable power and energy efficiency performances with less complexity. The simulation results show that the proposed algorithm outperforms the Greedy algorithm and is more close to the optimal algorithm in power and energy efficiency performances.

Keywords M2M communication, LTE-A, Energy efficiency, Uplink schedule, Resource allocation

1 引言

随着物联网的发展,接入无线服务的应用在不断地增加,提供无处不在的设备接入服务导致设备的能源消耗不断提高^[1]。对于 M2M 通信而言,能量消耗的爆炸性增长是它必须解决的一个关键问题,该问题会严重影响到电池供电设备的使用寿命,同时会增加运营成本。而对于 M2M 移动终端来说,几乎所有的移动终端都是依靠电池供电的,这些设备并不能承受过高的能源消耗^[2]。另一方面,过高的能量消耗会使温室气体的排放量增加,从而影响全球的环境气候。相关报告^[3]指出,在全球的二氧化碳排放量中,9%的二氧化碳排放是由信息技术和通信技术造成的;而文献[4-5]指出,全球由信息和通信技术造成的二氧化碳排放量几乎等于航空工业所造成的二氧化碳排放量。因此,最小化设备的能源消耗变

得相当重要,在绿色无线网络中提高频谱效率和功率效率越来越成为未来无线网络设计的主流^[6]。提高无线网络的能源效率可以通过更有效地利用无线资源,也可以通过其他无线技术和节能技术等来达到。因此,未来无线网络的能源高效的资源分配算法和技术将成为研究重点。

在 LTE-A 通信标准中,上行链路使用的是单载波频分多址接入技术(SC-FDMA),然而下行链路使用的则是正交频分多址接入技术(OFDMA)。前者相比于后者,具有更低的峰值平均功率比(PAPR),设备的能量消耗也相对更低,从而更加适合于上行通信^[7]。不同于 OFDMA,SC-FDMA 使用串行的子载波传输方式,在接收端使用频域均衡技术,因此其资源分配方式完全不同于 OFDMA。现存文献中研究 SC-FDMA 上行链路能源高效的资源分配方案的工作较少,本文将研究 LTE-A 上行 M2M 设备能源高效的子载波和功率分配问题。

到稿日期:2018-06-04 返修日期:2018-09-20 本文受国家自然科学基金项目(61771486,61571463)资助。

何英庆(1993-),男,硕士,主要研究方向为无线通信、M2M 通信等,E-mail:yingqing_he@sina.com;李 宁(1967-),男,硕士,副教授,主要研究方向为认知无线技术、M2M 通信、智能信号处理和无线通信等,E-mail:js_ningli@sina.com(通信作者);王 聪(1975-),男,博士,副教授,主要研究方向为移动通信、M2M 通信和计算机网络;陈彦成(1995-),男,硕士,主要研究方向为移动通信、无线通信;徐键卉(1991-),女,硕士,助教,主要研究方向为移动通信、卫星通信和网络。

现存文献中,研究 LTE-A 网络中上行 M2M 能源高效的资源分配问题的研究考虑的优化目标及关注点不尽相同,大多数的研究工作仅仅考虑传输功率分配或者仅仅考虑子载波分配^[8-10]。文献[11]针对在 M2M 设备和基站之间加入中继网关的情况,考虑将设备的总功率最小化作为功率分配的优化目标,获得了 M2M 设备在不同负载情况下的功率分配方案;但该研究并没有考虑到设备的子载波分配。文献[12]研究了一种通过 D2D 链路聚合 M2M 通信数据的功率分配方法,其考虑用 H2H 用户将附近的 M2M 设备的数据聚合到一起,再将聚合的数据与 H2H 用户自身的数据一起发送给基站,能够解决大量 M2M 设备同时接入基站的拥塞问题;然而该研究并没有考虑到设备的能源效率问题,仅仅将设备的总功率作为优化目标。在文献[13]中,作者研究了基站覆盖半径内,M2M 设备的联合子载波和功率分配问题,同时考虑了设备的 QoS 需求,获得了较好的系统吞吐量;但该研究考虑的是将设备总的吞吐量作为资源分配的优化目标,对设备能源效率的考虑尚少。文献[14]在同时考虑 M2M 设备和 H2H 用户的情况下,提出一种能够保证设备的 QoS 需求的子载波和功率分配方法;但其能源效率标准用的是设备的有效容量和传输功率的比值,而不是实时的传输容量。文献[15]介绍了一种基于网关中继的能源高效的子载波和功率分配算法,其使用的中继网关由 H2H 设备代替,并且仅考虑总能量消耗,忽略了总能源效率。文献[16-17]分别研究了异构网络下能源高效的资源分配方案及 MIMO 广播信道下的无线信息和功率同步传输的能源效率优化方案;然而其没有考虑 LTE-A 网络下的 M2M 上行通信的资源分配问题。基于此,本文研究 LTE-A 网络下能源高效的 M2M 上行子载波和功率分配问题,提出一种基于拉格朗日乘数法的子载波和功率分配方案。

