

DOI: 10.13382/j.jemi.B2003763

# 高原山区 D2D 网络能量效率优化算法研究\*

彭 艺 付晓霞 刘煜恒 安浩杰

(昆明理工大学 信息工程与自动化学院 昆明 650500)

**摘要:**针对高原山区丰富植被和山地丘陵给通信用户带来严重的路径损耗,增加通信系统能耗问题,提出一种基于能量效率(energy efficiency, EE)的优化算法。首先,利用多峰绕射模型模拟高原山区电波传输损耗,在保证通信用户服务质量(quality of server, QoS)的前提下,最大化系统中端到端(D2D)用户设备的总能量效率,将优化问题分解为功率控制和信道选择两个子问题进行求解;其次,利用拉格朗日对偶和 Dinkelbach 算法联合解决功率控制;最后,利用 Gale-Shapley 匹配算法实现信道匹配。仿真结果表明,与现有算法相比,本文算法能够有效约束同频干扰,增加系统内信道资源利用率,提高系统的能量效率,降低系统能耗,提高系统性能。

**关键词:**高原山区;能量效率;功率控制;信道选择

**中图分类号:** TN925 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510

## Research on energy efficiency optimization algorithm of D2D network in plateau and mountain area

Peng Yi Fu Xiaoxia Liu Yuheng An Haojie

(Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

**Abstract:** In view of the abundant vegetation and mountainous hills in the plateau and mountainous areas, which cause serious path loss to communication users, increase the energy consumption of communication systems. This paper proposes an optimization algorithm based on energy efficiency (EE). First, the multi-peak diffraction model is used to simulate the transmission loss of radio waves in the plateau and mountainous areas. Under the premise of ensuring the quality of server (QoS) for communication users, the total energy efficiency of the D2D user equipment in the system is maximized, and the optimization problem is decomposed into power. Two sub-problems of control and channel selection are solved. Secondly, the Lagrangian duality and Dinkelbach algorithm are used to jointly solve the power control. Finally, on the basis of power control, the Gale-Shapley matching algorithm is used to achieve channel matching. The simulation results show that compared with the existing algorithms, the proposed algorithm can effectively restrain co-channel interference, increase the utilization of channel resources in the system, improve the energy efficiency of the system, reduce system energy consumption, and improve system performance.

**Keywords:** plateau mountainous; energy efficiency; power allocation; channel allocation

## 0 引言

端到端(device-to-device, D2D)通信技术作为 5G 通信的核心技术之一,在 D2D 网络中临近设备直接交换信息无需基站中转,减轻基站负载,减少传输时延<sup>[1]</sup>。将 D2D 技术引入高原山区无线通信系统中,不仅可以提高

频谱资源利用率,还可以提高系统的能量效率<sup>[2]</sup>。高原山区由于独特的地理环境和气候特征形成了丰富的植被和复杂的山地丘陵,成为了无线电波传输的障碍物,降低了网络覆盖率,增加了信号在传输过程中的损耗,使得整个通信环境的系统能耗巨大。有限的设备电池容量和不断增加的能耗相互矛盾,如何抑制通信网络的干扰,降低能耗,提高能量效率,实现节能绿色通信是未来 5G 通信

发展的关键。

在 D2D 蜂窝通信系统中,通过中继选择、功率控制、模式选择、信道分配、等多方面降低通信系统干扰,优化系统能量效率,降低系统能耗。文献[2]提出一种基于协作移动云的内容分发框架下,最大化蜂窝系统的传输速率,利用注水分割数据算法实现功率控制,增加系统能量效率。文献[3]将模式选择引入到 D2D 通信中,从而实现最小化功耗和用户数据速率需求之间实现平衡,最大化通信链路的能量效率。文献[4]提出一种 D2D 发现最大化迭代算法,将半双工工作状态切换到全双工,利用开环功率控制进行无线通信资源分配。文献[5]提出一种基于能量效率构建通信链路二分图,利用盖尔-沙普利算法实现 D2D 用户设备 (device-to-device user equipments, DUE<sub>s</sub>) 复用蜂窝用户设备 (cellular user equipments, CUE<sub>s</sub>) 占用的信道资源。文献[6]将能量采集技术 (energy harvesting, EH) 引入到 D2D 通信中,利用能量优化算法实现通信系统的时隙分配、功率和频谱分配。文献[7]利用基于 Lambert W 函数的功率控制算法,最大化单个 D2D 对的能量效率,最大程度地提高蜂窝用户的信噪比和 D2D 对总能量效率。文献[8]在蜂窝通信场景下行链路 (down link, DL) 中,利用高能效的迭代算法实现信道分配和联合功率控制提高 D2D 通信能量效率。

上述文献主要研究受自由空间传播损耗影响的 D2D 能效优化问题。高原山区蜂窝通信系统与普通蜂窝通信系统不同之处,在高原山区通信信号在传播过程中受到茂盛的植被和连绵不断的高山丘陵岩石阻挡,使得无线电信号在传输过程中不断的反射、绕射、散射、衍射等问题,严重影响通信网络覆盖率,增加信号干扰,降低通信质量,增加通信系统的能耗。本文主要研究受高原山区的植被和山区丘陵环境影响,对通信用户产生严重的路径损耗,利用多峰绕射模型模拟高原山区电波传输损耗。针对多对 DUE<sub>s</sub> 复用单个 CUE 占用的信道资源时,其他 DUE 对正在通信的 DUE 存在同频干扰问题,利用功率控制和信道分配联合降低干扰,最大化 DUE 的能量效率,从而增加高原山区蜂窝通信系统的能量效率。首先,将能量效率优化问题解耦为功率控制和信道分配两个相关子问题进行求解,最大化系统的能量效率,降低系统能耗。其次,利用拉格朗日和 Dinkelbach 算法实现联合功率控制,降低同频干扰问题。最后,利用 Gale-Shapley 匹配算法实现信道匹配问题。仿真结果表明,本文所提算法,能在保证通信用户的 QoS 的前提下,有效抑制干扰,提高信道资源利用率,增加用户的能量效率,降低系统能耗。

## 1 系统模型

假设在单位蜂窝通信小区中,以资源块 (resource block, RB) 作为最小的资源分配单位,数量为  $M$ 。存在  $I$  个 CUEs、 $J$  对 DUEs,其中,一对 DUE 包含一个 DUE 发射端 (DUE transmitter, DT) 和一个接收端 (DUE receiver, DR)。蜂窝用户集合表示为  $X = \{1, 2, \dots, I\}$ , D2D 用户集合表示为  $Y = \{1, 2, \dots, J\}$ , RB 集合表示为  $M = \{1, 2, \dots, N\}$ 。CUE <sub>$i$</sub>  占用全部的通信资源 RB <sub>$m$</sub> , DUE <sub>$j$</sub>  用户复用 CUE <sub>$i$</sub>  占用的通信资源系统内的全负载网络<sup>[9]</sup>。系统模型如图 1 所示,在系统内 DUEs 和 CUEs 服从随机分布,系统演进型基站能够获取通信系统中各个通信链路的通信状态及通信用户的 QoS 需求。

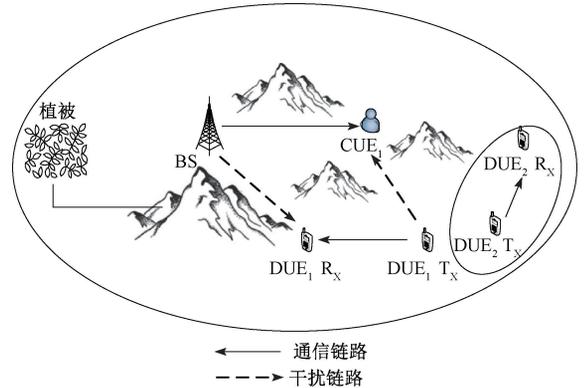


图1 高原山区系统

Fig. 1 Plateau mountain system

DUE 和 CUE 的自由空间路径损耗表示为<sup>[10]</sup>:

$$L_i = 128.1 + 37.6 \lg(d_i) \quad (1)$$

$$L_j = 148 + 40 \lg(d_j) \quad (2)$$

式中:  $d_i$  是 CUE <sub>$i$</sub>  到基站的距离;  $d_j$  是 DT 和 DR 之间的距离。

在高原山区中发射机与接收机之间中山峰林立,树木丛生对无线信号的传输产生巨大的阻碍,无线信号绕过障碍物传播到阴影区,根据于障碍物形状的差异,可以将绕射分为:单刃峰绕射、单圆峰绕射以及多峰绕射<sup>[11]</sup>。根据 GB/T 14617.1-2012 标准计算山地丘陵、林区的路径损耗<sup>[12]</sup>,本文采用 Deygout 等效方法计算多峰绕射损耗<sup>[13]</sup>,路径传输损耗为:

$$L = L_{cd} + L_{ref} \quad (3)$$

式中:  $L_{cd}$  为自由空间传播损耗;  $L_{ref}$  为多峰绕射损耗<sup>[13]</sup>。

在下行链路中, CUE <sub>$i$</sub>  的信干噪比 (signal to interference plus noise ratio, SINR) 为:

$$\gamma_i^c = \frac{P_{BS,i} G_{BS,i}}{I_{j,i,m} + \sigma^2} \quad (4)$$

式中:  $P_{BS,i}$  表示  $CUE_i$  用户接收到基站的发射功率;  $G_{BS,i}$  表示基站与蜂窝用户  $CUE_i$  间的链路增益;  $I_{j,i,m} = \sum_{j \in Y, i \in X, m \in M} \psi_{j,i,m} P_{j,i,m} G_{j,i}$  是  $DUE_j$  发射端对蜂窝用户  $CUE_i$  产生的干扰;  $P_{j,i,m}$  表示  $DUE_j$  与  $CUE_i$  复用同一  $RB_m$  的传输功率;  $G_{j,i}$  表示  $DUE_j$  发射端到  $CUE_i$  的信道增益;  $\sigma^2$  是热噪声功率。二进制变量  $\psi_{j,i,m}, \psi_{j,i,m} \in \{0,1\}$ , 当在同一信道中  $CUE_i$  和  $DUE_j$  共享同一资源块  $RB_m$  时,  $\psi_{j,i,m} = 1$ , 反之,  $\psi_{j,i,m} = 0$ 。