本文的主要工作如下:1)根据 LTE-A 网络下单小区、多用户的 M2M 上行通信特征,建立 M2M 设备与基站通信的系统模型;2)定义 M2M 设备的能源效率,推导出同时满足 M2M 设备的时延需求和 LTE-A 资源分配基本约束条件的资源分配优化问题;3)在保证算法计算复杂度相对较低,以及较好的功率消耗和较高的能源效率的基础上,推导出一种基于拉格朗日乘数法的资源分配算法,利用椭圆算法对拉格朗日参数进行更新,求出 M2M 资源分配优化问题的次优解。

本文首先建立系统模型,然后讨论并确定资源分配优化问题,再推导出求解能源高效的联合子载波和功率分配算法,从而得到子载波和功率分配的解,最后通过仿真对本文算法进行验证分析并给出结论。

2 系统模型和资源分配问题

本节给出基于拉格朗日乘数法的子载波和功率分配算法的系统模型,并确定资源分配的优化问题。

2.1 系统模型

考虑在单个小区内的多个无线连接 M2M 用户设备,如图 1 所示。假设整个小区覆盖范围内总的 M2M 设备数量为 U 。在小区覆盖范围内,M2M 用户设备可以通过多种方式与基站通信:1)M2M 设备直接与基站通信;2)通过中继网关向

基站发送信息,完成信息的传输;3)M2M 设备之间通过 D2D 的方式实现 M2M 设备之间的通信。为简单起见,本文不考虑 M2M 设备的 D2D 连接情况以及通过中继网关与基站通信的情况,仅考虑设备直接与基站通信的情况。假设单个小区内总的可用子载波数目为 M ,当小区内的设备数量较少时不会造成网络拥塞。而当小区内接入的 M2M 设备数量较多时,由于子载波数量有限,大量的 M2M 设备同时竞争子信道资源。这一方面造成网络拥塞甚至瘫痪,给设备的传输带来很大的时延;另一方面,由于设备在不停地竞争无线信道,需要不停地发送接入请求,从而使得设备的功率消耗过快,降低了能源使用效率。因此,需对子载波和功率进行合理分配,以提高频谱效率和功率效率。

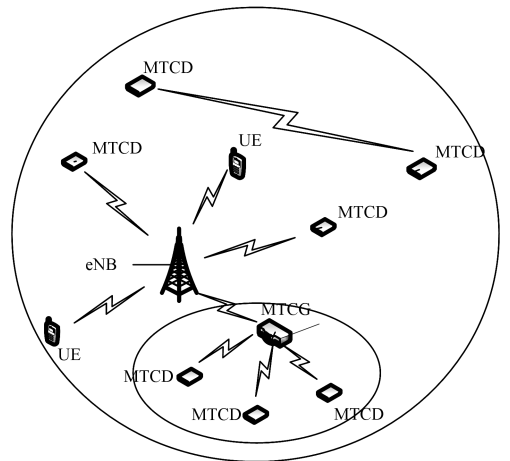


图 1 多用户的资源分配系统模型

Fig. 1 Multi-user resource allocation system model

M2M 设备在上行传输数据的过程中,由于使用的是 LTE-A 上行通信标准,因此需要符合单载波频分多址接入(SC-FDMA)的相关约束^[18]。在子载波分配方面:1)每个子载波在每个时隙最多只能被分配给一个用户设备;2)在同一时隙分配给同一个用户的子载波必须是相邻的。在功率分配方面:1)在每个传输时隙,每个用户在每个子载波上的传输功率必须小于该子载波的峰值传输功率 P_T ;2)每个设备在同一时隙内,在所有分配给它的子载波上的总传输功率必须小于给用户分配的最大传输功率 P_{max} ;3)在同一个传输时隙内,所有分配给同一个设备的子载波的传输功率必须相等。

2.2 能源高效的资源分配优化问题

本节详细描述本文的资源分配优化问题。鉴于资源分配存在的约束,考虑将 M 个可用子载波划分为 K 个有序集合,每个集合中包含 m_i 个连续的子载波,从而 $M=m_1+m_2+\dots+m_k$ 。可用的资源分配模式矩阵可通过如下方式构成:如果一个子载波分配给一个用户,则将其记为“1”,否则记为“0”,从而得到设备 u 的资源分配矩阵 A^u 。矩阵的行对应于可用子载波索引,矩阵的列对应于可用的资源分配模式^[19]。 $M=4$ 时的资源分配模式矩阵为:

$$A^u = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,第一列表示第一种资源分配模式包含子载波 $m=1$,而第六列则表示资源分配模式 $k=6$ 包含子载波 $m=2,3$ 。此外,定义一个 UK 长度的分配模式指示向量 $\mathbf{z} = [\mathbf{z}_u]_{U \times 1}$,其中, $\mathbf{z}_u = [\mathbf{z}_{u,k}]_{K \times 1}$ 是一个长度为 K 的向量; $\mathbf{z}_{u,k} \in \{0,1\}$ 是一个二元变量, K 是资源分配矩阵 A^u 中列的数量,即资源分配模式的数量。通过 $\mathbf{z}_{u,k}$ 的取值来判断设备 u 是否分配到了资源分配模式 k 。

假设备 u 在资源分配模式 k 上的传输功率为 $P_{u,k}$,而 $S_{u,k}$ 表示在一个时隙内分配给设备 u 的连续子载波的集合,则设备 u 的信噪比为:

$$\gamma_{u,k} = \left(\frac{1}{|S_{u,k}| \sum_{m \in S_{u,k}} p_{u,m} g_{u,m}} \right)^{-1} \quad (2)$$

其中, $g_{u,m} = |h_{u,m}|^2 / \sigma^2$, 为设备在每个子载波上的信道增益 $|h_{u,m}|^2$ 和噪声功率 σ^2 的比值;而 $p_{u,m} = P_{u,k} / |S_{u,k}|$, 表示设备在资源分配模式 k 下在子载波 m 上的传输功率。基于香农容量公式,设备 u 的最大数据速率(单位为 bit/s)为:

$$R_{u,k} = B |S_{u,k}| \log(1 + \gamma_{u,k}) \quad (3)$$

本文中,一个 M2M 设备 u 所消耗的功率包括子载波上的传输功率的总和 $P_{u,k}$ 以及设备发射机的硬件电路消耗的功率 $P_{u,k}^{ckt}$ 。其中,回路的功率消耗 $P_{u,k}^{ckt}$ 又可以分为两个部分,即静态回路功率消耗和动态回路功率消耗^[20],而动态回路功率消耗可以建模为传输速率的线性函数,从而得到 $P_{u,k}^{ckt}$ 为:

$$P_{u,k}^{ckt} = P_u^s + \varepsilon R_{u,k} \quad (4)$$

其中, P_u^s 表示设备的静态回路消耗功率; ε 是传输速率消耗功率的系数,表示单位数据速率所消耗的动态功率。此外,下文还会考虑功率放大器的不完全转化而造成的功率损耗。

设备的能源效率可以定义为设备在传输数据时单位焦耳的能量所能够传输的数据量,即设备消耗单位焦耳的能量(包括传输消耗的能量和发射机回路消耗的能量)时能够传输的数据量。而能量表示为功率和时间的乘积。假设设备的负载量为 L_u ,则得到设备 u 的能源效率为:

$$\eta_{u,k} = \frac{L_u}{T(\xi P_{u,k} + P_{u,k}^{ckt})} \quad (5)$$

其中, ξ 表示设备发射机的功率放大器的能量转化效率,反映了由于功率放大器的能量不完全转化造成的功率损耗; T 表示传输时间。

得到设备的能源效率以后,根据设备的传输负载、设备的传输功率约束和子载波分配约束,在保证设备的最低传输速率即设备的最大可容忍时延的基础上,得到使得整个系统能源效率最大化的资源分配问题。

$$\max_{\mathbf{z}} \sum_{u=1}^U \sum_{k=1}^K \mathbf{z}_{u,k} \eta_{u,k}$$

s. t.