$DUE_j$  接收端的 SINR 为:

$$\gamma_j^D = \frac{P_{j,i,m} G_{j,i}}{I'_{j,i,m} + I_{l,i,m} + \sigma^2} \quad (5)$$

式中:  $G_{j,i}$  表示  $DUE_j$  发射端与接收端之间的传输信道增益;  $I_{l,i,m} = \sum_{l \in Y, l \neq j, i \in X} P_{l,i,m} G_{l,i,m}$  表示正在通信的  $DUE_j$  受到其他  $DUE_l$  的干扰,  $P_{l,i,m}$  表示  $DUE_l$  与  $CUE_i$  复用同一  $RB_m$  的传输功率,  $I'_{j,i,m} = \sum_{j \in Y, i \in X, m \in M} \psi_{j,i,m} P_{BS,i} G_{BS,j}$  是基站对  $DUE_j$  接收端的干扰,  $G_{BS,j}$  是基站到  $DUE_j$  接收端的信道增益,  $G_{l,i,m}$  是  $DUE_l$  发射端到  $DUE_j$  接收端的信道增益。

在单个蜂窝小区中,  $DUE_j$  的总传输速率等于访问网络中所有 CUE 的总和<sup>[7]</sup>,  $DUE_j$  的传输速率为:

$$R_D = Blb(1 + \gamma_j^D) \quad (6)$$

$CUE_i$  传输速率为:

$$R_C = Blb(1 + \gamma_i^C) \quad (7)$$

式中:  $B$  表示信道带宽。

## 2 优化问题描述

要解决的优化问题如下:当 DUE 复用 CUE 占用的信道资源时,如何在抑制未通信  $DUE_j$  对处于通信状态的  $DUE_j$  的干扰,同时提高 DUE 的能量效率?为了解决这个问题,本研究在确保通信用户的 QoS 的前提下,降低耦合性,将优化问题分解功率控制和信道分配求解,从而降低通信链路间的相互干扰,提高系统的能量效率。 $DUE_j$  的总能量效率为总传输速率与总功率损耗的比值<sup>[14]</sup>:

$$\eta_{EE} = \frac{R_D}{P_T + 2 \sum_{j=1}^J P_0} \quad (8)$$

式中:  $P_0$  表示单个设备的电路功率损耗。  $P_T = \sum_{l \in Y, l \neq j, i \in X} P_{l,i,m} + \sum_{j \in Y, i \in X, m \in M} \psi_{j,i,m} P_{j,i,m}$  表示所有 DUE 的传输功率。

为确保通信用户的 QoS,增加通信环境资源的利用率,最大化系统的能量效率,提高网络性能。以 DUE 的能量效率作为目标函数,表示为:

$$\max_{P_{j,i,m}, \psi_{j,i,m}, P_{l,i,m}, P_{BS,i}} \eta_{EE} = \frac{R_D}{P_T + 2 \sum_{j=1}^J P_0} \quad (9)$$

$$\sum_{j \in Y, m \in M} \psi_{j,i,m} \leq 1, \forall i \quad (10)$$

$$\psi_{j,i,m} \in \{0,1\} \forall j,i,m \quad (11)$$

$$0 \leq P_{j,i,m} \leq P_{max}^D, \forall j \in Y \quad (12)$$

$$0 \leq P_{l,i,m} \leq P_{max}^D, l \neq j, \forall l \in Y \quad (13)$$

$$0 \leq P_{BS,i} \leq P_{max}^C, \forall i \in X \quad (14)$$

$$R_C \geq R_{min}^C \quad (15)$$

$$R_D \geq R_{min}^D \quad (16)$$

其中,约束条件(10)表示  $DUE_j$  当且仅当与一个  $CUE_i$  共享同一个  $RB_m$  资源;约束条件(11)表示信道分配为 0/1 规划问题;约束条件(12)、(13)表示 DUE 传输功率的限制,  $P_{max}^D$  表示 DUE 最大传输功率;约束条件(14)表示 CUE 传输功率的限制,  $P_{BS,i}^C$  表示 CUE 最大传输功率;约束条件(15)表示 CUE 通信链路的传输速率限制,  $R_{min}^C$  表示 CUE 通信链路的最低传输速率;;约束条件(16)表示 DUE 通信链路的传输速率限制,  $R_{min}^D$  表示 DUE 通信链路的最低传输速率;