$$a) 0 \leq P_{u,k} \leq P_u^{\max}, \forall u, k$$

$$b) 0 \leq P_{u,m} \leq P_s, \forall u, m$$

$$c) \frac{L_u}{R_{u,k}} \leq T, \forall u, k$$

$$d) \sum_{u=1}^U \sum_{k=1}^K \mathbf{z}_{u,k} A_{m,k}^u = 1, \forall m$$

$$e) \sum_{k=1}^K \mathbf{z}_{u,k} = 1, \forall u$$

$$f) \mathbf{z}_{u,k} \in \{0,1\}, \forall u, k \quad (6)$$

其中,约束条件 a) 和 b) 分别表示任意设备 u 在任意一种资源分配模式 k 下的传输功率不大于其最大传输功率,并且在任一子载波上的传输功率不大于峰值传输功率;约束条件 c) 表示设备 u 传输 L_u 比特数据的最大时延不能超过给定的时间 T ;约束条件 d) 表示任意的两种资源分配模式在同一时隙只能分配给两个不同的用户,同时保证了一个子载波在同一个时隙不会被分配给不同的用户设备;约束条件 e) 表示一种资源分配模式在一个时隙只能分配给一个设备;约束条件 f) 表明 $\mathbf{z}_{u,k}$ 是一个二元变量,也即该问题是一个二元整数规划问题。

3 基于拉格朗日乘数法的能源高效子载波和功率分配算法

资源分配问题(6)是一个组合的非线性优化问题,直接进行求解的复杂度相当高。在设备数量 $U=10$ 、子载波数量 $M=24$ 的情况下,求解资源分配问题(6)将要执行 5.26×10^{12} 次搜索来查找可能的最优子载波分配解。鉴于此,本文提出一种基于拉格朗日乘数法的能源高效的子载波和功率分配算法,仿真结果表明该算法在性能上优于文献[21]提出的启发式算法。

为了便于求解,首先将设备的能源效率转化为如下形式:

$$\tilde{\eta}_{u,k} = \frac{T(\xi P_{u,k} + P_{u,k}^{ckt})}{L_u} \quad (7)$$

从而,资源优化问题(6)变成如下形式:

$$\min_{\mathbf{z}} \sum_{u=1}^U \sum_{k=1}^K \mathbf{z}_{u,k} \tilde{\eta}_{u,k}$$

s. t.

$$a) 0 \leq P_{u,k} \leq P_u^{\max}, \forall u, k$$

$$b) 0 \leq P_{u,m} \leq P_s, \forall u, m$$

$$c) \frac{L_u}{R_{u,k}} \leq T, \forall u, k$$

$$d) \sum_{u=1}^U \sum_{k=1}^K \mathbf{z}_{u,k} A_{m,k}^u = 1, \forall m$$

$$e) \sum_{k=1}^K \mathbf{z}_{u,k} = 1, \forall u$$

$$f) \mathbf{z}_{u,k} \in \{0,1\}, \forall u, k \quad (8)$$

为了在获得较好性能的同时保证算法的计算复杂度,使用基于拉格朗日乘数法的子载波和功率分配算法。问题(8)的拉格朗日函数为:

$$L(\mathbf{z}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\lambda}) = \sum_{u=1}^U \sum_{k=1}^K \mathbf{z}_{u,k} \eta_{u,k} + \sum_{u=1}^U \mu_u (P_u^{\max} - P_{u,k}) + \sum_{m=1}^M \lambda_m (R_{u,k} - \frac{L_u}{T}) \quad (9)$$