由式(9)效率函数和约束条件(10)~(16)可以看出,优化问题是一个具有 MINLP (mixed integer non-linear programming, MINLP) 属性的 NP-hard (non-deterministic polynomial hard, NP-hard) 问题<sup>[15-16]</sup>, 无法采用直接求解解决优化问题。若在系统内采用遍历求解,整个过程时间开销巨大,故为降低算法复杂,减少时间开销,所以将能效优化问题分解为两个子问题进行求解。在本文中,将能效优化建模成整数线性规划问题,将其解耦为功率控制和信道分配两个子问题分别进行求解。由于信道分配的参数与信道状态、传输速率、通信质量相关,故选择状态良好的信道分配给用户设备。

## 3 功率控制和信道分配算法

### 3.1 功率控制

当且仅当  $DUE_j$  与一个  $CUE_i$  共享同一个  $RB_m$  资源, 则  $\psi_{j,i,m} = 1$ ,  $DUE_j$  的能量效率优化问题为:

$$\max_{P_{j,i,m}, P_{l,i,m}, P_{BS,i}} \eta_{EE} = Blb \left( 1 + \frac{P_{j,i,m} G_{j,i}}{\sum_{j \in Y, i \in X} P_{BS,i} G_{BS,j} + \sum_{l \in Y, l \neq j, i \in X} P_{l,i,m} G_{l,i,m} + \sigma^2} \right) \quad (17)$$

$$\sum_{l \in Y, l \neq j, i \in X} P_{l,i,m} + \sum_{j \in Y, i \in X, m \in M} P_{j,i,m} + 2 \sum_{j=1}^J P_0$$

s. t. 式(12) ~ (16)

$$0 \leq P_{j,i,m} \leq P_{j,i,m}^{th} \quad (18)$$

由式(17)可得,能效函数随着  $P_{BS,i}$  的减小而减小,为最大化 DUE 通信链路间的能量效率,所以  $P_{BS,i}$  需要取最小值。联合约束条件(14)和(15),得到 CUE 的最小传输功率为<sup>[17]</sup>:

$$P_{BS,i}^{min} = \min \left\{ P_{max}^D, \frac{(2^{\frac{R^C}{B}} - 1) (P_{max}^D G_{j,i})}{G_{BS,i}} \right\} \quad (19)$$

联合式(6)、(19)和约束条件(12)、(15),当 DUE<sub>j</sub>对复用 CUE<sub>i</sub>的通信资源时,DUE 传输功率的上界为:

$$P_{j,i,m}^{th} = \min \left\{ P_{max}^D, \frac{P_{BS,i}^{min} G_{BS,i}}{(2^{\frac{R^C}{B}} - 1) G_{j,i}} - \frac{\sigma^2}{G_{j,i}} \right\} \quad (20)$$

将式(19)代入目标函数中,由于优化问题(17)是一个分数形式的非凸函数,利用 Dinkelbach 算法将其转换为等价的凸函数<sup>[18]</sup>,DUE 最大能效为:

$$\arg \max_{P_{j,i,m}, P_{l,i,m}, P_{BS,i}} \eta_{EE} = \text{Blb} \left( 1 + \frac{P_{j,i,m}^* G_{j,i,r}}{\sum_{j \in Y, i \in X} P_{BS,i} G_{BS,j} + \sum_{l \in Y, l \neq j, i \in X} P_{l,i,m} G_{l,i,m} + \sigma^2} \right) \quad (21)$$

依据文献<sup>[13]</sup>的引论1,在约束条件不变的情况下, $E_s^*$ 表示 DUE 的能量效率值,将效应函数由分数形式转为减法形式目标函数:

$$E_s^* = \max \left\{ \text{Blb} \left( 1 + \frac{P_{j,i,m}^* G_{j,i,r}}{\sum_{j \in Y, i \in X} P_{BS,i} G_{BS,j} + \sum_{l \in Y, l \neq j, i \in X} P_{l,i,m} G_{l,i,m} + \sigma^2} \right) - E_s^* \left( \sum_{l \in Y, l \neq j, i \in X} P_{l,i,m} + \sum_{j \in Y, i \in X, m \in M} P_{j,i,m}^* + 2 \sum_{j=1}^J P_0 \right) \right\} \quad (22)$$

s. t. 式(16)和(18)