其中, $\boldsymbol{\mu}$ 和 $\boldsymbol{\lambda}$ 分别是设备的最大功率约束和最大传输时延约束的拉格朗日乘数向量,其值分别为 $\boldsymbol{\mu} = [\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_U]$, $\boldsymbol{\lambda} = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_U]$; 而 $\mathbf{z}_k = [\mathbf{z}_{1,k}, \mathbf{z}_{2,k}, \dots, \mathbf{z}_{U,k}]^T$ 。由于资源分配矩阵的每一种资源分配模式只能分配给一个设备,因此对于每一种确定的资源分配模式 k , \mathbf{z}_k 的值只能有一个是 1, 其余全部为 0。因此,问题(9)可以简化为:

$$\Gamma_{u,k} = \min \eta_{u,k} + \mu_u (P_u^{\max} - P_{u,k}) + \lambda_u (R_{u,k} - \frac{L_u}{T})$$

$$\begin{aligned}
& \text{s. t.} \\
& \text{a) } 0 \leq P_{u,k} \leq P_u^{\max}, \forall u, k \\
& \text{b) } 0 \leq P_{u,m} \leq P_s, \forall u, m \\
& \text{c) } \frac{L_u}{R_{u,k}} \leq T, \forall u, k
\end{aligned} \quad (10)$$

从而问题(8)的解等价于 $\min_z \Gamma_k$ 的解, 其中 $\Gamma_k = [T_{1,k}, T_{2,k}, \dots, T_{u,k}]^T$. 对 $L(z, P, \mu, \lambda)$ 求 $P_{u,k}$ 偏导并令其为零, 得到:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial L}{\partial P_{u,k}} &= \frac{T\xi}{L_u} + \frac{T\varepsilon B |S_{u,k}| h_{u,k}}{L_u \ln 2 (1 + P_{u,k} h_{u,k})} - \mu_u + \frac{\lambda_u B |S_{u,k}| h_{u,k}}{\ln 2 (1 + P_{u,k} h_{u,k})} \\
&= 0
\end{aligned} \quad (11)$$

其中, $h_{u,k}$ 表示设备 u 在资源分配模式下的信道增益. 对式(11)进行求解, 得到:

$$P_{u,k}^* = \min(\max(\frac{(T\varepsilon + L_u \lambda_u) B |S_{u,k}|}{(\mu_u L_u - T\xi) \ln 2} - \frac{1}{h_{u,k}}, 0), P_u^{\max}) \quad (12)$$

从而得到子载波分配 $z_{u,k}$ 和功率分配 $P_{u,k}$ 的值分别为:

$$\Lambda_0^{-1} = \begin{bmatrix} N(\frac{\mu_1}{2})^2 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & N(\frac{\mu_2}{2})^2 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & N(\frac{\mu_U}{2})^2 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & N(\frac{\lambda_1}{2})^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & N(\frac{\lambda_2}{2})^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & N(\frac{\lambda_U}{2})^2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

则得到椭球为:

$$E(\Lambda^{-1}, v) = \{x | (x-v)^T \Lambda^{-1} (x-v) \leq 1\} \quad (18)$$

在椭球算法中, 每次迭代过程都会由次梯度 d_i 及椭球中心 v_i 生成一个新的椭球, 新椭球的体积刚好在空间上包含上一次迭代所生成椭球的体积的一半. 该过程的数学表示如下:

$$d_{i+1} = \frac{d_i}{\sqrt{d_i^T \Lambda_i^{-1} d_i}} \quad (19)$$

$$v_{i+1} = v_i - \frac{1}{N+1} \Lambda_i^{-1} d_i \quad (20)$$

$$\Lambda_{i+1}^{-1} = \frac{N^2}{N^2-1} (\Lambda_i^{-1} - \frac{2}{N+1} \Lambda_i^{-1} d_i d_i^T \Lambda_i^{-1}) \quad (21)$$

其中, $N=2U$, U 表示 M2M 设备的总数量.

自此, 通过多次迭代便可以求得最优的设备功率. 需要说明的是, 由于子载波和功率分配是同时进行的, 因此变量 (μ, λ) 必须要同时更新.

对于优化问题(6), 当设备量为 U 且子载波数量为 M 时,

其可能的搜索空间为 $\sum_{i=1}^U \binom{U}{i} i! \binom{M-1}{i-1}$, 其搜索次数随着子载波数量和设备数量呈指数增长. 在本文使用的算法中, 计算复杂度主要消耗在利用椭球方法更新拉格朗日参数的过程

$$z_{u,k} = \begin{cases} 1, & u = \arg \min \Gamma_k \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

$$P_{u,k} = \begin{cases} P_{u,k}^*, & u = \arg \min \Gamma_k \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

虽然得到了设备 u 在资源分配模式 k 下的最优功率, 但是这个功率的表达式中包含了拉格朗日变量 μ_u 和 λ_u , 因此需要通过迭代来求解最优的 (μ^*, λ^*) 值, 从而求解最终的 $P_{u,k}$ 最优解. 在本文中, 使用椭球算法^[22]来更新 (μ, λ) 的值. 首先, 需要给出拉格朗日变量的次梯度:

$$d_i(\mu_u) = P_u^{\max} - P_{u,k}, u=1, 2, \dots, U \quad (15)$$

$$d_i(\lambda_u) = R_{u,k} - \frac{L_u}{T}, u=1, 2, \dots, U \quad (16)$$

进而得到 $d_i = [d_i(\mu); d_i(\lambda)]^T$. 得到了每次迭代过程中的次梯度以后, 执行以下操作来更新 (μ, λ) , 首先定义椭球算法的椭球中心 $v = [\mu; \lambda]^T$, 以及椭球形状矩阵 Λ^{-1} . Λ^{-1} 的初值定义为:

中. 对于资源分配问题(6), 考虑 K 种资源分配模式, 每次迭代的计算复杂度为 $O(UK)$, 因为总共有 $2U$ 个拉格朗日乘数变量, 所以需要 $O((2U)^2)$ 次迭代过程^[13], 进而得到总的计算复杂度为 $O(UK(2U)^2)$.

4 仿真分析

本文的仿真平台为 Windows7 操作系统, 仿真环境主要为 MATLAB. 仿真建立在单小区、多用户的 LTE-A 上行通信系统中. 考虑小区内包含 U 个 M2M 用户设备, M2M 设备在基站覆盖范围内均匀分布. 信道模型考虑小尺度瑞利衰落、大尺度路径损耗和阴影衰落. 仿真中设置设备数量为 $U=16$, 子载波数量为 $M=25$, 设备的最大传输功率、静态消耗功率、功率放大器的转换效率以及动态功率消耗系数分别为 200 mW, 50 mW, 1/2 及 800 mW/Mbits, 其他仿真参数为: $B=180$ kHz, $T=0.001$ s, $\sigma^2=10^{-11}$.

图 2 表示的是每个 M2M 设备在每个传输时隙的负载量与系统总的消耗功率之间的关系. 该图和图 3 均是在设备与基站间距离(即基站的覆盖半径)为 1000 m、设备的负载总量为 20~140 bit/TTI 时得到的. 由图 2 可知, 随着 M2M 设备负载的增加, 系统总的消耗功率也在增加, 其根本原因在于,

随着设备负载的增加,为了保证设备的传输时延,设备的传输速率必须要增加,因而传输功率需要增加。由图 2 可知,本文所提算法消耗的总功率低于文献[21]提出的启发式算法消耗的功率,更接近最优算法。

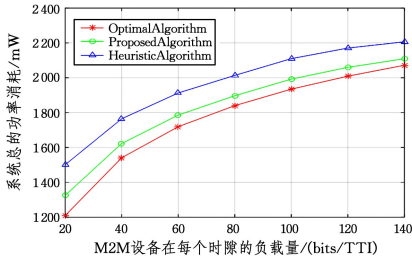


图 2 每个 M2M 设备在每个传输时隙的负载量与系统总的消耗功率之间的关系

Fig. 2 Relationship between load capacity of each M2M device and total power consumed by system

图 3 给出 M2M 设备的传输负载量与系统总的能源效率之间的关系。从图 3 中可知,随着设备负载量的增加,设备所要消耗的功率必须增加,设备传输速率进而跟着增加;但设备功率的消耗并不完全转化在传输速率上,从而使得设备的传输负载增长的幅度超过了传输功率的增长幅度,进一步导致了设备总能源效率的增加。

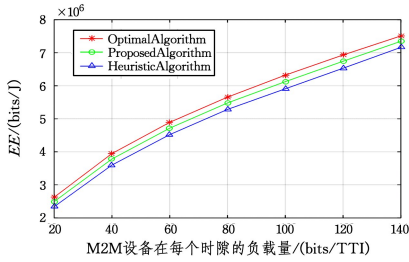


图 3 M2M 设备的传输负载与系统总的能源效率之间的关系

Fig. 3 Relationship between the transmission load of M2M devices and the total energy efficiency of system