利用拉格朗日对偶解决凸优化问题,采用迭代法计算,从而获取的  $E_s^*$  值。本文依据式(22)和约束条件,定义拉格朗日函数为:

$$L(P_{j,i,m}, \vartheta_j, \beta_j) = \text{Blb} \left( 1 + \frac{P_{j,i,m} G_{j,i,r}}{\sum_{j \in Y, i \in X} P_{BS,i} G_{BS,j} + \sum_{l \in Y, l \neq j, i \in X} P_{l,i,m} G_{l,i,m} + \sigma^2} \right) - E_s' \left( \sum_{l \in Y, l \neq j, i \in X} P_{l,i,m} + \sum_{j \in Y, i \in X, m \in M} P_{j,i,m} + 2 \sum_{j=1}^J P_0 \right) - \vartheta_j (P_{j,i,m}^{th} - P_{j,i,m}) + \beta_j \left[ \text{Blb} \left( 1 + \frac{P_{j,i,m} G_{j,i,r}}{\sum_{j \in Y, i \in X} P_{BS,i} G_{BS,j} + \sum_{l \in Y, l \neq j, i \in X} P_{l,i,m} G_{l,i,m} + \sigma^2} \right) - R_{min}^D \right] \quad (23)$$

其中,  $\vartheta_j$  和  $\beta_j$  表示拉格朗日乘子有关,式(17)仅与拉格朗日乘子有关。 $E_s'$  为上一次迭代的能量效率函数数值,迭代次数为  $(n-1)$ ;

由库恩塔克(Karush-Kuhn-Tunker, KKT)条件,可得 DUE 的最优传输功率为:

$$P_{j,i,m}^* = \left| \frac{(1 + \beta_j) \left( \sum_{k \in Y, k \neq l, i \in X} P_{l,i,m} + P_{BS,i}^{min} G_{BS,j} + \sigma^2 \right)}{\sum_{l \in Y, l \neq j, i \in X} P_{l,i,m} G_{l,i,m} (1 + \vartheta_l + E_s')} + \frac{\vartheta_j + E_s'}{B} \ln 2 \right|^+ \quad (24)$$

其中,  $|x|^+ = \max\{0, x\}$ 。本文采用次梯度算法对  $\vartheta_j$  和  $\beta_j$  进行迭代更新:

$$\vartheta_j^{(n+1)} = |\vartheta_j^{(n)} - \nu_\vartheta (P_{j,i,m} - P_{j,i,m}^{th})|^+ \quad (25)$$

$$\beta_j^{(n+1)} = |\beta_j^{(n)} - \nu_\beta (R_D - R_{min}^D)|^+ \quad (26)$$

式中:  $\nu_\vartheta$  和  $\nu_\beta$  表示  $\vartheta_j$  和  $\beta_j$  的迭代步长;  $n$  表示迭代次数。

综上所述,本文采用拉格朗日对偶函数求解受最低传输速率限制的功率控制问题,具体的算法步骤如表1所示。

表1 D2D 功率控制算法

Table 1 D2D power control algorithm

输入: $G_{j,i,r}, G_{BS,i}, G_{l,i,m}, \sigma^2, B, P_{max}^D, P_{max}^C, R_{min}^C, R_{min}^D$
输出: $E_s^*, P_{j,i,m}^*$
1) 初始化: $n = 1; E_s' = E_s(0); \vartheta_j^{(1)}, \beta_j^{(1)}; \nabla_1$ 为迭代误差;
2) for $\forall i \in X, j \in Y$
3) $n \rightarrow n + 1$
4) 根据式(20)~(25)计算 DUE <sub>j</sub> 传输功率 $P_{j,i,m}^*$ ; 根据(19)计算 $E_s^*$ ;
5) if $ E_s(n) - E_s(n-1)  < \nabla_1$ then
6) $P_{j,i,m}^* =$
$\left  \frac{(1 + \beta_j) \left( \sum_{k \in Y, k \neq l, i \in X} P_{l,i,m} + P_{BS,i}^{min} G_{BS,j} + \sigma^2 \right)}{\sum_{l \in Y, l \neq j, i \in X} P_{l,i,m} G_{l,i,m} (1 + \vartheta_l + E_s')} + \frac{\vartheta_j + E_s'}{B} \ln 2 \right ^+$
7) end
8) end for
9) end for
10) return $P_{j,i,m}^*, \forall i \in X, j \in Y, m \in M$

### 3.2 信道选择

在3.1节,利用功率控制,获得 DUE<sub>j</sub>当复用 CUE<sub>i</sub>占用信道资源  $RB_m$  的最大能量效率,本节采用 Gale-Shapley 匹配算法根据 DUE 的优先级为 DUE<sub>j</sub> 分配合适的信道资源,最大化系统能量效率。根据功率控制获得权力矩阵  $J \times I$  的权重矩阵  $T$ ,利用功率控制获得 DUE 的最优传输功率  $P_{j,i,m}^*$ ,则 DUE 的优先级:

$$\gamma_j^D = \frac{P_{j,i,m}^* G_{j,i,r}}{I'_{j,i,m} + I_{l,i,m} + \sigma^2} \quad (27)$$

Gale-Shapley 信道匹配算法,具体算法步骤如表2所示。

表 2 Gale-Shapley 匹配算法

Table 2 Gale-Shapley matching algorithm

输入:  $G_{j,i}, G_{BS,i}, G_{l,i,m}, \sigma^2, B, P_{j,i,m}^*$   
 输出:  $\psi_{j,i,m}$

- 1)  $\forall i \in X, j \in Y$  的矩阵  $T$ ;
- 2) 利用式 (25) 按照优先级的降序为  $DUE_j$  分配  $CUE_i$  占用信道资源  $RB_m$ ;
- 3) for  $m = 1$  to  $M$
- 4) set  $\psi_{j,i,m} = 1$ ;
- 5) end for
- 6) Return  $J \times I \times M$  的三维 0/1 矩阵  $D$ ; // 输出所有复用因子的三维矩阵

### 4 仿真结果与分析

采用 MATLAB 作为本文所提算法的仿真实验平台。其中,高原山区的平均海拔在 2 000 m 以上,根据文献[13]的高海拔绕射损耗模型,路径绕射损耗的波动范围为 175~275 dB。蜂窝小区的通信半径为 500 m,主要研究采用多峰衰落模型模拟高原山区路径损耗作为通信干扰因素,通信链路间的阴影衰落是服从均值为 0,方差为 10 和 12 dB 的对数正态分布。本文其余仿真参数如表 3 所示。

表 3 系统仿真参数

Table 3 System simulation parameters

参数	数值
CUEs 数量	5~25
DUEs 数量	5~50
RB 频谱带宽/kHz	180
多峰绕射损耗 $L_{ref}$ /dB	175~275
噪声谱密度/( $\text{dBm} \cdot \text{Hz}^{-1}$ )	-174
$R_{min}^C$ /( $\text{Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$ )	0.9
$R_{min}^D$ /( $\text{Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$ )	0.9
CUE 传输最大功率/dBm	24
DUE 传输最大功率/dBm	15
电路功率损耗 $P_0$ /mW	50
路径损耗因子	6

图 2 所示为受山区路径损耗影响,山区环境蜂窝环境和普通蜂窝环境的 SINR 累计分布函数图(cumulative distribution function, CDF)。可以看出普通蜂窝系统中通信用户的 SINR 高于高原山区通信系统,由于高原山区的平均海拔在 20 000 m,特殊的地貌,使得通信用户的传输总路径损耗远远大于普通蜂窝通信系统,使得通信干扰增加,通信质量降低,系统内用户的 SINR 降低。

DUE 总能量效率的累计分布函数曲线如图 3 所示。由图 3 可知,与随机算法<sup>[5]</sup>、文献[5,7]算法比较,本文

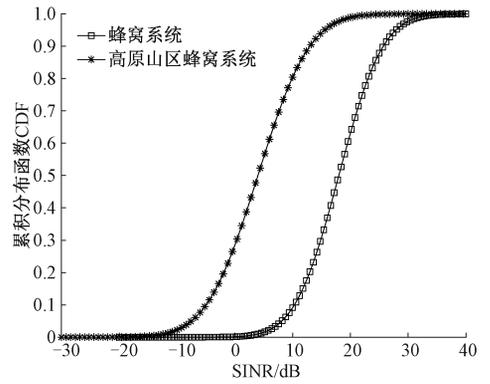


图 2 不同干扰环境下的 SINR 累计分布函数

Fig. 2 SINR cumulative distribution function diagram under different interference environments

所提能够有效提高系统中 DUE 总能量效率,且比随机算法约提高 25%,比文献[5]算法约提高 7%,比文献[8]算法约提高 2%。虽然由于环境因素增加了系统干扰,但本文所提算法能够有效的控制通信用户的同频干扰,降低通信用户相互间的干扰,增加系统内 DUE 用户的总能量效率。本文所提算法优于 3 种对比算法的原因是本文所提算法通过功率控制确保通信用户质量,通过信道分配优化用户资源分配,从而使能量效率增加,降低系统能耗。

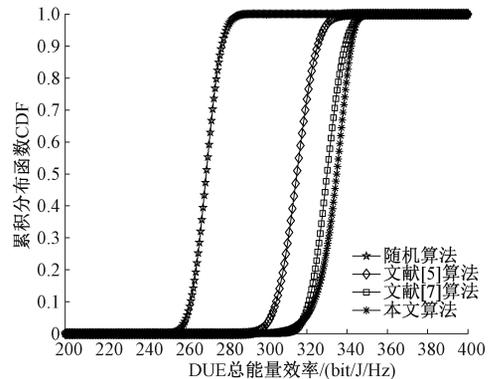


图 3 DUE 总能量效率 CDF 曲线

Fig. 3 DUE total energy efficiency CDF curve

DUE 总能效与 DUE 对传输距离的关系曲线如图 4 所示,4 种算法的 DUE 总能量效率随着 DUE 对传输端和接收端的通信距离不断增大而减小。当 DUE 对的传输端到发送端的距离不断增大时,DUE 链路间的路径损耗随着增加,为了确保通信用户的 QoS,需要增加 DUE 发送端的发射功率,从而降低了能量效率。当 DUE 对发送端到接收端的最大传输距离为 60 m 时,本文所提算法比随机算法约提高了 22%,比文献[5]约提高了 9%,比文献[7]约提高了 2%。与另外 3 种算法对比,仿真结果表明,本文所提算法能够有效获得最优能量效率。