图 4 为设备与基站间距离和系统总的功率消耗的性能关系图。该图和图 5、图 6 是在每个 M2M 设备的传输负载量 $L=300$ bit/TTI、基站的覆盖半径为 $200\sim 1000$ m 的变化范围内得到的。

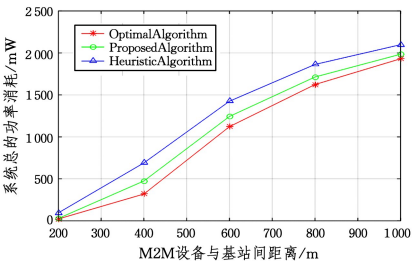


图 4 设备与基站间的距离和系统总的功率消耗的性能关系

Fig. 4 Relationship between devices' distance and performance of total power consumption

由图 3 可知,随着基站覆盖半径的增加,设备的无线信道衰落增加,使得信道增益进一步减小,此时设备为了保证传输

时延,需要增加传输功率。然而设备的功率不会无限增加,仅增加到能够保证设备传输时延即可。随着覆盖半径的增加,信道衰落的幅度超过了传输功率的增长幅度,从而使得设备的传输速率反而是随着信道衰落的增加而减小,即 M2M 设备的传输速率随着基站覆盖半径的增加而减小,如图 5 所示。

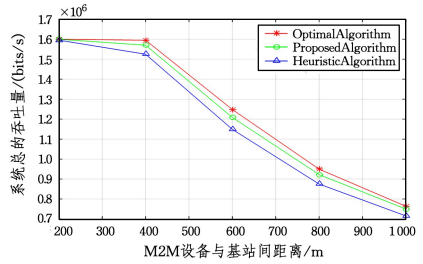


图 5 设备与基站间的距离和系统总的吞吐量的关系

Fig. 5 Relationship between devices' distance and total throughput of system

图 6 表示的是基站的覆盖半径与 M2M 设备的总能源效率之间的关系。从图 6 中可以看出,尽管设备的传输功率随着基站覆盖半径的增加而不断增加,但是传输功率增加到能够保证设备的传输时延以后便不再增加;同时由于 M2M 设备与基站的距离越来越远,使得信道增益不断减小,即设备的总传输速率减小,从而降低了设备总的能源效率。同时可以发现,本文提出的算法在性能上优于启发式算法,也更加接近最优算法。

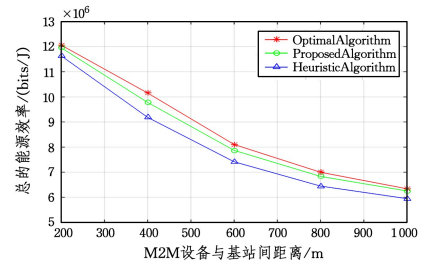


图 6 M2M 设备和基站间的距离与系统总能源效率的关系

Fig. 6 Relationship between devices' distance and total energy efficiency of system

图 7 显示的是在运行相同的次数时,本文算法与直接算法和启发式算法所消耗时间的对比关系。从图 7 中可知,在运行相同次数的情况下,本文提出的算法所消耗的时间尽管多于启发式算法所消耗的时间,但是大幅少于最优算法的时间,表明本文所提算法具有一定的优势。

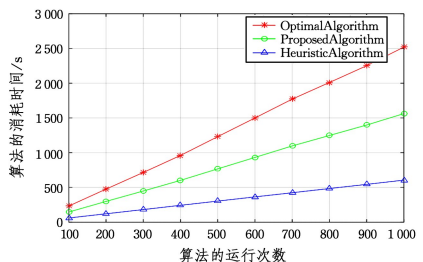


图 7 算法运行次数与所消耗时间的对比

Fig. 7 Comparison of algorithm's running times and consumed time

结束语 本文研究了 LTE-A 网络下能源高效的 M2M 上行子载波和功率分配问题,提出一种基于拉格朗日乘法法的子载波和功率分配方案。该方案以设备的总能效作为优化目标,利用拉格朗日乘法法推导出设备含拉格朗日参数的最优功率以及子载波分配的解;进一步使用椭球方法进行迭代求解,从而得到子载波和功率分配的最终解。仿真结果表明,该算法能够在保证较低复杂度的前提下,获得较接近最优算法的能源效率性能,提高了设备的能源效率。