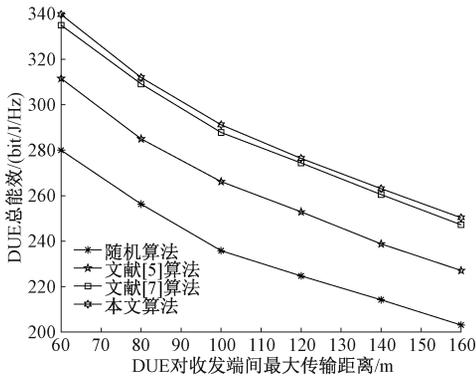


图4 DUE 总能效与 DUE 对收发端间最大传输距离的关系曲线

Fig. 4 The relationship curve between the total energy efficiency of DUE and the maximum transmission distance between DUE and transceiver

不同算法下 DUE 总能效与 DUE 数量关系曲线如图 5 所示, DUE 总能量效率随着系统内 DUE 数量的增加而先增加后减小。由于在 DUE 数量较少时, 系统内的信道资源占用率低, 可选择的信道资源较多, 系统内的用户获得的能量效率也较大; 而随着系统内 DUE 数量的不断增加, 信道资源紧缺, 导致系统内一些受干扰影响较大的 DUE 的速率低于最低速率要求, 系统内的能量效率也随之降低。在 DUE 数量同等的条件下, 本文所提算法比随机算法约提高了 39%, 比文献[5]算法约提高了 23%, 比文献[7]约提高了 4%, 对比一对 DUE 用户复用一个 CUE 用户占用的信道资源<sup>[7]</sup>, 多对 DUE 用户复用一个 CUE 用户占用的信道资源<sup>[5]</sup>两种复用场景, 本文所提算法有效提高系统内 DUE 的能量效率, 降低系统损耗, 从而提高系统总能效。

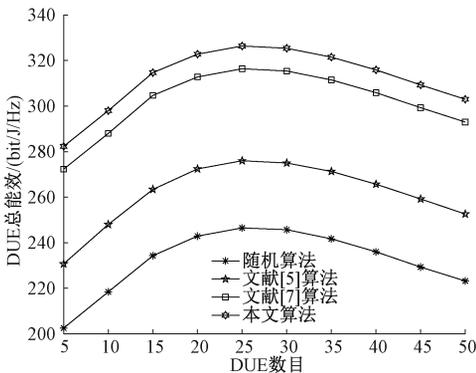


图5 DUE 总能效与 DUE 数量关系曲线

Fig. 5 The relationship between the total energy efficiency of DUE and the number of DUE

DUE 总能效随 CUE 数量变化的关系曲线如图 6 所示。随着 CUE 数量的增加, 系统中 CUE 总能效呈现先

增加后趋于平缓的趋势。随机算法基本趋于一条直线, 波动不大, 由于信道资源是随机分配, 没有择优选择, 无法增加系统能效。本文所提算法、文献[5,7]算法, 为通信用户设备选择合理的信道资源, 增加了资源利用率, 从而增加系统能效, 降低系统能耗。当  $I = 22$  时, 本文所提算法比随机算法约提高了 41%, 比文献[5]约提高了 9%, 比文献[7]约提高了 1%。

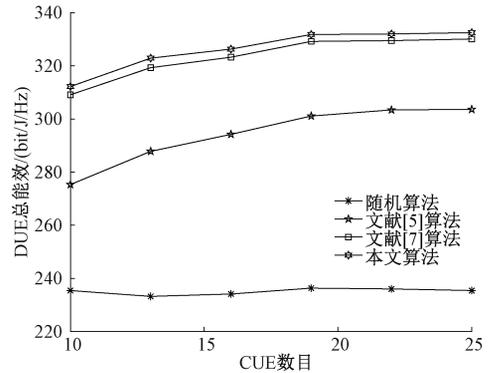


图6 DUE 总能效与 CUE 数量关系曲线

Fig. 6 The relationship between the total energy efficiency of DUE and the number of CUEs

### 5 结论

本文主要研究受高原山区丰富植被和山地丘陵给通信用户带来严重的路径损耗, 利用多峰绕射模型模拟高原山区电波传输损耗。多对 DUE 复用单一 CUE 占用的信道资源。提出了一种基于能量效率的功率控制与信道选择联合优化系统能量效率的优化算法。首先, 在确保通信用户 QoS 的前提下, 利用拉格朗日和 Dinkelbach 算法实现联合功率控制, 抑制环境带来的路径损耗, 降低同频干扰问题, 增加系统能效。其次, 利用 Gale-Shapley 匹配算法实现信道匹配问题, 提高信道资源利用率, 增加系统能效, 降低系统能耗。下一步工作, 将研究受植被衰落影响下的高原山区资源分配和干扰抑制。

### 参考文献

[ 1 ] HOANG T D, LE L B, LE-NGOC T. Energy efficient resource allocation for D2D communications in cellular networks [ J ]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(9) : 6972-6986.

[ 2 ] HUANG J, HUANG C, XING C C, et al. An energy-efficient communication scheme for collaborative mobile clouds in content sharing: Design and optimization [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(10) : 5700-5707.

[ 3 ] GALANOPOULOS A, FOUKALAS F, KHATTAB T. Energy efficient spectrum allocation and mode selection

- for d2d communications in heterogeneous networks [J]. IEEE Transactions on Signal and Information Processing over Networks, 2020(6):382-393.
- [4] KALEEM Z, QADRI N N, DUONG T Q, et al. Energy-efficient device discovery in d2d cellular networks for public safety scenario[J]. IEEE Systems Journal, 2019, 3(3):2716-2719.
- [5] ZHOU Z, OTA K, DONG M, et al. Energy-efficient matching for resource allocation in D2D enabled cellular networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(6): 5256-5268.
- [6] KUANG Z, LIU G, LI G, et al. Energy efficient resource allocation algorithm in energy harvesting-based D2D heterogeneous networks [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019,6(1):557-567
- [7] LIU S, WU Y, LI L, et al. A two-stage energy-efficient approach for joint power control and channel allocation in d2d communication[J]. IEEE Access, 2019, 7: 16940-16951.
- [8] HU J, HENG W, LI X et al. Energy-Efficient resource reuse scheme for D2D communications underlying cellular networks [J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(9): 2097-2100.
- [9] BHARDWAJ A, AGNIHOTRI S. Energy- efficiency and spectral-efficiency trade-off for D2D-multicasts in underlay cellular networks [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2018,4(7):546-549.
- [10] 王昆, 杨永钦, 龙云亮, 等. 多刃峰环境无线电波传播损耗的双向抛物方程法[J]. 电波科学学报, 2011, 6(26):1058-1064.
- WANG K, YANG Y Q, LONG Y L, et al. Two-way parabolic equation approach for modeling radio wave propagation in the presence of multiple knife edges[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2011, 6(26): 1058-1064.
- [11] ITU-R. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-advanced[R]. Report ITU-R M. 2135, 2009.
- [12] GB/T 14617.1-2012, 陆地移动业务和固定业务传播特性 第 1 部分:陆地移动业务传播特性[S]. GB/T 14617.1-2012, Propagation characteristics in land mobile service and fixed service—Part 1: Propagation characteristics in land mobile service[S].
- [13] 黄凯丽. 山区环境电波传播预测的改进算法研究[D]. 南京:南京邮电大学, 2017.
- HUNG K L. Research on improved algorithm of radio propagation in mountain area [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2017.
- [14] JIANG Y X, LIU Q, ZHENG F C, et al. Energy-efficient joint resource allocation and power control for D2D communications [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(8): 6119-6127.
- [15] 马学森, 朱建, 谈杰, 等. 多头绒泡菌预处理的改进 Q 学习算法求解最短路径问题[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(5): 148-157.
- MA X S, ZHU J, TAN J, et al. Physarum police phalum algorithm based improved Q-learning for shortest path solution [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019,33(5): 148-157.
- [16] 彭艺, 张申, 朱豪, 等. 联合机器学习的 D2D 通信多中继选择机制[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(3): 149-154.
- PENG Y, ZHANG SH, ZHU H, et al. D2D communication multiple relay selection mechanism for joint machine learning [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(3): 149-154.
- [17] WANG R, LIU J, ZHANG G, et al. Energy efficient power allocation for relay-aided D2D communications in 5G networks[J]. China Communications, 2017, 14(6): 54-64.
- [18] ZHANG H, JIANG C, MAO X, et al. Interference-limited resource optimization in cognitive femtocells with fairness and imperfect spectrum sensing [J]. IEEE Transaction on Vehicular Technology, 2016, 65(3): 1761-1771.

## 作者简介



彭艺, 分别在 1996 年、2000 年和 2005 年于电子科技大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为昆明理工大学副教授, 主要研究方向为无线通信。

E-mail: 527037928@qq.com

**Peng Yi** received B. Sc., M. Sc. and Ph. D. all from University of Electronic Science and Technology of China in 1996, 2000 and 2005, respectively. Now she is an associate professor at Kunming University of Science and Technology. Her main research interest includes wireless communication.



付晓霞, 昆明理工大学硕士研究生, 主要研究方向为无线通信。

E-mail: 2438314248@qq.com

**Fu Xiaoxia** is a M. Sc. candidate of Kunming University of Science and Technology. Her main research interest includes wireless communication.