参 考 文 献

- [1] ANDRES-MALDONADO P, AMEIGEIRAS P, PRADOS-GARZON J, et al. Narrowband IoT Data Transmission Procedures for Massive Machine-Type Communications[J]. *IEEE Network*, 2017, 31(6): 8-15.
- [2] GHAVIMI F, CHEN H H. M2M Communications in 3GPP LTE/LTE-A Networks: Architectures, Service Requirements, Challenges, and Applications[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17(2): 525-549.
- [3] COOPER V, MOLLA A. Conceptualizing Green IT Organizational Learning (GITOL)[C]// 16th Americas Conference on Information Systems, AMCIS 2010. Lima, Peru, 2010.
- [4] DING Y, REN G, SHI G, et al. China's National Assessment Report on Climate Change(Summary)[J]. *World Environment*, 2007, 3(12): 1-5.
- [5] KOUTITAS G. Green network planning of single frequency networks [J]. *Trans Broadcast IEEE*, 2010, 56(4): 541-550.
- [6] CHEN Y, ZHANG S, XU S, et al. Fundamental trade-offs on green wireless networks[J]. *Communications Magazine IEEE*, 2011, 49(6): 30-37.
- [7] MYUNG H G, LIM J, GOODMAN D J. Single carrier FDMA for uplink wireless transmission[J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2007, 1(3): 30-38.
- [8] TSIROPOULOU E E, KAPOUKAKIS A, PAPAVALASSILIOU S. Uplink resource allocation in SC-FDMA wireless networks: A survey and taxonomy[J]. *Computer Networks*, 2016, 96(C): 1-28.
- [9] XIA N, CHEN H H, YANG C S. Radio Resource Management in Machine-to-Machine Communications-A Survey [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2006, PP(99): 1-1.
- [10] RODOPLU V, MENG T H. Bits-per-Joule Capacity of Energy-Limited Wireless Networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2007, 6(3): 857-865.
- [11] ZHANG G, LI A, YANG K, et al. Optimal Power Control for Delay-Constraint Machine Type Communications Over Cellular Uplinks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(6): 1168-1171.
- [12] RIGAZZI G, PRATAS N K, POPOVSKI P, et al. Aggregation and trunking of M2M traffic via D2D connections[C]// *IEEE International Conference on Communications*. IEEE, 2015: 2973-2978.
- [13] GHAVIMI F, LU Y W, CHEN H H. Uplink Scheduling and Power Allocation for M2M Communications in SC-FDMA based LTE-A Networks with QoS Guarantees[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, PP(99): 1-1.
- [14] AIJAZ A, TSHANGINI M, NAKHAI M R, et al. Energy-Efficient Uplink Resource Allocation in LTE Networks With M2M/H2H Co-Existence Under Statistical QoS Guarantees[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2014, 62(7): 2353-2365.
- [15] ZHANG G, LI A, YANG K, et al. Energy-Efficient Power and Time-Slot Allocation for Cellular-Enabled Machine Type Communications[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(2): 368-371.
- [16] TANG J, SO D K C, ALSUSA E, et al. Resource Allocation for Energy Efficiency Optimization in Heterogeneous Networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2015, 33(10): 2104-2117.
- [17] TANG J, SO D K C, ZHAO N, et al. Energy Efficiency Optimization with SWIPT in MIMO Broadcast Channels for Internet of Things[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2017, PP(99): 1-1.
- [18] MYUNG H G, LIM J, GOODMAN D J. Single carrier FDMA for uplink wireless transmission[J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2007, 1(3): 30-38.
- [19] WONG I C, OTERI O, MCCOY W. Optimal resource allocation in uplink SC-FDMA systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(5): 2161-2165.
- [20] ISHEDEN C, FETTWEIS G P. Energy-Efficient Multi-Carrier Link Adaptation with Sum Rate-Dependent Circuit Power[C]// *Global Telecommunications Conference*. IEEE, 2010: 1-6.
- [21] ORAKZAI F A, AHMAD A, KHAN M T R, et al. Optimal energy-efficient resource allocation in uplink SC-FDMA networks: ORAKZAI et al[J]. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2017, 28(8): e3153.
- [22] STEPHEN B. Lecture Slides on Class EE364b of Stanford: Ellipsoid Method (Version 1.0) [EB/OL]. <http://www.stanford.edu/class/ee364b/lectures.html>.